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

# ÇELİK UZAY KUBBE SİSTEMLERİN AĞIRLIKÇA OPTİMUM DİZAYNI

**KADRİYE SOYKAN**
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**
**ANABİLİM DALI**
**Konya, 2007**

**T.C**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# ÇELİK UZAY KUBBE SİSTEMLERİN AĞIRLIKÇA OPTİMUM DİZAYNI

**KADRİYE SOYKAN**

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

Bu tez / / 2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

| | |
|---|---|
| ……... | …… |
| Yrd. Doç. Dr. Yunus DERE | Yrd. Doç. Dr. Adnan KARADUMAN |
| (Üye) | (Danışman) |

……..

Yrd. Doç. Dr. Meral BÜYÜKYILDIZ

(Üye)

# ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

**ÇELİK UZAY KUBBE SİSTEMLERİN AĞIRLIKÇA OPTİMUM DİZAYNI**

**Kadriye SOYKAN**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Adnan KARADUMAN**
**2007, 109 sayfa**

**Jüri: Yrd. Doç. Dr. Yunus DERE**
**Yrd. Doç. Dr. Adnan KARADUMAN**
**Yrd. Doç. Dr. Meral BÜYÜKYILDIZ**

Son yıllarda ülkemizde çelik uzay kubbe sistem uygulamaları geniş açıklıkların geçilmesinde ekonomik ve fonksiyonel avantajlara sahip olduğu için büyük önem taşır hale gelmiştir.

Bu çalışmada çelik uzay taşıyıcı sistemler, çift eğrilikli (kubbesel) uzay kafes taşıyıcı sistemler, çelik uzay kubbelerin hesap metotları ve bileşenleri ile çelik uzay kubbelerde kullanılan bilgisayar programları kısaca özetlendikten sonra çelik uzay kubbe sistemlerinin optimizasyonu araştırılmıştır. Bu amaçla çember, elips ve parabol gibi üç farklı eğriden oluşan tek ve çift katlı kubbe sistemler seçilmiştir. Seçilen bu tipik tek ve çift katlı kubbeler her biri farklı açıklık ve yüksekliklerde ayrı ayrı incelenmiştir. İnceleme sırasında AUTOCAD programında çizilen üç boyutlu kubbe sistemleri SAP2000 programına aktarılarak analizler yapılmış ve sistemlerin en elverişsiz yük altındaki kesit etkilerine bağlı olarak boyutları hesaplanmıştır.

Belirlenen her bir sistemin çelik ağırlıkları bulunarak aralarında ağırlık ve birim alan ağırlığı bakımından ekonomik bir mukayese yapılmıştır. Sistem ağırlıkları ve

birim ağırlıklar tablolar halinde gösterilmiştir. Ayrıca sistem ağırlığı ile açıklık, birim alan ağırlığı ile açıklık arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler elde edilmiştir. Deplasman açıklık değişim grafikleri çizilmiştir. Sonuç bölümünde, sistemlerin birbirleriyle kıyaslanmaları yapılarak, sonuçlar yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik, kubbe, uzay kafes, tek katlı, çift katlı, optimum.

## ABSTRACT

**MSc Thesis**

**OPTIMUM WEIGHT DESIGN OF STEEL SPACE DOME**

**Kadriye SOYKAN**

**Selçuk Üniversity Graduate School of Natural and Applied Sciences**
**Civil Engineering Department**

**Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Adnan KARADUMAN**
**2007, 109 Pages**

**Jury: Yrd. Doç. Dr. Yunus DERE**
**Yrd. Doç. Dr. Adnan KARADUMAN**
**Yrd. Doç. Dr. Meral BÜYÜKYILDIZ**

In recent years, the implementations of steel space dome systems have been playing an important role to pass large openings because of the fact that they have economical and functional advantages in our country.

In this study, the components and calculation methods of the steel space load-bearing systems, double curvature space truss load-bearing systems and steel space domes and computer programs used in steel space dome were summarized shortly and then the optimization of steel space dome systems were researched. For this aim, single and double layered dome systems which consist of different curves like circle, parabola and ellipse were selected. Each of these typical single and double layered domes was analyzed in different span and height. During the analysis, three dimensional dome systems plotted in AUTOCAD program were transferred to SAP2000 program, scoped out and the sizes which depend on the effect of cross section under most inconvenient load were calculated.

After finding steel weights for each specified system, an economic comparison was done in terms of weight and unit of area weight. Sytem weights and unit weights were shown on tables. Moreover the curves of the system weight versus span and unit of area weight versus span were obtained. At last, systems were compared to each other and the results were interpreted.

**Key words:** Steel, dome, space truss, sıngle layered, double layered, optimum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…….i
ABSTRACT…….iii
İÇİNDEKİLER..……...v
ŞEKİLLER LİSTESİ…….....viii
TABLOLAR LİSTESİ…….xi
SEMBOLLER LİSTESİ……xiii
KISALTMALAR LİSTESİ……...xiv

1. GİRİŞ……....1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI……...……..3

3. ÇELİK UZAY TAŞIYICI SİSTEMLER…….6
3.1. Uzay Kafes Taşıyıcı Sistem Tanımı Ve Kullanım Amacı…….8
3.2. Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Uygulama Biçimleri……..9
3.2.1. Düzlem uzay kafes taşıyıcı sistemler……10
3.2.2. Tek eğrilikli (tonozsal) uzay kafes taşıyıcı sistemler……12
3.2.3. Çift eğrilikli (kubbesel) uzay kafes taşıyıcı sistemler……...14
3.3. Çift Eğrilikli (Kubbesel) Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemler……15
3.4. Kubbesel Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Oluşum İlkeleri……...17
3.5. Kubbesel Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Tarihçesi……..17
3.6. Kubbesel Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Sınıflandırılması…….....21
3.6.1. Radyal nervürlü kubbeler……..21
3.6.2. Schwedler kubbeler……...23
3.6.3. Lamella kubbeler……..24
3.6.4. Jeodezik kubbeler……..26
3.6.5. Üç doğrultuda ızgara kubbeler……..27

3.6.6. Schlink kubbeler……...……....28
3.6.7. Föppl (Ağ, Net-work) kubbeler……....29

4. ÇELİK UZAY KUBBE SİSTEMLERİN HESAP METOTLARI, KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI VE TEKNİK ŞARTNAMESİ…….31
4.1. Çelik Uzay Kubbelerin Hesap Metotları....…….31
4.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi……..32
4.2. Çelik Uzay Kubbelerin Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları……..33
4.2.1. Framecad programı……...33
4.2.2. SAP 2000 programı……..34
4.3. Çelik Uzay Kubbe Sistemleri Oluşturan Bileşenler……...35
4.3.1. Düğüm noktaları……...37
4.3.2. Çubuklar ve konik parçalar……...38
4.3.3. Cıvata, somun ve pimler……...40
4.3.4. Aşık tutucu elemanlar ve aşıklar…….....40
4.3.5. Mesnetler……...42
4.3.6. Korozyona karşı koruma……...43
4.3.7. Montaj……...45

5. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ……47
5.1. Optimizasyon……...47
5.2. Optimizasyonun Zaman İçinde Gelişimi…….48
5.3. Optimum Tasarım Problemleri..……..49
5.4. Optimum Tasarım Teknikleri..……50
5.4.1. Matematik programlama……...50
5.4.2. Parametrik optimizasyon….……...……..51
5.4.3. Höristik arama……...51
5.4.3.1. Yapay sinir ağları……....52
5.4.3.2. Genetik algoritmalar……..52

6. KUBBE SİSTEMLERİN AĞIRLIKÇA PARAMETRİK OPTİMUM DİZAYNI……53

6.1. Kubbe Sistemlerin Optimum Dizaynı……..53
6.2. Çalışmada Kullanılan Optimum Tasarım Yöntemi…….53
6.3. Seçilen Kubbe Sistemler ……..……...54
6.3.1. Malzeme özellikleri…..…….……..……...….57
6.3.2. Yük analizi Ve Yükleme Kombinasyonları…….…….59
6.4. Statik Analizler Ve Sonuçlar……..…….61
6.4.1. Tek katlı kubbe sistemlerin analizi ve boyutlandırılması…….62
6.4.2. Çift katlı kubbe sistemlerin analizi ve boyutlandırılması…….67
6.5. Boyutlandırma Ve Tahkik……...…….72
6.6. Deplasmanların Hesaplanması……..……...76

7. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ……78
7.1. Tek Katlı Kubbe Sistemlerin Analizi……...78
7.2. Çift Katlı Kubbe Sistemlerin Analizi……...84
7.3. Tek Ve Çift Katlı Kubbe Sistemlerin Karşılaştırılması…….……..90

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER……..104

9. KAYNAKLAR…….107

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Düğüm noktasında üç çubuğun birleşmesi ……..……...7
Şekil 3.2. Küresel üçgen elemanlar……..…….8
Şekil 3.3. Tek başlıklı uzay kafes sistem……....11
Şekil 3.4. İki doğrultulu uzay kafes sistem…….11
Şekil 3.5. Basit düzlem kafes kiriş, tepede birleşen iki düzlem kafes kiriş, düzlem kafes kirişlerle katlanmış kafes sistem kurulması……...……....12
Şekil 3.6. Yükler karşısında biçim bozulmaları……..……13
Şekil 3.7. Tonozsal uzay kafes taşıyıcı sistem ile enlemsel ve boylamsal mekan örtülmesi……..14
Şekil 3.8. Kubbesel uzay kafes sistem……15
Şekil 3.9. Tek katlı kubbesel uzay kafes sistem……..16
Şekil 3.10. Çift katlı kubbesel uzay kafes sistemler …….....16
Şekil 3.11 Kubbede bir beşgenin yerleştirilişi…….....17
Şekil 3.12 Charlotta hükümet binası, kuzey carolina…….20
Şekil 3.13 B.Fuller'in jeodezik kubbesi…….….20
Şekil 3.14 Radyal nervürlü kubbe türleri……..……..22
Şekil 3.15. Rodos'taki Rodos Palace otelinin üstünü örten net açıklığı 61 m olan radyal nervürlü kubbenin dış görünüşü……...23
Şekil 3.16 Schwedler kubbelerin plan ve görünüşleri……...…….24
Şekil 3.17 Lamella kubbelerin plan ve görünüşleri……..……..25
Şekil 3.18. Jeodezik kubbelerin plan görünüşleri……..……..……...27
Şekil 3.19. Üç doğrultulu ızgara kubbeler……..……..……..28
Şekil 3.20. Schlink kubbelerin plan ve görünüşleri……...…….29
Şekil 3.21. Föppl (Ağ, Net-work) kubbelerin plan ve görünüşleri……...……..30
Şekil 4.1. Uzay kafes sistem tipleri……..……...35
Şekil 4.2. Çelik uzay kubbe sistemlerde kullanılan modül örnekleri…….....36
Şekil 4.3. İki boyutlu modüllerde modül ölçüsü……...…….……..…...36
Şekil 4.4. Uzay kafes sistem düğüm noktası……...37
Şekil 4.5. Düğüm elemanları ve boyutları……..37

Şekil 4.6. Mero düğüm noktası……...38
Şekil 4.7. Çubuklar ve konik parçalar…….……....39
Şekil 4.8. Aşık tipleri…….…….……41
Şekil 4.9. Sabit mesnet küresi…….……42
Şekil 4.10. Kayıcı mesnet küresi…….……....43
Şekil 4.11. Toz boya kabini..…….…….45
Şekil 6.1. Kubbesel uzay kafes sistemlerde örtülen açıklık……...…….……54
Şekil 6.2. Geometrisi açısından çelik uzay kubbe sistemler…….……..55
Şekil 6.3. Çubuk kesiti……57
Şekil 6.4. Tek katlı kubbe sistemde kabuk elemanların gösterimi…….63
Şekil 6.5. Tek Katlı kubbe sistemde sabit mesnetlerin atanması……64
Şekil 6.6. Tek katlı kubbe sistemde zati yükün kubbe üzerinde dağılımı……...64
Şekil 6.7. Tek katlı kubbe sistemde sistemin şekil değiştirmiş durumu…….66
Şekil 6.8. Tek katlı kubbe sistemin boyutlandırılması……66
Şekil 6.9. Çift katlı kubbe sistemde kabuk elemanların gösterimi…….68
Şekil 6.10. Çift katlı kubbe sistemde kabuk elemanların gösterimi……...69
Şekil 6.11. Çift katlı kubbe sistemde zati yükün kubbe üzerinde dağılımı…….69
Şekil 6.12. Çift katlı kubbe sistemde sistemin şekil değiştirmiş durumu……...71
Şekil 6.13.Çift katlı kubbe sistemin boyutlandırılması……...71
Şekil 6.14.Tek katlı kubbe sistemde deplasmanın alındığı nokta……...77
Şekil 6.15.Çift katlı kubbe sistemde deplasmanın alındığı nokta ……..77
Şekil 7.1. Tek katlı çember kubbe sistemler……...……79
Şekil 7.2. Tek katlı elips kubbe sistemler…...…….……...79
Şekil 7.3. Tek katlı parabol kubbe sistemler……...……...…….80
Şekil 7.4. Tek katlı kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri…….81
Şekil 7.5. Tek katlı kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri…….83
Şekil 7.6. Tek katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim grafikleri....84
Şekil 7.7. Çift katlı çember kubbe sistemler……...…85
Şekil 7.8. Çift katlı elips kubbe sistemler……...……85
Şekil 7.9. Çift katlı parabol kubbe sistemler…...…..……86

Şekil 7.10. Çift katlı kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri……87
Şekil 7.11. Çift katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri……..88
Şekil 7.12. Çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim değerleri...89
Şekil 7.13. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri……...91
Şekil 7.14. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri……..92
Şekil 7.15. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri…….....93
Şekil 7.16. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri…….94
Şekil 7.17. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri…….95
Şekil 7.18. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri……..96
Şekil 7.19. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri……..97
Şekil 7.20. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri……...98
Şekil 7.21. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin tepedeplasmanı açıklık değişim grafikleri……...…..……100
Şekil 7.22. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı ve maksimum sınır deplasman açıklık grafikleri……...…..……..100
Şekil 7.23. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim grafikleri……...……..101
Şekil 7.24. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim grafikleri……..…….……102
Şekil 7.25. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim grafikleri……..…….……...……103

**TABLOLAR LİSTESİ**

Tablo 4.1. Boruların DIN EN 10025'e göre çelik kalitelerine bağlı mukavemet değerleri…….39
Tablo 4.2. Cıvata, somun ve pim için kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.40
Tablo 6.1. Tek katlı kubbe sistemlerde alınan açıklıklar ve yükseklikler……..55
Tablo 6.2. Çift katlı kubbe sistemlerde alınan açıklıklar ve yükseklikler….....56
Tablo 6.3. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin alanları……...……....56
Tablo 6.4. DIN normları ile TS standardında verilen emniyet gerilmeleri…….57
Tablo 6.5. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde kullanılan çubuklar……58
Tablo 6.6. St.37 çeliği için ω burkulma katsayıları……73
Tablo 6.7. 30 metre açıklık ve 10 metre yükseklikte tek katlı elips kubbe sistemin SAP kontrolü ve gerilme tahkiki…….74
Tablo 6.8. 30 metre açıklık ve 10 metre yükseklikte çift katlı elips kubbe sistemin SAP kontrolü ve gerilme tahkiki…….75
Tablo 6.9. Tek ve çift katlı sistemlerin açıklığa göre deplasman değerleri……76
Tablo 7.1. Tek katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları …80
Tablo 7.2. Tek katlı kubbe sistemlerde kullanılan çubukların kesit numaraları…….81
Tablo 7.3. Tek katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları……..….83
Tablo 7.4. Tek katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim değerleri....84
Tablo 7.5. Çift katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları….86
Tablo 7.6. Çift katlı kubbe sistemlerde kullanılan çubukların kesit numaraları…….86
Tablo 7.7. Çift katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları ……..……88
Tablo 7.8. Çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim değerleri…89
Tablo 7.9. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları……...……....90
Tablo 7.10. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları……..…….....91

Tablo 7.11. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları……..…….....92
Tablo 7.12. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları ……..……..93
Tablo 7.13. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları ……..…….....95
Tablo 7.14. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları……..…….....96
Tablo 7.15. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları ……..…….....97
Tablo 7.16. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları ……..……..98
Tablo 7.17. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim değerleri …….…..……..……...…….99
Tablo 7.18. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim değerleri ……..……..…….....101
Tablo 7.19. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim değerleri……..…….……..……..…….....102
Tablo 7.20. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık değişim değerleri……...…..……..…….....103

**SEMBOLLER LİSTESİ**

| | |
|---|---|
| R | : Asal çap |
| t | : Et kalınlığı |
| $\Delta$ | : Katsayılar determinantını |
| $\omega$ | : Burkulma katsayısı |
| D | : Boru çapı |
| d | : Boru iç çapı |
| F | : Kesit alanı |
| I | : Atalet momenti |
| i | : Atalet yarıçapı |
| $\lambda$ | : Narinlik |
| Pmax | : Çubuktaki maksimum çekme veya basınç kuvveti |
| $\sigma_{em}$ | : Çubuk emniyet gerilmesi |
| $\sigma_{çem}$ | : Çekme emniyet gerilmesi |
| A(T) | : Spektral ivme katsayısı |
| $A_o$ | : Etkin yer ivme katsayısı |
| I | : Bina önem katsayısı |
| S(T) | : Spektrum katsayısı |
| T | : Bina doğal titreşim periyodu |
| Ct | : Eşdeğer deprem yükü yönteminde birinci doğal titreşim periyodunun yaklaşık olarak belirlenmesinde kullanılan katsayısı |
| $H_N$ | : Binanın temel üstünden itibaren ölçülen toplam yüksekliği |
| $T_A$, $T_B$ | : Spektrum karakteristik periyotları |
| W | : Binanın, toplam ağırlığı |
| R | : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı |
| $g_i$ | : Binanın i. katındaki toplam sabit yük |
| $q_i$ | : Binanın i. katındaki toplam hareketli yük |
| $w_i$ | : Binanın i'inci katındaki toplam ağırlığı |
| $V_t$ | : Binaya etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü |

## KISALTMALAR LİSTESİ

A.B.Y.Y.H.Y : Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik

DIN : Alman Standardı

SAP.: Structural Analysis Program

TS : Türk Standardı

# 1. GİRİŞ

Çelik uzay kafes taşıyıcı sistemler stabilitesi oldukça yüksek yapılardır. Mimaride mümkün olduğunca geniş açıklıklı alanları veya mekanları kolonsuz geçmek tüm çağların bir sorunu olmuştur. Günümüzde, bu sorun uzay kafes taşıyıcı sistemlerle çözülmüştür. Üç ayrı düzlemdeki çubuk elemanların bir noktada birleşmesinden oluşan ve statik olarak üç doğrultuda da çalışan modüler sistemlerdir. Tüm dünyada yıllardır kullanılan sistemler çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılan öngerilmeli beton, klasik çelik makas veya benzeri sistemler yerine artık daha ekonomik, hızlı, estetik, güvenli ve uygulaması daha kolay olan uzay kafes taşıyıcı sistemler kullanılmaktadır.

Uzay kafes sistemler hafif, rijit ve hiperstatiklik derecesi yüksek olduğundan sistemdeki herhangi bir çubukta meydana gelebilecek bir kopmadan veya burkulmadan tüm yapı etkilenmemektedir. Bu sistemlerin hiperstatiklik derecelerinin yüksek olması, sistem içinde yük dağılımının sürekli olmasını sağlaması açısından bir avantajdır. Uzay kafes sistemler en az malzeme ile en fazla verimin alındığı sistemlerdir.

Uzay kafes taşıyıcı sistemler, temel biçimleri ve oluşum ilkeleri açısından incelenebilir. Bunlardan biri de kubbesel uzay kafes sistemlerdir. Kubbe yapıları uzay kafesin ilk örneklerini teşkil etmektedir. Kubbeler, kubbeyi oluşturan dönel yüzey üzerinde bulunan taşıyıcı parçalardan veya düğüm noktaları bu yüzey üzerinde bulunan düzgün doğrusal elemanlardan meydana gelmektedir. Kuvvetlerin tüm mekana yayılmasına olanak sağlayan kubbesel taşıyıcılardır.

Bu çalışmanın esasını, çelik uzay kubbe sistemlerin dizaynını ve statik analizini yapmak ve bu sistemleri ağırlıkça dikkate alarak ekonomik bir mukayese yapmak oluşturmaktadır. Bu amaçla çember, elips ve parabol şeklinde açıklıkları otuz metreden başlayıp yüz metreye kadar olan tek ve çift katlı kubbe sistemler incelenmiştir.

Bir yapı probleminin optimum çözümlenmiş sayılabilmesi için, yapının mimarisinin güzel, kullanışlı yapımının ve bakımının kolay ekonomik olması gerekir. Çelik uzay kubbe sistemler, yukarıda sayılan koşulların gerçekleştirilmesinde, hem

mimarlara, hem mühendislere çeşitli olanaklar sağlamaktadırlar. Yapıların şekillendirilmesinde kullanılabilen kolaylıklar, çubuklarının ve düğüm noktalarının standartlaşmaya uygun olmaları ile ortaya çıkabilen ekonomi, bu sistemlerde oluşan çarpıcı özelliklerdir ( Odabaşı ve Özgen 1987 ).

Çelik uzay kubbe sistemlerin dizaynı AutoCAD de yapılarak çözümü SAP2000 statik analiz programı ile yapılmıştır. Bu sistemlerin ağırlıkları hesaplanarak ağırlık bakımından bir karşılaştırması yapılmıştır. Karşılaştırmada, çelik uzay kubbe sistemlerin, düğüm ve çubuk sayısı, kullanılan en büyük boru çapı çubuklara gelen maksimum çekme ve basınç kuvvetleri ile maksimum deplasmanlar ve esas olarak sistemin çubuklara bağlı ağırlığı göz önünde bulundurulmuştur. Sistemin ağırlığı ile açıklık, birim alan ağırlığı ile açıklık ve deplasman açıklık değişim grafikleri çizilerek sistem davranışı ile ilgili eğriler elde edilmiş ve sonuçların bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

**Makowski (1966),** tarafından yazılan ‘‘steel space structures’’ adlı kitap, çelik uzay sistemler hakkında yayınlanmış en geniş kapsamlı kitaptır. Bu eserde çelik uzay taşıyıcı sistemlerin tarihi gelişimi anlatılmıştır.

**Aşkar (1985),** çelik uzay taşıyıcı sistemleri, kabuk kavramından başlayarak incelemiş, küresel ve silindirik kabuk sistemler üzerinde durmuştur. Kafes örgülü kabuklar ve bunların hesap metotları ve analizleri anlatılmıştır. Son kısımda da kafes örgülü basık kabuklara ilişkin sorunlara değinilmiştir.

**Odabaşı, Özgen (1987)** tarafından yapılan çalışmada, uzay taşıyıcı sistemlere ilişkin genel bilgiler, yapı şekilleri, hesap yöntemleri, membran analojisi, plak analojisi ve plak teorisinin sınır durumları anlatılmaktadır. Uzay taşıyıcı sistemlerde boyutlandırma ve boyutlandırma ile ilgili genel bilgiler ile boyutlandırmada yapılması gereken tahkikler anlatılmış ve son olarak da uzay taşıyıcı sistemlerin ülkemizdeki uygulamalarına yer verilmiştir.

**Uman (1989)** tarafından yapılan çalışmada, boyu enine oranla iki kat olan bir alanda, değişik düzlem kafes sistemlerle uzay kafes sistem arasında ekonomik bir mukayese yapılmıştır. Ayrıca uzay kafes sistem için matris deplasman metodu kullanılarak bir bilgisayar programı yapılmıştır. Böylece sistemler boyutlandırılmış, çelik ağırlıkları hesaplanmış ve her bir sistem aralarında ağırlık bakımından kıyaslanmıştır.

**Akın (1997)** tarafından yapılan çalışmada, uzay kafes sistemler hakkında genel bilgi verilmiş, ayrıca kare tabanlı piramit modüller den oluşan düzlem uzay kafes örneğinde kafes yükseklikleri ve mesnetleme tipleri değiştirilerek ekonomiklik araştırması yapılmış ve araştırma sonunda uzay kafes sistemlerde açıklık arttıkça maliyetin arttığı ve kafes yüksekliğinin belli bir orana kadar artmasının ekonomik olduğu sonucuna varılmıştır.

**Öztorun (1997)** tarafından yapılan çalışmada, uzay kafes sistemler hakkında genel bilgi verilmiş, yedi farklı tiplerdeki uzay kafes taşıyıcı sistemlerin birbirlerine göre üstünlükleri incelenmiştir. Sonuçta uzay kafes taşıyıcı sistemlerin iyileştirme çalışmaları anlatılmıştır.

**Köksal (1998),** sonlu elemanlar metodu kitabında, sonlu elemanlar tekniği açıklanmış, sonra genel olarak orthotrop, izotrop, kompozit ve elastik özelliklere sahip çubuk, plak ve kabuk sistemlerin eğilme ve stabilite problemlerinin ayrı ayrı analizleri ve sonlu elemanlar yöntemi ile çok sayıda sayısal çözümleri orijinal örnekleri de içerecek şekilde incelemiştir.

**Saka (1998),** optimum' luk kriteri yöntemini kullanarak, çelik uzay kafes sistemlerin optimizasyonu problemini incelemiştir. Geometri değişimlerinin ve malzeme davranışının lineer olmayan etkilerinin göz önüne alındığı çalışmada yer değiştirmelerle ilgili kısıtlamalar da göz önüne alınmıştır.

**Arat (1999)** tarafından yapılan çalışmada, uzay kafes sistemlerin statik hesabı üzerine genel bir çalışma ve uzay kafes sistemlerde günümüzde kullanılan teknik detaylar ve bunların sonucunda düzlem kafes sistemlerle ekonomi ve zaman açısından bir karşılaştırma yapılmış ve bunun sonucunda da büyük açıklıkların aşılmasında uzay sistemlerin daha ekonomik olduğu belirtilmiştir.

**Turan (1999)** tarafından yapılan çalışmada, mühendislikte kullanılan taşıyıcı sistemler arasında önemli yer tutan kafes sistemlerin optimum boyutlandırılmasında geometrik ve malzeme nonlineerliğinin etkisi incelenmiştir.

**Aydın (2000),** genetik algoritma kullanılarak uzay kafes sistemlerin optimum tasarımı gerçekleştirilmektedir. Tasarımda gerilme, yer değiştirme ve stabilite sınırlayıcıları dikkate alınmış, FORTRAN programlama dilinde bir bilgisayar programı kodlanmış ve bu program yardımıyla çeşitli kafes sistemlerin optimum tasarımı yapılmıştır.

**Gündüz (2002)** tarafından yapılan çalışmada, mesnetleme şartları çubuk boyları ve yüklemeler özdeş tutulmaya çalışılarak iki doğrultulu dik (B1), iki doğrultulu eğik (B2) ve çapraz iki doğrultulu sistemler; otuz metre, kırk iki metre ve altmış metre açıklıklar için SAP2000 programı kullanılarak parametrik yaklaşımla analiz edilmiştir. Hangi sistemin hangi açıklıklarda daha ekonomik sonuçlar verdiği araştırılmıştır.

**Keleşoğlu (2002),** bulanık kümeler kullanılarak lineer olmayan uzay kafes sistemlerin çok amaçlı optimizasyonu yapılmıştır. Kafes sistemlerin analizinde ANSYS paket programı kullanılmıştır. Çok amaçlı bulanık optimizasyon tekniğinin algoritması ANSYS parametrik boyutlandırma dili ile yazılmıştır. Geliştirilen algoritmanın uygulanabilirliği, Rao' nun (1992) makalesindeki üç çubuklu düzlem kafes sistemin çözümü ile gösterilmiştir. Boyutlandırma probleminin formülasyonun da amaç fonksiyonu olarak minimum ağırlık ve minimum deplasmanlar göz önüne alınmıştır.

# 3. ÇELİK UZAY TAŞIYICI SİSTEMLER

Genel olarak uzay taşıyıcı sistemler, kabuk kavramından başlıyarak incelenebilirler. Gerçekten de II. Dünya savaşından önceki yıllarda küresel ve silindirik kabuk türündeki kubbeler, büyük alanları kolonsuz olarak örtmede kullanılan en iyi sistem olmuştur.

Aslında yüzyılı aşan bir süreden beri başka sistemlerde bu amacı gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. 20. yüzyılda inşa edilmiş olan tren istasyonları incelendiği takdirde, çelik sistemlerin büyük açıklıkları geçmedeki elverişliliği kolayca gözlenebilmektedir. Bunlar arasında, eğri eksenli kafes kiriş türündeki çelik kemerler sayılabilir. Endüstri yapıları ve köprüler için çelik kafes kirişler, geniş açıklıkları geçmede olağan yapı sistemi olmuştur.

Sonraki yıllarda yapı mühendisliğinin uygulamalı mekanik ile birlikte kullanılması sonucu, yerleşmiş sistemlerin dışında da olanaklar bulabileceği ortaya çıkmıştır. Böylece, kiriş plak-kabuk sistem dizisinden, kiriş-ızgara-uzay sistem dizisine geçiş sağlanmıştır.

Kabuklar plak kavramından doğmuş, üç boyutlu ve genellikle küçük kalınlıklı taşıyıcı yapı sistemleridir. Yapı mühendisliği açısından basık kabuklar teoride basitleştirilmelere olanak sağladığından önem kazanmıştır.

II. Dünya savaşından önce, çoğunlukla dairesel kabukların kullanılmasına karşı savaştan sonraki gelişmeler pek çok değişik formda kabukların kullanılmasına olanak vermiştir. Çeşitli sınır şartlarına sahip kabuklara ait bilgisayar programlarının geliştirilmesi de daha önce çözülemeyen problemlerin ele alınmasını sağlamıştır. Sadece 40-50 yıl öncesine kadar hesapların diferansiyel denklemlerin kapalı çözümleriyle sınırlı kalması göz önüne alınırsa bu çok önemli bir gelişmedir. Ayrıca uygulamalı bilimlerdeki yeni yöntemlerde etkinlik göstermiştir ( Aşkar 1985 ).

Bilgisayarların kullanılması ve olanakları hesapların kapsamını önemli ölçüde genişletmiştir. Sayısal hesap yöntemlerinin sonucunda ortaya çıkan büyük sayıdaki lineer denklem takımlarının çözümü bu sayede gerçekleşmiştir.

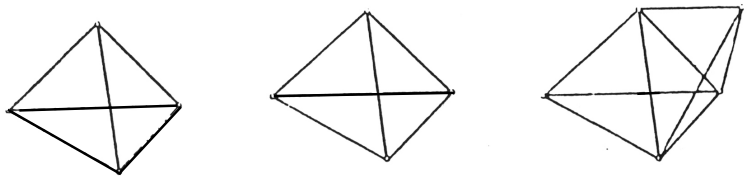
Sonuçta, bu tür yapılarda klasik mimari şekillerden tamamen uzaklaşılarak yeni biçimler sınırsız bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Bu düşünce tarzını daha da ilerletip örtülecek alanın boyutlarını arttırdığımızda bir optimum çözümle sınırlandığımız görülecektir. Bu da oldukça ince olan kabuğun burkulma problemidir. Önlemlerden biri t/R oranını uygun seçmektir (t: Kalınlık, R: Asal çap). Ayrıca, kabuğun kırık kabuk biçiminde düzenlenmesi, öz yükü artırmadan enkesit rijitliğini artırıcı başka bir yoldur. Çeşitli şekillerde düzenlenen katlanmış plaklar bu rijitliği çok etkili bir şekilde arttırmaktadır.

Bundan sonraki adım, sürekli olan kabuk yüzeyi yerine ayrık elemanlardan oluşan bir sistem uygulamak olmuştur. Bu elemanlar, basınç ve çekmeye çalışan elemanlardır. İlk akla gelen ortogonal sistemler, yani ortogonal ızgaralardır. Bu da sonuçta, çekmeye çalışan yapı sistemleri fikrini ortaya çıkarmıştır. Bu yapı türü, enine ve boyuna doğrultuda çekme elemanlarından oluşmaktadır.

Bu kavram, eğer yüzeyinde doğrular içeren bir kabuk şekli seçilirse en uygun şekilde kullanılmış olacaktır. Böyle kabuklara örnek olarak, hiperbolik paraboloid, dönel hiperboloid, kanoid, v.b. örnek verilebilir.

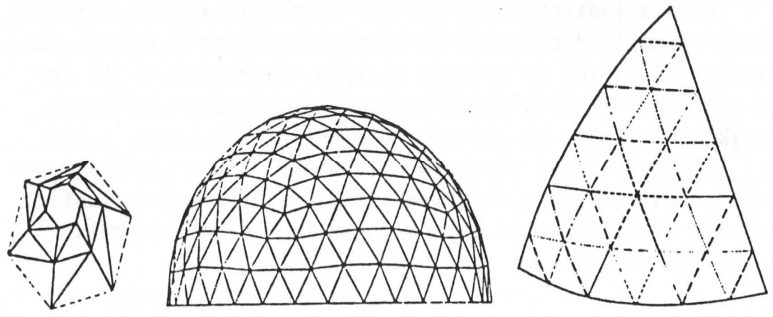
Uzay taşıyıcı sistemlerin, kuvvetlerin üst ve alt başlık çubukları ile diyagonaller tarafından alındığı tek bir kafes kirişten doğduğu söylenebilir. En basit form uzay üçgenleridir. Her düğüm noktasında üç çubuk birleşmektedir. Bu formlar birleştirilerek uzay sistemler oluşturulmaktadır (Şekil 3.1). Geniş açıklık veya geniş hcimlere gidildikçe, uzay ızgara sistemin düğüm noktaları düzlemde kalacak yerde eğrisel yüzeyde olacak biçimde düzenlenebilirler (Aşkar 1985).



Şekil 3.1. Düğüm noktasında üç çubuğun birleşmesi.

Uzay ızgaraları içeren küresel kabuklar çok kullanılan tiplerdendir. Bu tür yapıda uzunlukları farklı pek çok çubuk bulunur. Dolayısıyla montaj oldukça zordur.

Bu küresel kabuklar, jeodezik yapıların ilk örnekleridir. Genellikle çubuklar, kürenin jeodezik çizgileri üzerinde bulunmaktadır. Çeşitli uzay elemanlar, sistemin düğüm noktaları için referans eleman olarak kullanılmaktadır. Baz eleman olarak küresel üçgen elemanlar oldukça geniş uygulama alanı bulmuştur (Şekil 3.2) (Aşkar 1985).



Şekil 3.2. Küresel üçgen elemanlar.

Çelik uzay taşıyıcı sistemlerin, yaygın bir uygulama biçimi uzay kafes taşıyıcı sistemlerdir.

### 3.1. Uzay Kafes Taşıyıcı Sistem Tanımı Ve Kullanım Amacı

Uzay kafes sistemler, düzlem veya eğri birbirine paralel iki çubuklar ağı ile bu ağların her birinin düğüm noktalarını diğer ağın bazı düğüm noktalarına bağlayan çubuklardan kurulu taşıyıcı düzenlerdir (Arda 1985). Bu sistemler; taşıyıcı elemanları, düğüm noktalarında, ağ yüzeyindeki açılı birleşimlerde ve her yönde hareket eden yüklere karşı dayanıklı olan üç boyutlu taşıyıcı sistemlerdir (Makowski 1966).

Toplumsal gelişmenin beraberinde getirdiği büyük açıklıklı yapılar ve örtülmeleri konusu karşısında, artık günümüzde geleneksel olarak kabul edilen yığma ve iskelet sistemler yetersiz kalmaktadır. Taşıyıcı duvar ve kolonların kullanıldığı açıklıkların basit yatay elemanlarla geçildiği yığma taşıyıcı sistemlerde, açıklıklarda doğal gereçlerin boyutlarına bağımlı olarak sınırlı olmaktadır. Öte yandan, taşıyıcı ve örtücü işlevindeki elemanlarından oluşan iskelet taşıyıcı sistemlerde ise ortaya çıkan hücresel çözümler mimari tasarımı büyük ölçüde ve olumsuz yönde etkilemektedir. Belirli açıklıklardan sonra çok ağırlaşan bu taşıyıcı sistemler, ekonomik olmayan boyutlara ulaşmaktadır.

Bu yüzden günümüzde büyük açıklıklı yapıların örtülmeleri konusunda yeni çağdaş taşıyıcı sistemler araştırılmaktadır. Bu araştırmalar sırasında asıl amaç, en az gereç kullanarak en hafif ve ekonomik sistemlerle, olanakların elverdiği ölçüde büyük açıklıkları örtebilmektedir. Bu amacı gerçekleştirmek için, basit basınç ve basit çekme gerilmelerini içeren taşıyıcı sistemler gerekmektedir. Basit çekmeye ve basınca çalışan doğrusal çubuk biçimindeki elemanlar, yükleri çok yönlü bir yayılım sonucu zemine aktaran uzay kafes sistemlerdir (Akın 1997).

Uzay kafes sistemler, özellikle geniş açıklıkları mekan ortasında kolon kullanmadan veya az sayıda kolon kullanarak örtmede son derece elverişlidir. Son yıllarda sergi salonları, yüzme havuzları, endüstri yapıları, hangarlar, kapalı spor tesisleri (yüzme havuzları, vb.) okul binaları ve alışveriş merkezleri gibi geniş açıklıkları olan ve sık düşey taşıyıcı istenmeyen hacimleri örtmek için kullanılan sistemlerdir. Ayrıca sistemi oluşturan parçaların defalarca sökülüp takılabilmesi, dolayısıyla onarımının kolay olması da diğer olumlu özelliğidir.

### 3.2. Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Uygulama Biçimleri

Uzay taşıyıcılar üç boyuta yönelmiş çelik çubuklarla meydana getirilmiş ızgaralı bir dokuya sahip yapıları aracılığı ile tekil kuvvetlerin etkisini bütün bir sisteme yayma ilkesine göre çalışırlar. Uzay sistem, homojen bir yük dağılımı ilkesine sahiptir. Oldukça karmaşık statik hesapların bugün elektronik

hesaplayıcılarla yapılabilmesi, standardizasyon ve prefabrikasyon alanlarındaki gelişmeler bu tür yapıların uygulamasının yayılmasını hızlandırmaktadır.

Temel ilkeleri ve biçimleri açısından uzay kafes taşıyıcı sistemleri üç grupta incelenebilir;

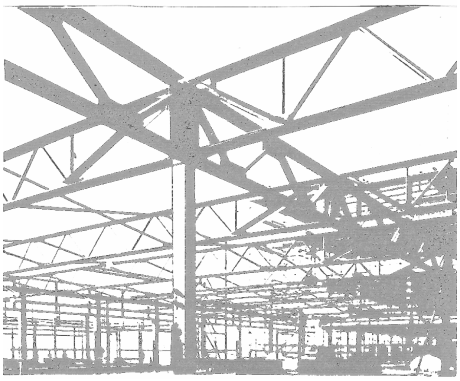
- Düzlem uzay kafes taşıyıcı sistemler.
- Tek eğrilikli (tonozsal) uzay kafes taşıyıcı sistemler.
- Çift eğrilikli (kubbesel) uzay kafes taşıyıcı sistemler.

### 3.2.1. Düzlem uzay kafes taşıyıcı sistemler

Aynı plana sahip olması gerekmeyen çubuklardan yapılmış iki veya daha fazla düz yüzeysel ağın, düğüm noktalarından birbirlerine arada belirli bir açıklık kalacak şekilde bağlanmaları sonucu düzlem uzay kafes taşıyıcı sistemler oluşturulmaktadır. Uzay kafes taşıyıcı sistemlerin oluşum ilkelerinde rijitlik mantığı üç boyuta (uzaya) uygulanırsa, üçgenler, uzayda rijit piramit biçimlere dönüşmektedir. Bu piramitlerin yan yana kullanım ilkesi bize rijit ve bir bütün olarak çalışan düzlem uzay kafes sistemleri vermektedir (Akın 1997).

Düz yüzeysel uzay taşıyıcıları tek veya aralarında belirli bir açıklık bulunan birden fazla ızgaradan oluşmakta ve buna göre tek tabakalı ve çift tabakalı olarak adlandırılmaktadır.

Tek tabakalı (başlıklı) uzay kafes sistemler, düz bir yüzeyde, dik, dar ve geniş açılarla kesişen taşıyıcı elemanlardan oluşan uzay taşıyıcıların en ilkel şeklidir. Ancak katlanmış yüzeyler veya şedli çatılar şeklinde kullanıldıklarında tek katlı sistemlerde kuvvetlerin düzlemde yayılmasından dolayı üç yönlü bir sistemden bahsedilemez. Tek başlıklı sistemler, genelde eğilme momenti alırlar. 15 m. açıklığa kadar ekonomiktir (Şekil 3.3) (Tekgüvercin 2002).



Şekil 3.3. Tek başlıklı uzay kafes sistem.

Çift tabakalı (başlıklı) uzay kafes sistemlerde, aynı alana sahip olması gerekmeyen çubukların oluşturduğu iki düzlemin, aralarında belirli bir açıklık kalacak şekilde düğüm noktalarından çubuklarla bağlanması ile elde edilmiş sistemlerdir. Gerçek anlamda uzaysal çalışma gösteren bu sistemler, katlardaki taşıyıcı elemanların yönleri bakımından iki doğrultulu ve üç doğrultulu sistemler olarak ayrılmaktadırlar. Bu sistemlerde eksenel kuvvetler oluşmaktadır. 100 m.'nin üzerindeki açıklıklarda bile kullanılmaktadır (Şekil 3.4) (Tekgüvercin 2002).



Şekil 3.4. İki doğrultulu uzay kafes sistem.

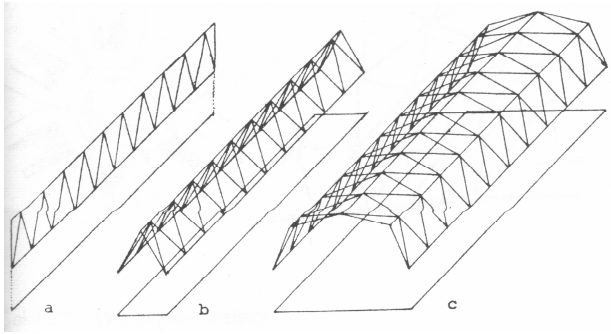
İki doğrultulu sistemler, birbirini kesen iki doğrultulu elemanlardan oluşmakta ve aralarında kare tabanlı piramitler meydana gelmektedir.

Üç doğrultulu sistemler ise, düzgün dörtyüzlü ve düzgün sekizyüzlü formları ile belirlenen modülasyona uygun olarak düzenlenmiş sistemlerdir.

### 3.2.2. Tek eğrilikli (tonozsal) uzay kafes taşıyıcı sistemler

Tonoz, bir kemerin kendi düzlemine dik bir eksen boyunca yinelenmesiyle elde edilen eğrisel örtü elemanıdır şeklinde tanımlanabilir. Günümüz koşullarında büyük açıklıklı mekanların örtülmesinde de basınca çalışan çelik çubuklarla boşluklu bünyeler oluşturularak yeni bir uygulama alanına kavuşturulmuştur.

Tonozsal uzay kafes sistemlerin oluşumunda düzlem kafes sistemleri ele alındığında Şekil 3.5 'de görüldüğü gibi, düzlem kafes kirişleri birleştirmek suretiyle katlanmış bir kafes sistem kurmak mümkündür. Düzlem kafes kirişleri katlamak suretiyle birleştirmeye devam edilirse poligonal ve sonra silindire yaklaşan katlanmış sistemler elde edilir (Vural 2000).

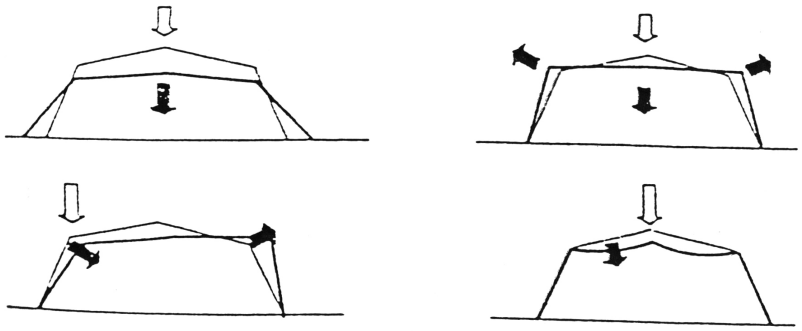



Şekil 3.5.a)Basit düzlem kafes kiriş

b)Tepede birleşen iki düzlem kafes kiriş

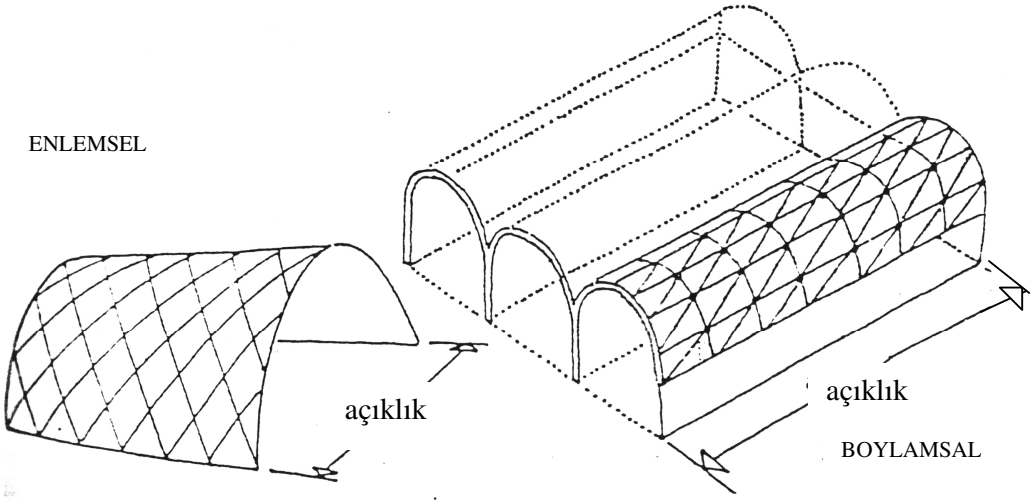
c)Düzlem kafes kirişlerle katlanmış kafes sistem kurulması

Oluşturulan bu sistemler rijit olmadıklarından yükler karşısında deforme olurlar. Çünkü örtülecek mekan yalnızca karşılıklı iki kenar üzerinde mesnetlenmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Yükler karşısında biçim bozulmaları

Tonozsal uzay kafes taşıyıcılar dengeli yükler altında çok iyi performans gösterirler. Fakat yükleme asimetrik olduğunda bölgesel moment artışları ve sehimler oluşur. Sistem açıklıkları enlemsel ve boylamsal olarak geçilebilir. Boylamsal ve enlemsel geçişte çalışmalar farklıdır. Boylamsal geçişte örtünün boyu uzayıp eni daralmaktadır (Şekil 3.7). Enlemsel geçişte ise örtünün eni uzayıp boyu kısalmaktadır (Akın 1997).

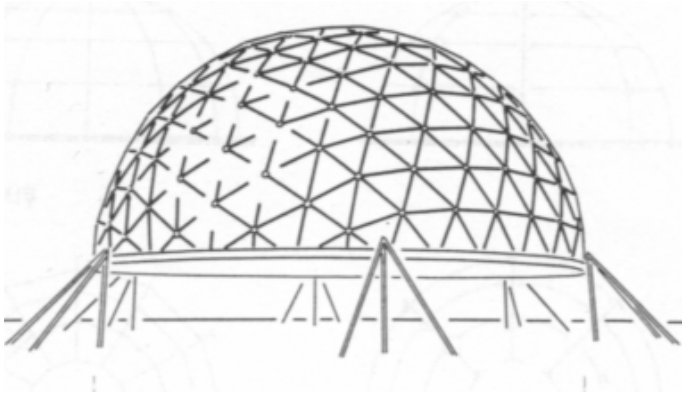



Şekil 3.7. Tonozsal uzay kafes taşıyıcı sistem ile enlemsel ve boylamsal mekan örtülmesi.

Tek yönde eğrilikli tek başlıklı tonozlar rijitleştirici kirişler kullanılarak 40 m ’ye kadar, çift başlıklı tonozlar ise 120 m ’nin üzerindeki açıklıkları kolaylıkla geçebilmektedir (Tekgüvercin 2002).

### 3.2.3. Çift eğrilikli (kubbesel) uzay kafes taşıyıcı sistemler

Kubbesel uzay kafes taşıyıcı sistemler yükleri mekan içinde yönlendirerek zemine aktarılmasına olanak veren basınca ve çekmeye çalışan son derece hafif taşıyıcı sistemlerdir. Büyük açıklıkların örtülmesine önemli ölçüde malzemeden ekonomi sağlamaktadır. Bu tür taşıyıcı sistemlerde çubukların düğüm noktaları çok duyarlı ve karmaşık kısımları olmaktadır. Maliyeti büyük ölçüde arttırırlar. Üçgen, kare, çokgen ve dairesel alanların örtülmelerinde bu sistemler tercih edilmektedir (Şekil 3.8) (Bayülgen 1993). Kubbesel sistemlerin kullanım alanları olarak konser salonları, stadyumlar, kapalı spor salonları, üniversite kafeteryaları, okul binaları alışveriş merkezleri ve büyük sergi salonları v.b. yapılar sayılabilir.



Şekil 3.8. Kubbesel uzay kafes sistem

### 3.3. Çift Eğrilikli (Kubbesel) Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemler

Kubbe, bir kemerin ekseni çevresinde döndürülmesiyle elde edilen, yarıküre biçimindeki eğrisel örtü elemanıdır şeklinde tanımlanabilir.

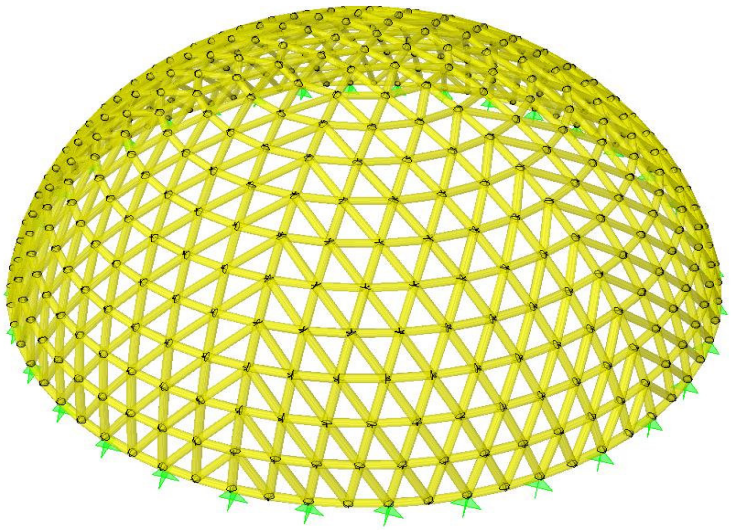
Kubbesel uzay kafes sistemler, geniş açıklıkları az miktarda malzeme ile geçebilen taşıyıcı sistemlerdir. Bu sistemlerde çubuklar arasındaki bağlantılar narin elemanlardan oluşur ve bunlar konstrüksiyonun ağırlığını taşır.

Yüklerin tümü çubuk ve düğüm noktalarından oluşan bir iskelet tarafından taşınır. Çift eğrilikli (kubbesel) uzay kafes sistemler; çubukların bulunduğu katmanlar açısından; tek ve çift katlı kubbesel uzay kafes sistemler olarak düzenlenebilir. Taşıyıcı sistem; rijit çubuklarla düğüm noktalarından oluşan bir iskelettir.

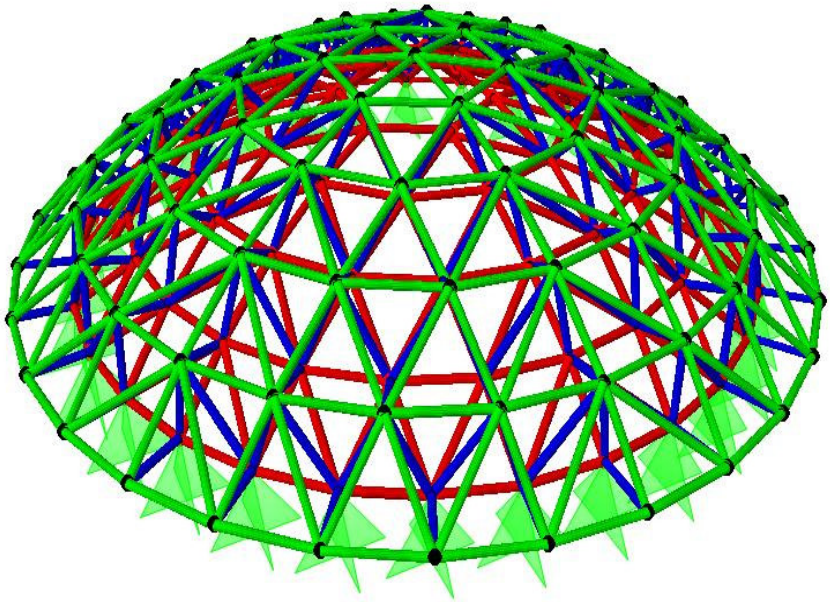
Tek Katlı Kubbesel Uzay Kafes Sistemler, çubuk ve düğüm noktaları tek bir küre yüzeyi üzerinde bulunduğu veya alt ve diyagonal çubukların olmadığı sistemlerdir (Şekil 3.9). Tek katlı kubbeler otuz kırk metrelik orta açıklıklara uygundur. Daha büyük açıklıklarda çubukların burkulma olasılığı artmaktadır. Çubukların burkulması, belli kurallara bağlı olan ve üstesinden gelinebilecek bir boyutlandırma sorunudur.

Çift Katlı Kubbesel Uzay Kafes Sistemler, büyük açıklıklar için uygun olmaktadır. Çubuk ve düğüm noktaları eşmerkezli iki kürenin üzerinde yer alıyorsa

çift katlı kubbeler söz konusudur. Bunlar üst, alt ve diyagonal çubuklardan oluşan sistemlerdir (Şekil 3.10). Çift katlı kubbesel uzay kafes sistemlerin özellikleri ise, asimetrik yüklere karşı daha dirençli olmasıdır. Basınç çubuklarının burkulma tehlikesi ile çubuk sistemlerde ikincil derecede ortaya çıkan eğilme gerilmeleri tek katlı sistemlere oranla daha azdır (Türkçü 2003).



Şekil 3.9. Tek Katlı Kubbesel Uzay Kafes Sistem

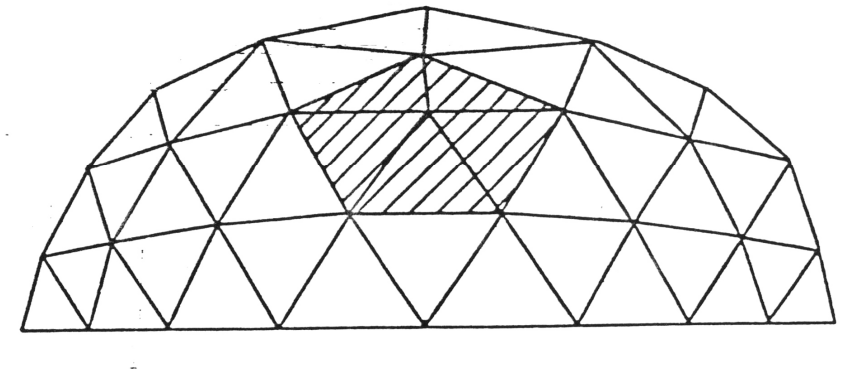


Şekil 3.10. Çift Katlı Kubbesel Uzay Kafes Sistem

### 3.4. Kubbesel Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Oluşum İlkeleri

Temelde, kubbe strüktürü gibi farklı iskeletlerde kubbe yüzeyi bazı geometrik şekillere bölünerek tanımlanabilir (Şekil 3.11). Bu bölünmeler üçgenler, dörtgenler, beşgenler ve altıgenler şeklinde olabilir.

Kubbe yüzeyini oluşturan elemanlar cıvatalı birleşimle inşa edildikleri zaman, bu bölünmelerden yalnızca üçgenlerden oluşturulan yüzeyler kaymaya, devrilmeye, çökmeye dayanıklıdır. Kubbe yüzeyinde dörtgen bölünmeler ek rüzgar bağlantılarına veya rijit birleşimlere gereksinim duyar. Kubbe yüzeyindeki beşgen veya altıgen bölünmeler ise ilave çapraz bağlantıların yapılmasını gerektirir (Vural 2000).



Şekil 3.11. Kubbede bir beşgenin yerleştirilişi.

### 3.5. Kubbesel Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Tarihçesi

Kubbeler, çok eski zamanlardan beri mimaride kullanılan en eski yapısal formdur ve uzay sisteme tipik bir örnektir. Maksimum açıklıklı mekanı minimum yüzey ile örtebilen kubbe, çok büyük alanların ekonomik yolla örtülmesine olanak verir. Eski yapıların çoğu dairesel plan üzerine inşa edilmişlerdir, bu bakımdan

kubbe, çatı kontrüksiyonu için kolay ve uygun bir form sağlar. Kubbelerin gelişimi, mevcut malzemelerin gelişimi ile ilgilidir. Kubbeler ilk olarak taş ile inşa edilmiştir, tuğla ve ahşabın kullanılmasıyla bunu büyük bir değişiklik izlemiştir. Yeni bir malzeme olan demir ile tanışma, potansiyel özellikleri ve karşılaştırılabilir nitelikte hafif malzeme inşa edilen binaların yüksek mukavemetli olmasının getirdiği avantajlar ile inşaat mühendisleri için yeni bir alan açmıştır. Kubbe yapımında demir ilk defa 1811 yılında Belanger ve Brunet tarafından kullanılmıştır. Aynı yıl Paris'te the Corn Market'in merkezi 38,7 m çapındaki bir demir kubbe ile örtülmüştür. Dökme demir ve ahşap konstrüksiyon ile yapılan eski metotlara uyumun fazla olmasına rağmen, bu yapım sistemi mimarlar ve mühendisler arasında büyük ilgi uyandırmıştır.

İlk demir kubbelerin çoğu, genellikle aşağıda düz yukarıda eğik çubuklardan oluşan yarı kafes kirişlerden meydana gelmektedir. Kubbeler, dairesel duvarlar üzerinde desteklenip ve çevresi boyunca altta çekme halkasına ve tepedeki basınç halkasına bağlanmaktadır. Küçük kubbeler için, merkezi halka ve fener ihmal edilerek kirişler birbirlerine doğrudan bağlanmaktaydı Sonraları, bağlantı halkalarının kapasitesini sık sık yükselten yatay itme kuvvetinin ortaya çıkması ile açıklığı arttırma yoluna gidilmiştir. İtkinin karşılanamadığı çeşitli durumlarda bunun inşaat esnasında yapının çökmesine neden olduğu bilinmektedir. Bu durum birçok mühendisi kuşaklanmış kubbelerle ilgili detaylı analizler yapmaya teşvik etmiştir (Vural 2000).

Uzay sistemin avantajlarını anlayan çeşitli seçkin Alman ve Fransız mühendisler, yapım sisteminin bu formuna büyük ilgi göstermişlerdir ve 18. yüzyılın ikinci yarısında, kuşaklanmış demir kubbelerin çeşitli formlarında ani gelişmeler ortaya çıkmıştır. Bu hareket, Almanya'da üç boyutlu sistemin gelişimini destekleyen bilim adamları Schwedler, Henneberg, Mohr, Ritter, Müller-Breslau, Scharowsky ve Zimmermann'ın yayınlarından etkilenmiştir. Kubbelerde ve tonozlarda yük dağılımı hakkında sistematik çalışmalar ile bilimsel temeller ortaya konulmuş ve grafik ve yarı-grafik analiz metotları gelişmiştir. Uzay sistemlere uygulanan grafik analiz metotları, yüklerin dik koordinat dizgelerine dayalı geometride düşey ve yatay düzlemde gösterilmesi nedeniyle yorucuydu. B. Mayor uzay sistemlerde kuvvetlerin hesaplanmasıyla ilgili zorlukları yok eden ve tüm problemin tek düzlemde analize

indirilmesini sağlayan ilk araştırmacıdır. Mayor' un metodu önce Misses sonra Constant tarafından oldukça basitleştirilmiştir.

Kubbeler için çok sayıda kuşaklama tipi kullanılmaktadır. En eski formlardan biri olan iskelet kubbeler, oldukça esnek olmalarına rağmen halen kullanılmaktadırlar. Kuşaklanmış kubbenin en basit formu, Schwedler tipi olarak tasvir edilmektedir. J.W. Schwedler ilk yapısını, Berlin'de bir gaz tankı olarak inşa etmiştir. 1863 yılından itibaren de dünya üzerinde sayısız Schwedler kubbesi uygulanmıştır. Föppl, Schwedler tarafından geliştirilen gevşek nitelikte olan çapraz elemanlar ile uygulanan 'örgü kafes' kubbelerine karşı, 'ağ örgü' tipi kubbeyi sadece üçgenler ile donatılmış ve katı çapraz elemanlar ile sağlamlaştırılmış olarak kafes kiriş konstrüksiyonunu ileri sürmüştür ( Tekgüvercin 2002 ).

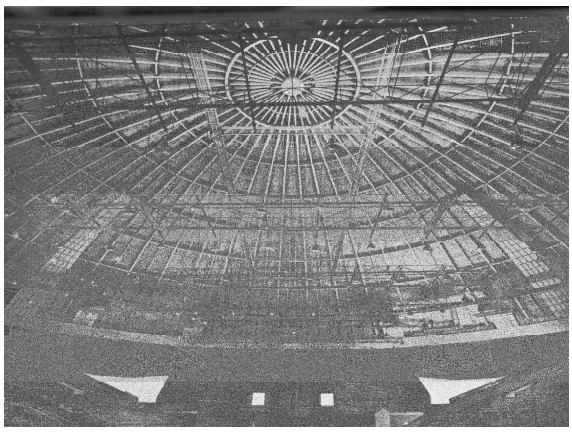
II. Dünya savaşından sonra Amerika'da Kuzey Carolina Charlotta'da Hükümet Binası (the Civic Center), iyi bilinen Schwedler tipi çelik kubbe ile inşa edildi ve kullanılan açıklığı 101 m'dir (Şekil 3.12).

Almanya ile Fransa'daki çok sayıda sergi binası bir zamanlar Avrupa'da çok popüler olan Zimmermann kubbeleri ile örtülmüştür. Daha eski kubbelerden biri olan ve 1894 yılında Lyons Endüstriyel Sergi Salonunun merkezinde yapılan, 110 m gibi büyük bir açıklığa sahip olan yapı üzerinde mafsallı ve tepe halkasında rijit olarak birleştirilmiş 16 parabolik kafes dairesel çubuktan oluşmaktadır. Bu yapı uzun yıllar en büyük kubbe olarak kalmıştır.

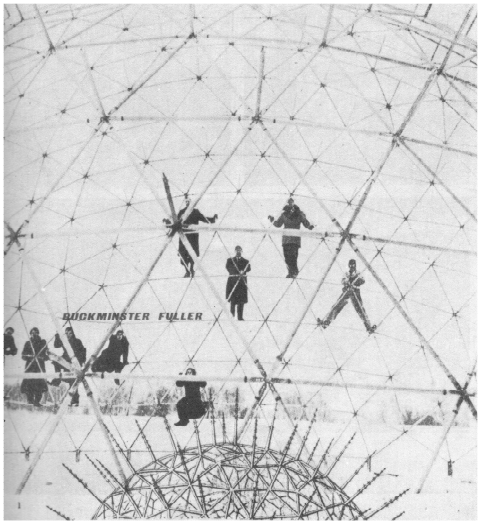
Amerika'da çok sayıda çelik ve ahşap ince tabakalı kubbe inşa edilmiştir. En büyük çift tabakalı çelik kubbe, Texas, Houston'da Spor Salonu (the Harris Country Sports Arena) üzerinde 1963 yılında uygulanmıştır. Kullanılan açıklığı 193 m olan bu kubbe zamanın en büyük kubbesidir.

Geniş açıklıklı kubbelerin gelişimi, uzun yıllardır araştırmalarında jeodezik kubbelerin avantajlarını vurgulayan Buckminister Fuller'in çalışmalarının sonucudur. Fuller'in 1967 yılında gerçekleştirdiği Montreal Dünya Fuarındaki Amerikan Pavyonu'nun açıklığı 80 metredir. Eşit uzunlukta çubuklarla oluşturulan üçgen ve beşgenlerden meydana gelen bu kubbenin yüksekliği 65 metredir. Bu örnekten sonra yüzlerce jeodezik kubbe inşa edilmiştir (Şekil 3.13)

Çeşitli şekillerde uygulanabilir iskelet kubbelerin dışında, iki yönlü ve özellikle üç yönlü ızgara kubbeler oldukça kuvvetli ve asimetrik yüklere karşı dayanıklı olmaları nedeniyle kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Charlotta Hükümet Binası, Kuzey Carolina




Şekil 3.13. B. Fuller'in jeodezik kubbesi

### 3.6. Kubbesel Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Sınıflandırılması

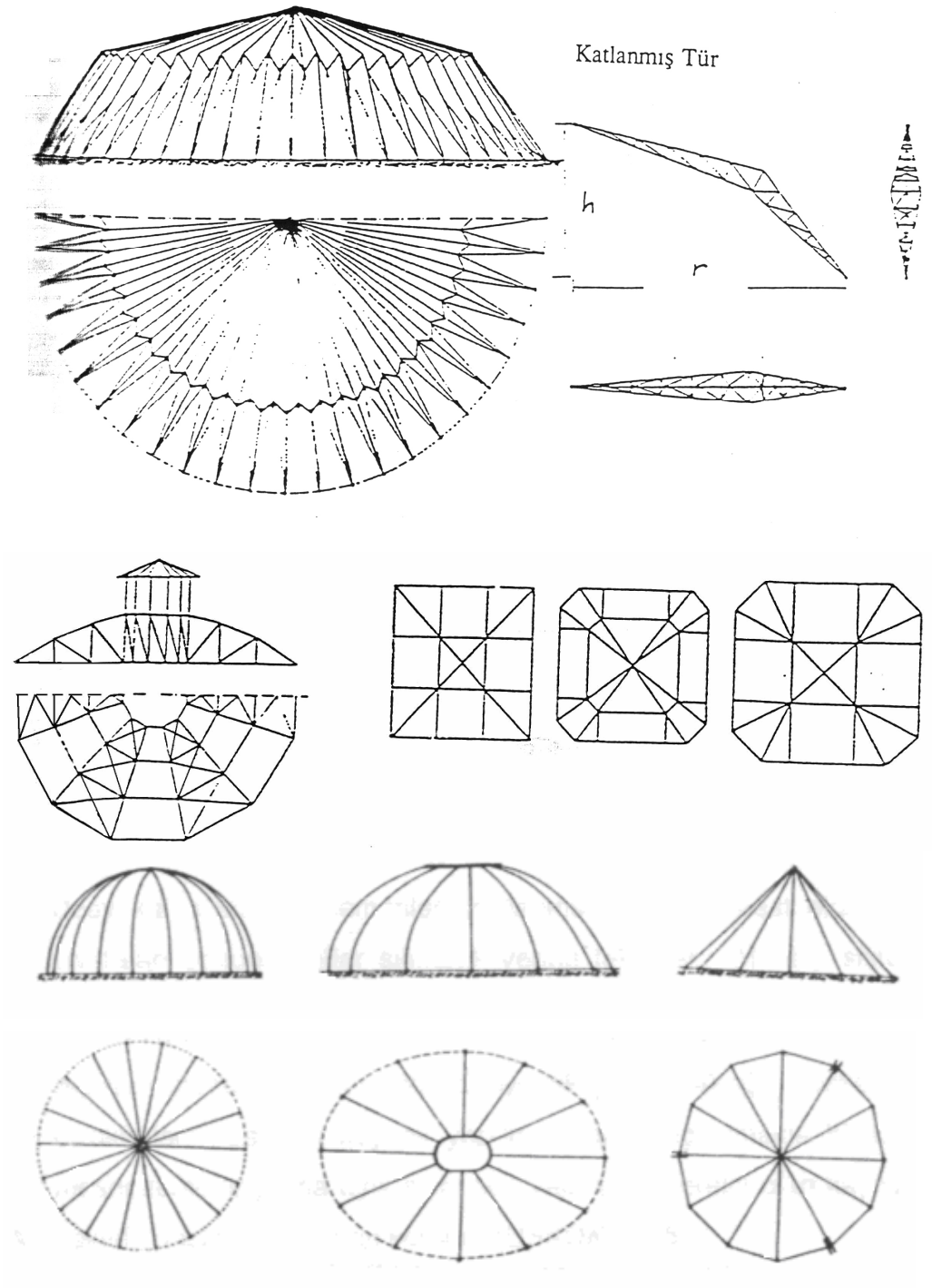
Çelik uzay kubbeler, kubbeyi oluşturan dönel yüzey üzerinde bulunan taşıyıcı parçalardan veya düğüm noktaları bu yüzey üzerinde bulunan düzgün doğrusal elemanlardan meydana gelmektedir. Kuvvetlerin tüm mekana yayılmasına olanak sağlayan kubbesel taşıyıcılar, konstrüktif yapıları yönünden çeşitli gruplara ayrılır.
Son 25 yılda inşa edilmiş kubbesel uzay kafes taşıyıcı sistemler gözden geçirilirse kullanılan sistemler şunlardır:

a-) Radyal nervürlü kubbeler,
b-) Schwedler kubbeler,
c-) Lamella kubbeler,
d-) Jeodezik kubbeler,
e-) Üç doğrultuda ızgara kubbeler,
f-) Schlink kubbeler,
g-) Föppl (ağ, net-work) kubbeler,

#### 3.6.1. Radyal nervürlü kubbeler

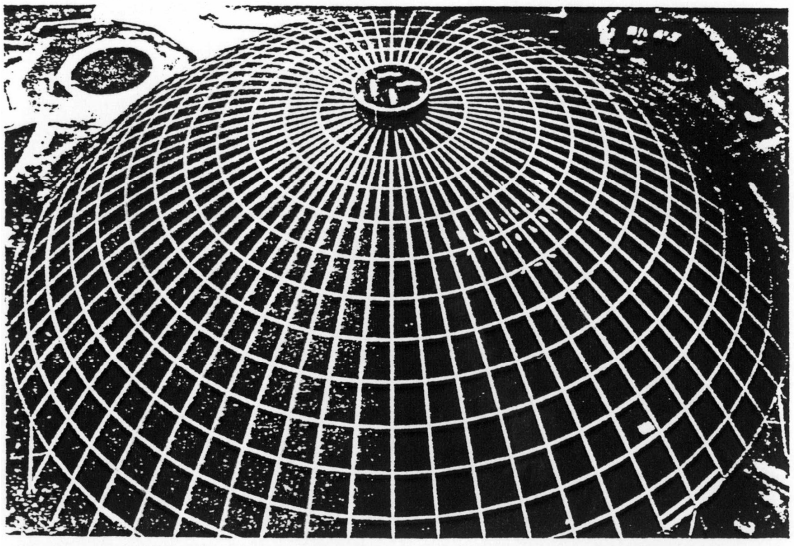
Radyal nervürlü sistemler, planda bakıldığında örümcek ağına benzemektedir. Ortada bir basınç çemberi en altta ise sistemin stabilitesini sağlamak için çekme çemberi bulunmaktadır. Bütün nervürler bu basınç çemberine mesnetlenmektedir. Küçük açıklıklarda nervürler tek bir profille yapılabilinirken, açıklık büyüdükçe eğrisel düzlem kafes sistemler kullanılmaktadır. Nervürler basınç çemberinden ışınsal olarak uzanmaktadır ve kayıcı mesnetlerle sistem izostatik hale getirilebilmektedir. Kayıcı mesnetler daima radyal doğrultuda olmalıdır, böylece ısı genleşmesinden oluşacak iç gerilmelerin önüne geçilmiş olur. Mutlaka dairesel alan örtmesi gerekmez, değişik alanları da (elips, kare, dikdörtgen ve diğer çokgenler)

örtmekte kullanılabilir. Koni, kesik koni, kesik piramit formları elde edilebilir (Şekil 3.14) (Makowski, 1988).




Şekil 3.14. Radyal nervürlü kubbe türleri

Radyal nervürlü kubbenin 61 metre olan bir açıklıkta uygulanmış şekli görülmektedir (Şekil 3.15).

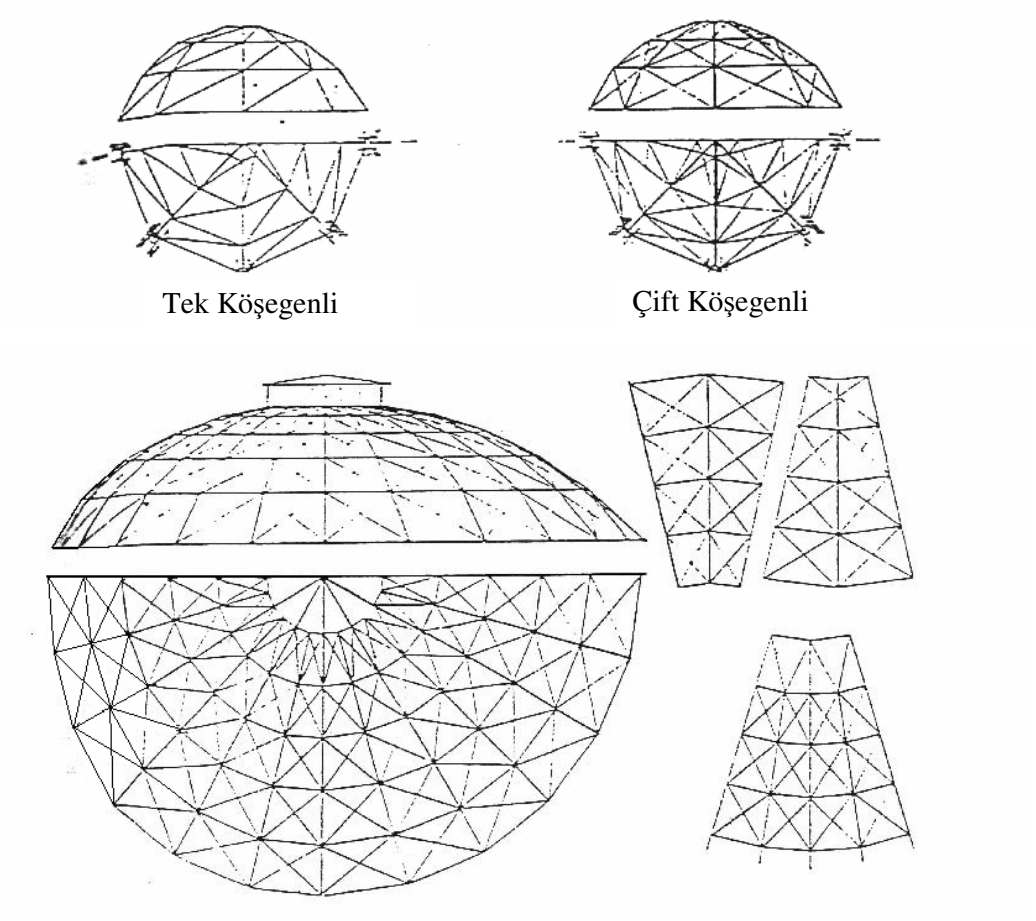


Şekil 3.15. Rodos'daki Rodos Palace Otel'inin üstünü örten net açıklığı 61 m olan radyal nervürlü kubbenin dış görünüşü

### 3.6.2. Schwedler kubbeler

Schwedler kubbeler nervürlü kubbeler sınıfına girerler. Aralarındaki fark radyal nervürlerin radyal nervürlü kubbelerde her biri tek eleman olarak düşünülürken schwedler kubbelerde 3 hatta 4 radyal nervür, kendi aralarında öyle düzenlenirki kubbenin imalatında bu elemanların yan yana getirilmesi ile kubbe inşaatı tamamlanmış olur. Radyal nervürler kubbenin tepesinde basınç çemberine rijit ya da mafsallı olarak, tabanda ise çekme çemberine genellikle mafsallı olarak bağlanırlar. Temele sadece düşey yükün gelmesi istenildiği durumlarda ise tabana konan çekme çemberine radyal nervürler rijit olarak bağlanır. Yapının stabilitesini artırmak için radyal nervürler birbirine yatay kararlılık bağları ile birleştirilir. Yatay kararlılık bağları arasına ise bazen tek bazen de çift köşegen elemanlar konulur. Köşegen elemanların tek veya çift olması durumuna göre de tek köşegenli veya çift köşegenli

schwedler kubbeler olarak adlandırılırlar. Gerek yatay kararlılık bağları gerekse köşegen elemanlar schwedler kubbeleri radyal nervürlü kubbelerden ayıran en önemli farklardır (Şekil 3.16) . (Meek ve Loganathan,1988).

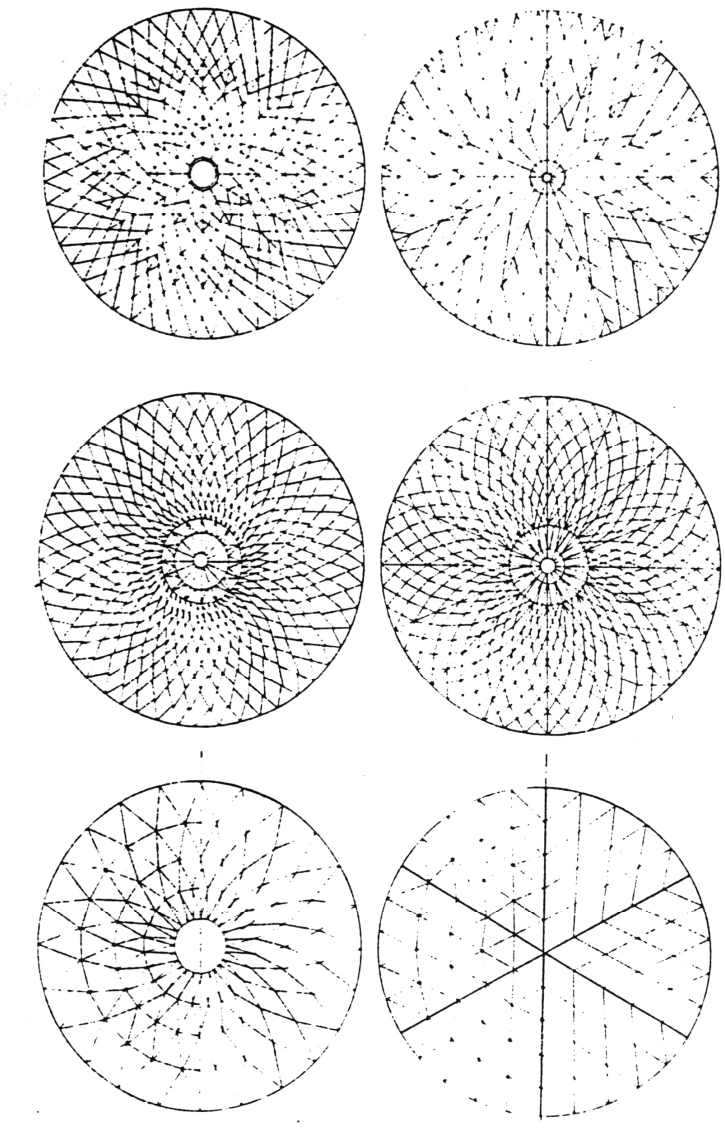



Şekil 3.16. Schwedler kubbelerin plan ve görünüşleri.

### 3.6.3. Lamella kubbeler

Lamella kubbeler, birbirine benzer çok sayıda birimlerden oluşur. Elmas ya da baklava dilimi şeklinde düzenlenmiş bu elemanlar lamella olarak adlandırılır. Her bir lamella birimi baklava dilimi ya da elmasın bir kenarının uzunluğunun iki katı bir

uzunluğa sahiptir. Kubbenin yüzeyindeki stabiliteyi çatı örtüsü veya aşıklar olarak kullanılan baklava dilimi şeklindeki bu elemanlar sağlar. Lamella kubbe tipinde inşa edilen Houston kubbesi 9 hektar alanı örtmektedir (Makowski 1988). Lamella kubbeler Dr. Kiewitl tarafından geliştirilmiş ve büyük açıklıkları geçmek için daha uygun hale getirilmiştir (Şekil 3.17). Japonya' da pek çok firma bu tip kubbelerin prefabrikasyon üretimi ile ilgilenmekte ve ayrıca geliştirmeye çalışmaktadır. 240 km/h hıza sahip rüzgar tesirinde, Miami'deki böyle bir kubbenin hiç hasar görmediği bilinmektedir (Meek ve Loganathan,1988).



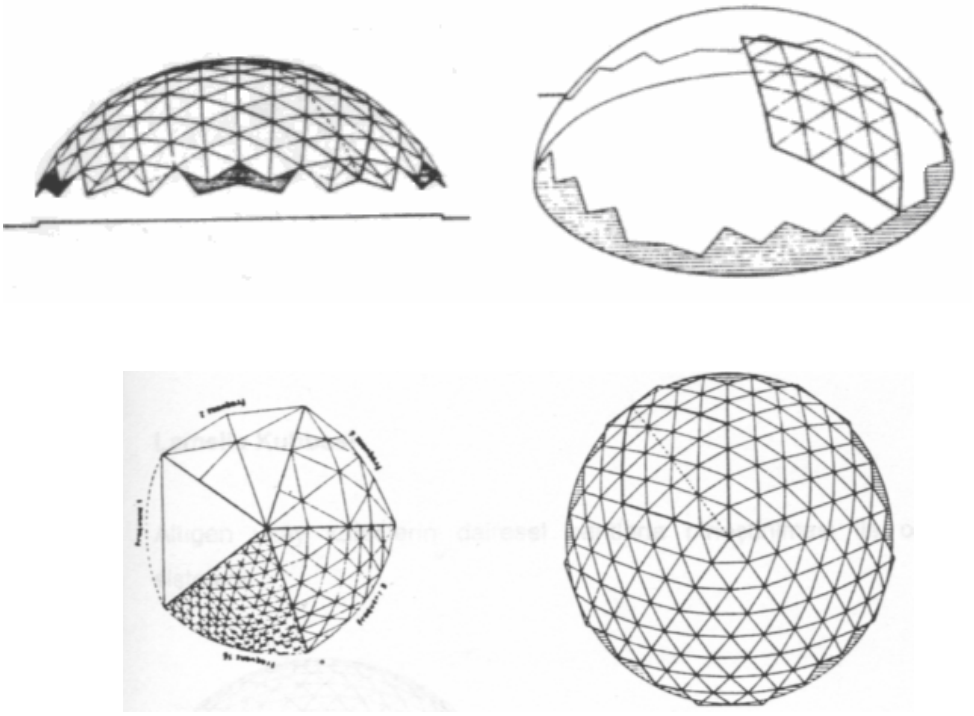
Şekil 3.17. Lamella kubbelerin plan ve görünüşleri

### 3.6.4. Jeodezik kubbeler

Geometrisi küre yüzeyinin jeodezik bölünme ilkelerine dayanılarak belirlenen çubuk ağı kubbelerine jeodezik kubbe denmektedir. Jeodezik kubbeler, yüksek taşıyıcı güçlerine karşın hafiftirler, çabuk ve kolay kurulabilirler, ayrıca düşük maliyete sahiptirler. Jeodezik kubbelerin olumlu yönleri şöyle özetlenebilir: küre, en büyük hacmi en küçük yüzeyle örten, yani belli bir hacim için en az malzeme gerektiren bir geometridir. Küresel yüzeylerin çift eğrilikleri nedeniyle kazandığı biçimsel direnç yüksektir (Türkçü 2003).

1945 yılında Buckminster Fuller tarafından geliştirilerek patenti alınan jeodezik kubbeler hem strüktürel etkinliği, hem de endüstrileşmiş üretime uygunluğu yüzünden 1960'lı yıllardan başlayarak özellikle gösteri değeri yüksek olması istenen büyük ve merkezi mekanların örtülmesinde uygulanan sistemlerin başında yer almıştır.

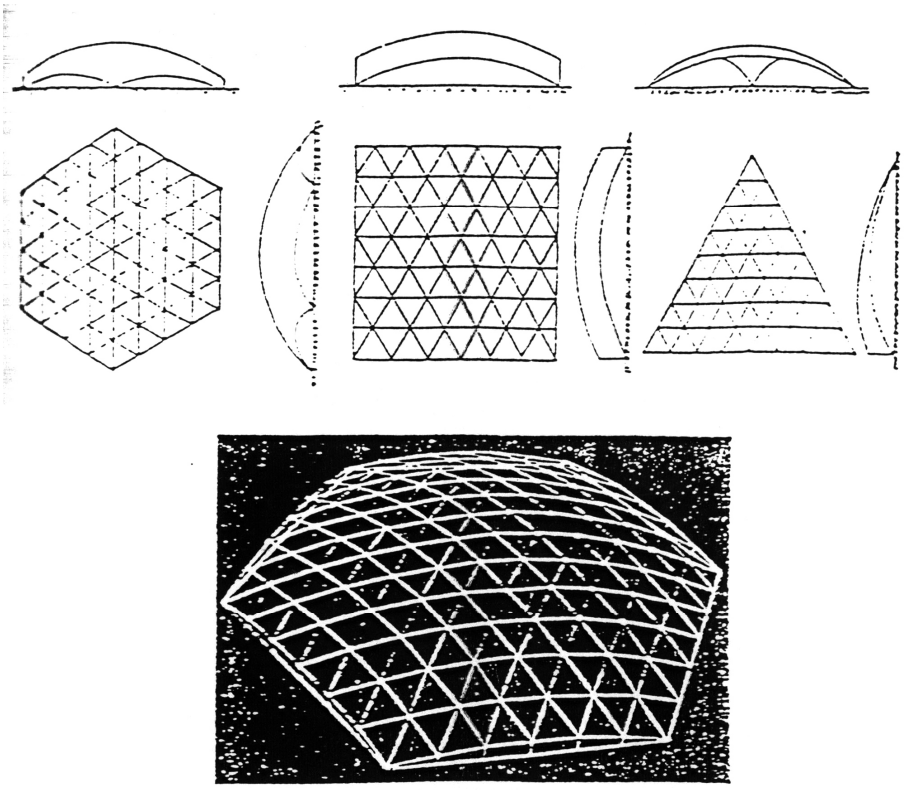
Buckminster Fuller'in geliştirdiği jeodezik kubbeler, küre yüzeyinin altıgenlere bölünmesi suretiyle kurulan tek katlı sistemlerde, mafsallı çubuk birleşmelerinin doğurduğu stabilite güçlüğüne karşı Fuller iki katlı sistemleri gerçekleştirmiştir (Şekil 3.18) (Tekgüvercin 2002).



Şekil 3.18. Jeodezik kubbelerin plan ve görünüşleri

### 3.6.5. Üç doğrultuda ızgara kubbeler

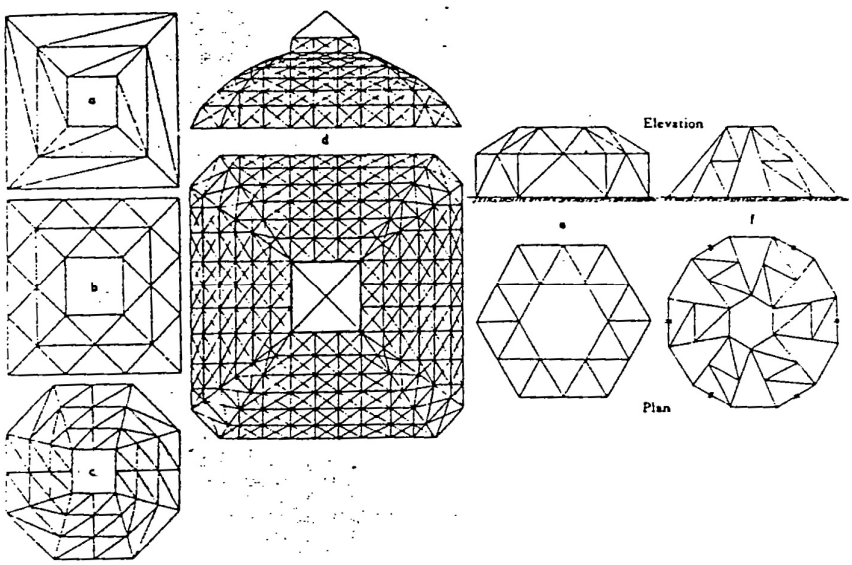
Bugün Avrupa'nın birçok ülkesinde kullanılmakta olan bu tip kubbelere, İngiltere'de 1951 de Britain festivali için yapılan kubbe örnek verilebilir. Üç doğrultuda kubbelerin teorik analizi, simetrik olmayan yüklemeler altında bile malzeme tüketiminde eşit bir dağılım olduğunu göstermiştir (Şekil 3.19). Ayrıca bu tip kubbeler, kare, dikdörtgen daire, üçgen ve altıgen plandaki yapıları örtmek için en uygun olanıdır (Meek ve Loganathan, 1988).



Şekil 3.19. Üç doğrultulu ızgara kubbeler

### 3.6.6. Schlink kubbeler

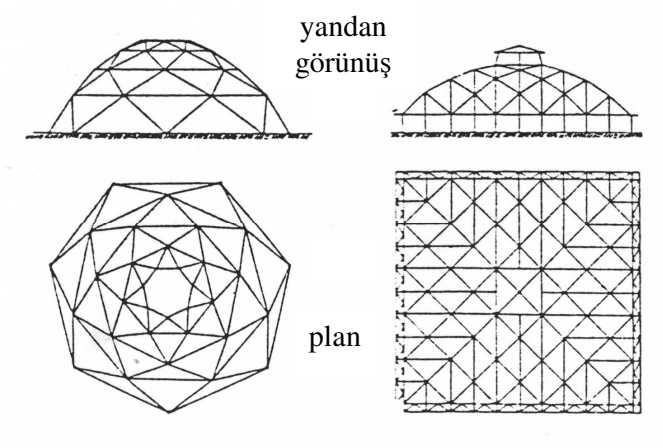
Schlink kubbelerin, özelliği kimi zaman trapez düzlem, kimi zaman ortogonal üçgen düzlemlerle oluşturulmasıdır. En büyük dezavantajı, bütün düğüm noktalarının farklı olmasıdır (Şekil 3.20) (Gökçe 1977).




Şekil 3.20. Schlink kubbelerin plan ve görünüşleri

### 3.6.7. Föppl ( ağ, network ) kubbeler

Föppl kubbeler, çift diyagonalli schwedler kubbelerde boylamların kaldırılmasıyla elde edilmiş sistemdir. Bu tip kubbeler, schwedler kubbeler için kullanılan şekilden çıkartılmıştır. Fakat ondakinin tam aksine, aynı düzlemde üç çubuğa sahiptir. Bu yüzden kubbenin ağ sistemi mafsallı birleşim kabulüne göre bile, aktif olmayan bir çubuğa sahip değildir. Herhangi bir düğüm noktasına gelen yük, sistemin geometrisinden dolayı, bütün elemanlarda gerilmelere sebep olur. Bu kubbelerin çoğu I. Dünya savaşı'ndan önce Almanya'da inşa edilmiştir (Şekil 3.21). Son zamanlarda Almanya'daki Mero firması, hazır boru elemanları ve özel düğüm (Mero düğümü) sistemi kullanarak ağ kubbelerin daha yaygın kullanımını sağlamıştır (Meek ve Loganathan,1988).




Şekil 3.21. Föppl (ağ, network) kubbelerin plan ve görünüşleri

# 4. ÇELİK UZAY KUBBE SİSTEMLERİN HESAP METOTLARI, KULLANILAN BİLGİSAYAR PROGRAMLARI VE BİLEŞENLERİ

## 4.1. Çelik Uzay Kubbelerin Hesap Metotları

Uzay kafes sistemler, düğüm noktaları dolu kürelerden ve bağlantı elemanları borulardan oluşan, üç boyutlu, yüksek dereceden hiperstatik sistemlerdir ve hiçbir basitleştirici kabul yapılmadan bilgisayar yardımı ile çözülebilmektedir. Uzay kafes sistemlerin çözümünde en genel olarak sonlu elemanlar (matris-deplasman) yöntemi kullanılır.

Projenin özelliğine göre statik hesaplarda göz önüne alınabilecek yük kriterleri şunlardır:

- Zati ağırlıklar: Uzay kafes sistem, aşık sistemi, kaplama,
- Hareketli yükler,
- Servis yükleri: Aydınlatma + havalandırma, ısıtma, soğutma,.. vs + temizlik teçhizatı + kedi yolları + asma tavan + tesisat yükleri + noktasal konsantre yükler,
- Kar yükü,
- Rüzgar yükü,
- Deprem yükleri,
- Sıcaklık yükleri,

Statik hesaplar, yükler ve tasarımla ilgili yürürlükteki Türk Standartları veya Uluslararası Standartlara göre yapılır. Tüm yükler sisteme düğüm noktaları vasıtasıyla etkitilecek ve elemanlarda eğilmeye yol açacak bağlantılar ve yükleme koşulları olmayacaktır. Aşıklara ait statik hesaplar ve kesit tayinleri de ilgili standartlara göre yapılarak statik projelere dahil edilmektedir. Tüm statik hesaplarda, yükleme değerleri, kombinasyon büyüklükleri, taşıma kapasiteleri ve tasarım yöntemleri bakımından bir bütünlük olmalıdır.

### 4.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi; sürekli bir sistemi problemin karakterine uygun sonlu elemanlara ayırarak elde edilen elemanlar üzerinde iç ve dış kuvvetlerin enerjisinin minimizasyonu ve sonra bu elemanların birleştirilmesi tarzında bir uygulama getirmektedir. Bunun sonucu olarak mesnet şartları, sisteme ait özellikler dış yüklerin sürekli ya da ani değişimleri kolayca göz önüne alınabilmektedir. Dolayısıyla sonlu elemanlar yöntemi analitik metotlarla çözülemeyen karışık problemlere uygulanabilmektedir. Yüzeysel sistemin tipik bölgelerinde eleman boyutları küçültülerek o bölgenin daha hassas incelenmesi mümkün olmaktadır. Diğer bir avantajı da sınır şartlarının problemin çözüm sırasına göre en son adımda hesaplara dahil edilmesidir. Böylelikle çeşitli sınır şartlarını probleme uygularken baştaki yoğun hesaplara girilmektedir (Köksal 1995).

Sonlu elemanlar metodunun kabuk sistemlere uygulanışına ait çalışmaların bir kısmında, sistem düzlemsel sonlu elemanlara ayrılmaktadır. Bu tip hesaplarda eleman özel eksenlerinin sistem eksenlerine dönüştürülmesinde, sistem rijitlik matrisinin hesabında bazı güçlüklerle karşılaşılmaktadır. Kabuk formuna uygun eğrisel sonlu eleman kullanılması, bu güçlükleri ortadan kaldırmaktadır. Yapının geometrisine bağlı olarak elemanın şekli bir, iki, üç boyutlu olabilir. Eleman sınırları düz veya eğri çizgi olabilir.

Sonlu elemanlar metodunda sistem sonlu sayıda elemana ayrılmaktadır. Eleman boyutları küçüldükçe sonuçlardaki hata oranı azalmakta, fakat çözüm süresi uzamaktadır. Sistemi oluşturan elemanların her birine sonlu eleman denir ve birleştikleri köşe noktaları da düğüm noktaları olarak adlandırılır. Sonlu eleman yüzeyinin şekil değiştirmesi, düğüm noktalarının deplasman parametrelerine bağlı olarak ifade edilebilir. Deplasman parametreleri, deplasman bileşenleri, dönmeler ve burulma gibi deplasman vektörlerini içermektedir. Eğilme hesaplarında düğüm noktalarının deplasman parametrelerinin belirlenmesi, sistemin deplasman yüzeyinin ve her düğüm noktasındaki kesit tesirlerinin bulunması için yeterlidir. Stabilite hesabında ise, bu deplasman parametrelerine göre kurulan denklem takımının

katsayılar determinantını ($\Delta$) sıfır yapan yük, yani kritik yük tayin edilir (Köksal 1995).

## 4.2. Çelik Uzay Kubbelerin Analizinde Kullanılan Bilgisayar Programları

### 4.2.1. Framecad programı

Framecad uzay sistem çelik çatı sistemlerinin oluşturulması, statik çözümü, iş emirlerinin hazırlanması için geliştirilmiş bir dizi programın grafik ortamda birleştirilmesinden oluşturulmuştur.

Sistemin oluşturulması ve sistemle ilgili dizayn verilerinin girilmesi tamamen programın içinden grafik ortamda yapılmaktadır. Program belli tipteki uzay sistemlerin otomatik olarak oluşturulmasına kolaylık sağlamaktadır. Sistem yükleri sistem oluşturulurken verilmekte, program bu yükleri düğümlere otomatik olarak dağıtmaktadır. Sisteme bağlanacak aşıklarla ilgili delikler de otomatik olarak açılabilmektedir. Program aynı anda birden fazla uzay sistemin oluşturulmasına ve edit edilmesine olanak sağlamaktadır. Sistemin istenilen kısımları aynı anda edit edilen bu sistemler arasında taşınabilmektedir.

Üzerinde değişiklik yapılan sistemin geometrik olarak kontrolü yapılabilmektedir. Sistem çözümü ve boyutlandırılması işlemi ardışık iterasyonlarla yapılmaktadır. Sistem çözümü Rijitlik Matrisi yöntemi ile yapılmaktadır. Her iterasyon sonunda program tanımlı uzay sistem elemanları arasında en müsait olanını almakta ve bir sonraki iterasyonu yapmaktadır. Bu işlem iki iterasyon arasında eleman kesitleri değişmeyene kadar tekrarlanabilir.

Sistem çözümü tamamlandığında sistemin iş emirleri hazırlanabilmekte ve montaj paftası AutoCAD formatında çizim dosyası olarak oluşturulmaktadır. Sistem çözümünde kullanılan eleman tipleri kullanıcı tarafından tanımlanabilmektedir. Sistem çözümlerinde bu elemanlardan yine istenilenler program tarafından kullanılabilir.

Program çözüm sonucu bulunan ve sistemde kullanılan elemanlardan, kullanıcı tarafından doldurulan birim fiyat dosyasına bağlı kalarak teklif fiyatları oluşturulabilmektedir. Farklı yüklemelerle yada küçük sistem farklılıkları ile çözülen sistemler karşılaştırılabilmekte ve bu sistemlerin optimumu oluşturulabilmektedir (Altınyaldız 2005).

### 4.2.2. SAP2000 programı

SAP2000, yapıların üç boyutlu nonlineer statik ve dinamik analizi ve dizaynı için yazılmış genel amaçlı bir sonlu eleman programıdır. Program Windows ortamında çalışmakta ve tüm işlemler özel grafik kullanıcı arayüzü yardımı ile SAP2000 ekranı üzerinde gerçekleştirilmektedir.

SAP2000, SAP bilgisayar programı serisi içinde kullanım kolaylığı ve üretim için önemli olan çok güçlü bir grafiksel özellik sunar. Modelin oluşturulması, analizin yapılması, kontrol ve tasarımın optimize edilmesi bu tek özellik aşamasında yapılır. SAP2000 model oluşturmada, modifikasyonda ve analiz ile tasarımın ele alınmasında bir adım ileri gitmiştir. Analitik özellikleri de, aynı şekilde nümerik teknikler ve çözüm algoritmalarındaki son araştırmalar olarak çok güçlüdür.

Herhangi bir yapı sisteminin SAP2000 yardımı ile analiz ve boyutlandırılmasında, genel olarak aşağıdaki yol izlenmektedir:

a-) Sistem modelinin oluşturulması.

b-) Malzeme özelliklerinin tanımlanması.

c-) Kesit özelliklerinin tanımlanması.

d-) Yüklerin tanımlanması.

e-) Çözüm (Analiz).

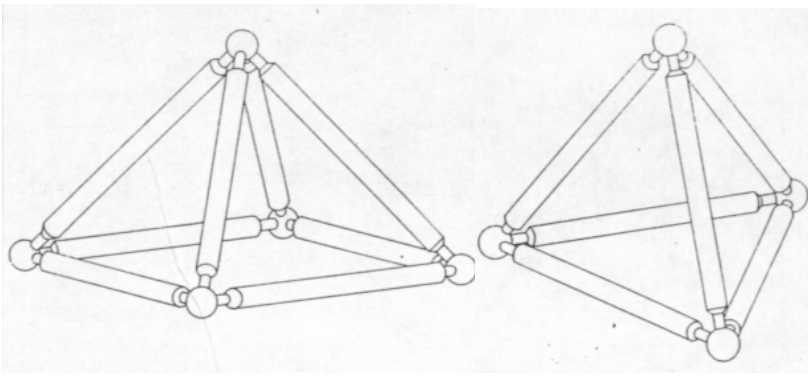
f-) Boyutlandırma

Bazı durumlarda, ele alınan sistemin önce küçük (veya kaba) bir bölümü oluşturulur. Daha sonra SAP2000'in Copy, Paste, Replicate, Mesh Areas gibi olanaklarından yararlanarak sistem tamamlanır.

Bazı özel durumlarda, özellikle sistem geometrisinin tanımlanmasını doğrudan SAP2000 ekranında yapmak pek pratik olmamaktadır. Bu durumda geometriyi AutoCAD ortamında oluşturup DXF kütükleri yardımı ile SAP2000 ortamına aktarmak daha uygun olmaktadır. Özellikle geometrisi pek düzenli olmayan kafes sistemlerde bu yolun uygulanması çok pratik olmaktadır. Bazen de düğüm noktalarının koordinatları belirli bir formülün ardışık olarak uygulanması ile kolayca saptanabilmektedir. Bu durumda da koordinatları elektronik tablo ortamında oluşturduktan sonra SAP2000 ortamına aktarmak pratik olmaktadır (Özmen 2004).

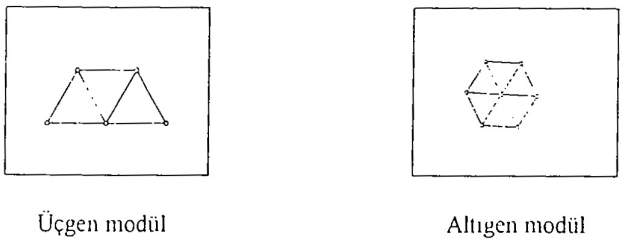
### 4.3. Çelik Uzay Kubbe Sistemleri Oluşturan Bileşenler

Çelik uzay kubbe sistemlerin bileşenleri de uzay kafes bileşenlerinin aynısıdır. Uzay kafes sistemlerin temel ünitesi tetrahedron dur (dörtyüzlüdür) (Şekil 4.1). Böyle bir dörtyüzlü, her biri aynı düzlem içinde bulunmayan üçer çubukla kolaylıkla büyütülebilmektedir. Bir düğüm noktasını diğer üç düğüm noktasına rijit olarak bağlamak için, üç çubuk gerekli ve yeterlidir. Üçgenleme çubuklarıyla bağlanan birbirine paralel iki ağ, genellikle düzlemdirler. Bununla birlikte eğride olabilir ve böylece silindirik örtüler, küresel kubbeler oluşturabilirler. Uzay kafes düzenin küresel kubbelere uyarlanması bu kadar basit değildir ve ağ biçiminde değişiklik gerektirir. Genellikle altıgen bir düzenleme kullanılır (Gündüz 2002).



Şekil 4.1. Uzay kafes sistem tipleri

Çelik uzay kubbe sistemlerde, modüller genellikle iki boyutludur ve üçgen veya altıgen biçime sahiptir. Genellikle altıgen modül kullanılır (Şekil 4.2).




Şekil 4.2. Çelik uzay kubbe sistemlerde kullanılan modül örnekleri

Sistemi oluşturan modül iki boyutlu olduğu için modül ölçüsü; modülün kenar ölçüleridir (Şekil 4.3).

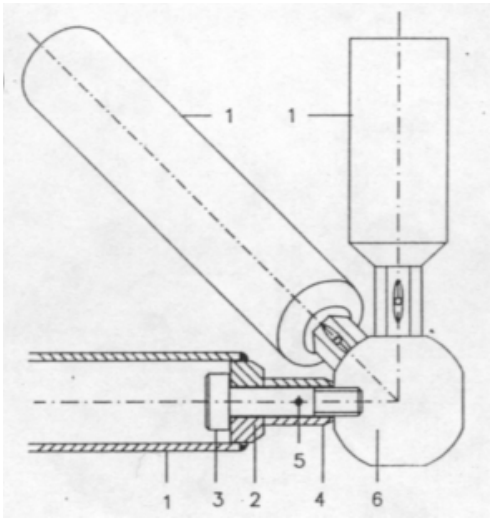



Şekil 4.3. İki boyutlu modüllerde modül ölçüsü

Düğüm noktaları ve bunları birbirine bağlayan çubuklar bir araya gelerek bir yüzey oluşturur. Bu yüzey ya mesnetlere ya da doğrudan zemine bağlanmaktadır.

Uzay kafes sistemleri oluşturan temel öğeler:

- Düğüm noktaları (küreler),
- Çubuklar ve konik parçalar,
- Cıvata, somun ve pimler, olarak sıralanabilmektedir (Şekil 4.4).




1.Boru
2. Konik
3. Cıvata
4. Somun
5. Pim
6. Küre

Şekil 4.4. Uzay kafes sistem düğüm noktası.

### 4.3.1. Düğüm noktaları (Küreler)

Sisteme gelen dış yüklerin ilk etki ettiği öğedir. Düğüm noktası sistemin en önemli elemanıdır. Bunlar montajda kolaylık ve sistemin maliyeti üzerinde büyük etkinliğe sahiptir (Öztorun 1997). Düğüm noktası Çelik uzay kubbe sistemin en zor ve en hassas bölümüdür. Çünkü birçok çubuğu bir noktada birleştirerek sistemin bir bütün olarak çalışmasını sağlamaktadır (Uman 1989).

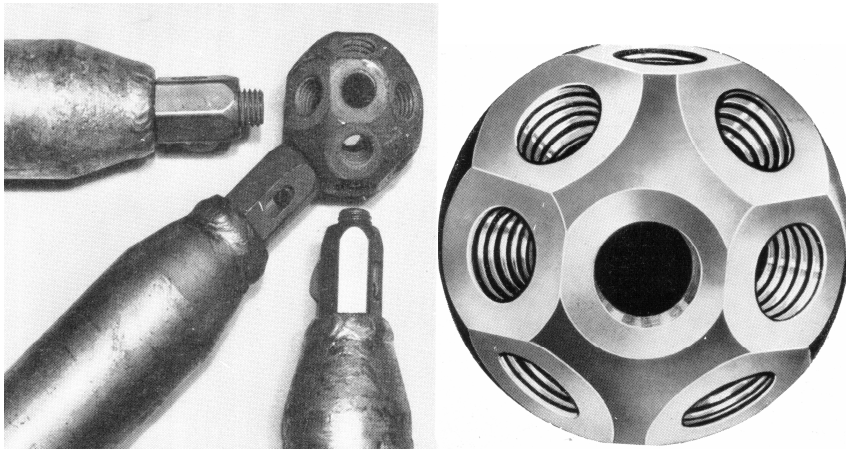
Düğüm noktaları; yani çubukların birleştiği noktalar küre şeklinde elemanlar olup, DIN EN 10025-1/-2/-3 normlarına uygun C45 çeliğinden imal edilmektedir. Sıcak dövme ile şekillendirilir (Şekil 4.5) (Altınyaldız 2005).




Şekil 4.5. Düğüm elemanları ve boyutları

Kürelerin çapları, kullanıldığı yere ve aldığı yüke göre 50 mm ile 380 mm arasında değişir. Küreler üzerinde muhtelif yönlerde teşkil edilmiş düzlemler (yüz düzeltmeleri) ve bu düzlemlerde çeşitli çaplarda açılmış dişli delikler mevcuttur. Dijital açı kontrollü hassas tezgahlar (CNC) ile özel tasarım tezgahlarda delinen kürelerde açılacak delik sayısı ve açıları her proje için ayrı hesaplanır. Kürelerde maksimum 18 adet civata deliği açılıp diş çekilebilir (gerekmediği zaman fazla delik açılmaz). Böylece kürelere boruların vidalanması gerçekleştirilmektedir (Altınyaldız 2005).

Ülkemizde çelik uzay kubbe taşıyıcı sistemi üretip uygulayan firmalar, bilhassa montaj kolaylığı nedeniyle mero tipi sistemleri kullanmaktadır. Mero sistemi kronolojik olarak en eski sistemlerden biridir. Dr. Ing. Max Mengeringenhausen tarafından geliştirilen ve 1942 yılında piyasaya sürülen Mero düğüm noktası ilk seri üretimli yapı bileşenidir (Şekil 4.6).



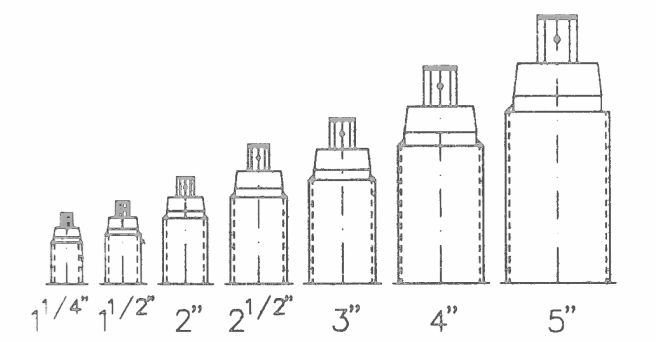
Şekil 4.6. Mero düğüm noktası

### 4.3.2. Çubuklar ve konik parçalar

Bir çelik uzay sistem düzeni kurmak için sabit enkesitli herhangi bir çubuk seçilebilir (Arat 1999). Çubuklar doğru biçiminde öğelerdir. Çubuklar, iki ucunda

konik parçaların kaynaklandığı borulardan ibarettir. Konik parçaların fonksiyonu, çekme ve basınç kuvvetlerini iletmektedir.

Boru ve konikler DIN EN 10025'e uygun, St 37 veya St 52 çeliğinden olabilirler (Şekil 4.7). Konik parçaların borulara kaynaklanmasında "gaz altı kaynak metodu ''kullanılmaktadır (Altınyaldız 2005).




Şekil 4.7. Çubuklar ve konik parçalar

İmalatta kullanılacak boruların DIN EN 10025'e göre çelik kalitelerine bağlı mukavemet değerleri aşağıdadır (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Boruların DIN EN 10025'e göre çelik kalitelerine bağlı mukavemet değerleri.

| **Standart Karşılığı Kaliteler** | | **$R_e$ (min) N/mm$^2$ (kg/mm$^2$)** | **$R_m$ (min) N/mm$^2$ (kg/mm$^2$)** | | **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 |

### 4.3.3.Civata, somun ve pimler

Civatalar, boru uçlarına kaynaklanmış olan konik parçalar vasıtasıyla işlevlerini yerine getirirler. Cıvatalar, kafası konik parçanın içinde, dişli kısmı konik parçanın dışında kalacak şekilde monte edilir ve kendi ekseni etrafında dönebilmektedirler. Cıvatada pimin geçmesi için enlemesine bir delik açılır.

Somun, konik parça ile düğüm noktası elemanı arasında bulunan, içi boş altıgen kesitli bir parçadır. Somunun simetrik iki tarafında, her tarafta birer tane olmak üzere iki pim deliği bulunur. Somun cıvata üzerine geçirildikten sonra iki serbest ucu somun deliklerinde kalacak şekilde pim cıvataya geçirilir. Pimlenmiş somunlar, cıvataların küre deliklerinin içinde döndürülerek vidalanmalarına yardımcı olurlar. Cıvatalar, DIN 13'e uygun ISO dişlidir. DIN 267 şartlarına uygun imal edilmektedir (Altınyaldız 2005).

Cıvata, somun ve pim için kullanılan malzemeler ve bunların mekanik özellikleri Tablo 4.2 'de özetlenmiştir.

Tablo 4.2. Cıvata, somun ve pim için kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

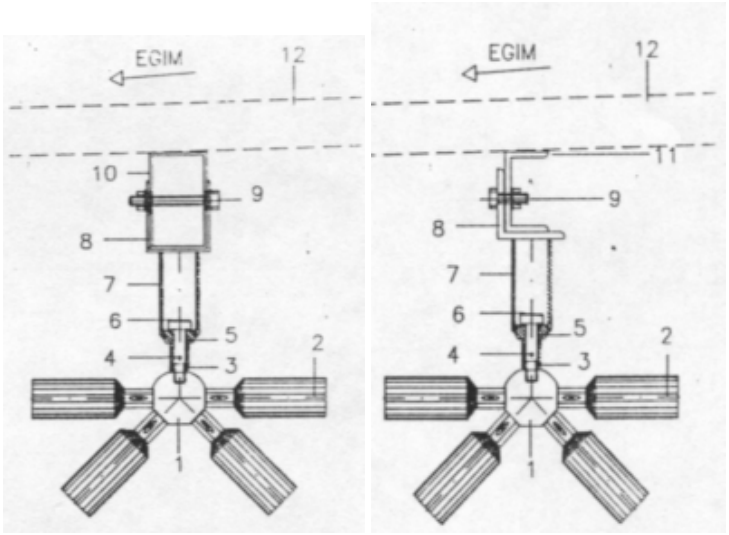
| | **CIVATA** | | | **SOMUN** | **PİM** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **MALZEME SINIFI** | 5,6 | 8,8 | 10,9 | 9S Mn28 veya Ç1020 | 6,8 | 8,8 | 12,9 |
| **MAKS. ÇEKME DAYANIMI kg/mm$^2$** | 30 | 64 | 90 | 32 | 48 | 64 | 90 |
| **MİN. KOPMA DAYANIMI kg/mm$^2$** | 50 | 80 | 100 | 50 | 60 | 80 | 120 |
| **MİN KOPMA UZAMASI %** | 20 | 12 | 9 | 9 | 8 | 10 | 4 |

### 4.3.4. Aşık tutucu elemanlar ve aşıklar

Aşık tutucu elemanlar, çatı eğimini düzenlemek için kullanılırlar. Üst başlık kürelerinde açılan tepe deliklerine bağlanırlar. Bu elemanlar yerine ve gereğine göre

boru, köşebent veya değişken kesitli bir profil olabilir. Boyları çatı eğimine bağlı olarak değişmektedir (Savaşır 1999).

Aşık elemanlar, kullanılacak kaplama cinsine bağlı olarak C, U, Z veya kutu profil şeklinde olabilirler. Kesit boyutları, projede tasarlanan çatı örtüsü yükleri ile kar ve rüzgar etkilerine göre hesaplanarak tespit edilir. Eğimi sağlamak için tek yönde takılan aşıklarla, çatı örtüsünün geçemediği durumlarda aşıklara dik yönde mertekler kullanılır. Merteklerin de kesit boyutları aşıklarda olduğu gibi tespit edilir. Aşık ve merteklerin bağlantısı galvanizli cıvata ve somun kullanılarak yapılmaktadır. Malzeme kalitesi St 37'dir (Şekil 4.8).



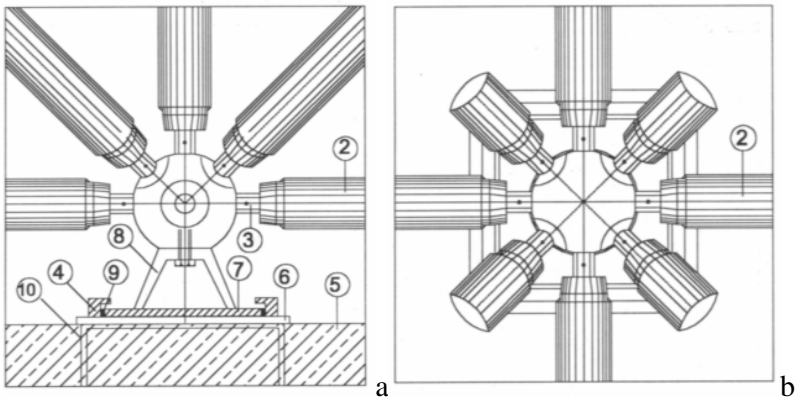

a. Kutu profil aşık b. U profil aşık

1-Küre, 2- Boru, 3- Somun, 4- Pim, 5- Konik, 6- Cıvata, 7- Eğim dikmesi, 8- U Profil, 9- Aşık cıvatası, 10- Kutu profil aşık, 11- U profil aşık, 12- Kaplama.

Şekil 4.8. Aşık tipleri

### 4.3.5. Mesnetler

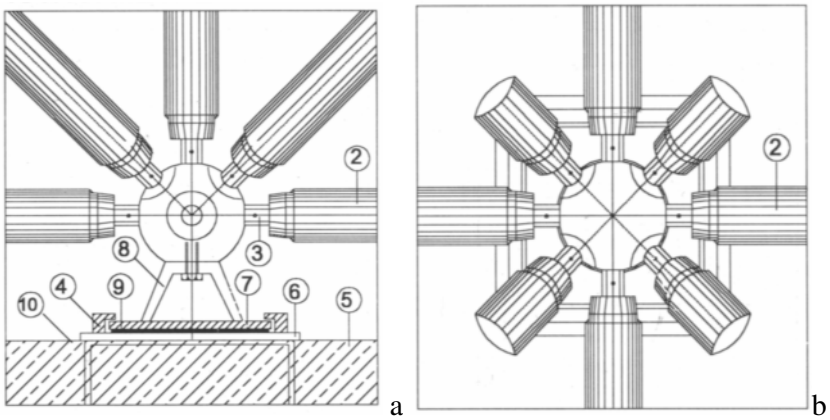
Uzay sistem çelik çatıları ana taşıyıcı sisteme bağlayan elemanlar olup, projesinin ve taşıyıcı sisteminin özelliklerine uygun olarak sabit mesnet, bir doğrultuda hareketli mesnet ve birbirine dik iki doğrultuda hareketli mesnet olmak üzere üç farklı biçimde hesap edilip, imalatı yapılır. Malzeme St 37, St 44 veya St 52 olabilir. Hareketli mesnetlerin hareket yönündeki kayıcılığı teflonlar tarafından sağlanır. Teflonların boyutları, mesnetlere gelen yüklere göre belirlenir (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 ).




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

a. Kesit b. Plan.

Şekil 4.9. Sabit mesnet küresi




a b

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

a. Kesit b. Plan.

Şekil 4.10. Kayıcı mesnet küresi

### 4.3.6. Korozyona karşı koruma

Uzay sistem çubuk elemanları ve somunlarının üzerindeki yağ, pas, tufal ve kirliliklerinin temizlenerek, yüzeylerin koruyucu bir tabaka ile korunarak toz boya öncesinde boya tutunabilirliğinin tam olarak sağlanması için aşağıdaki şekilde uygulama yapılmaktadır:

Boruların galvanizlenerek üzerine toz boya yapılması durumu:

Uzay sistem çubukları ve somunları EN ISO 1461'e uygun olarak sıcak daldırma galvaniz yapılır. Bu galvanizleme işleminden önce;

- Borular 60- 80 $^0$C sıcak alkali yağ alma banyosunda 5-10 dakika süreyle bekletilmektedir.
- Durulama işlemi pH=6-9 arasında olan banyoda en az 2 dakika süreyle bekletilerek yapılmaktadır.
- Borular, 60 $^0$C sıcaklıktaki asit banyosunda yüzeylerindeki pas, tufal vb. temizleninceye ve metal rengi ortaya çıkıncaya kadar bekletilmektedir.

- Asit işlemi sonrası borular pH= 6-9 olan bir banyoda 2 dakika süreyle durulama işlemine alınmaktadır.

Daha sonra bu borular 450-470 $^0$C'de erimiş çinko banyolarına sokulur. Çinko çelik yüzeye iyice nüfuz eder. Demir metali ile kaplama arasında meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucu çinko demir kristalleri oluşur. Çinko banyosundan çıkan elemanlar ayrıca bir tabaka saf çinko ile kaplanırlar.

Galvaniz işleminden gelen borular fabrikada aşağıdaki işlemlere tabi tutulurlar:

- Borular 60-70 $^0$C sıcak alkali yağ alma banyosunda 5-10 dakika süreyle bekletilmektedir.
- Durulama işlemi pH= 6-9 arasında olan banyoda en az 2 dakika süreyle bekletilerek yapılmaktadır.
- Borular pH= 4-5.5 olan banyoda 0.5-2 dakika süreyle pasivasyon işlemine alınmaktadır.

Bu suretle galvanizli borular toz boyaya hazır hale getirilmiş olurlar. Sıcak daldırma galvaniz kalınlığı ve toleransları EN ISO 1461'e göre ayarlanmıştır. Elemanların minimum çinko kalınlığı 80 mikrondur. Somunlar ve ilave aksesuar küçük parçalar sıcak daldırma galvaniz işleminden sonra EN ISO 1461'e uygun minimum kaplama kalınlığını sağlamak için santrifüj işlemine tabi tutulur. Sıcak daldırma galvanizenin ömrü 10-20 yıl arası olup, bu süre, galvaniz üzerine tatbik edilen koruma malzemelerinin tatbiki ile, önemli ölçüde uzatılabilir. Ancak aşık, kolon, mesnet v.s. gibi parçalarda sıcak daldırma galvanizleme ve toz fırın boya uygulamaları mümkün olmayabilir. Böyle durumlarda püskürtme sprey galvaniz ve uygun yaş boya tatbik edilir.

Çubuk elemanları yüksek nitelikli polyester toz boya ile boyanmaktadır. Boyama işlemi sırasında, karboksil ihtiva eden polyester tozu, ilave katkı maddesi konmadan, elektrostatik bir alan içinde borulara veya somunlara püskürtülür. Bu toz boya, 200 $^0$C'lik fırında uygun süre bekletmek suretiyle pişirilerek sertleştirilir. Bu işlem sonunda bütün yüzeyleri tamamen kaplayan düzgün, parlak ve 80 mikron kalınlığında bir film tabakası oluşur. Bu boya renkleri uluslararası RAL kataloğundan seçilir. Bütün renkler uygulanabilir. Çeşitli tonlarda mat, yarı parlak ve tam parlak yüzeyli tonlar sağlanabilir.

Boruların her iki başında ve yan taraflarında orijinal cıvata atma ve boru içini temizleme delikleri olması sebebiyle, sıcak daldırma galvaniz yapılmayan imalatlarda bütün boruların iç yüzeyleri korozyona dayanıklı ve yüksek mukavemetli fırın astar boya ile boyanmaktadır. Elektrostatik toz boya, darbelere dayanıklı olduğundan alışılmış yaş boyalara veya şantiyede yapılan boyalara göre çok daha uzun ömürlüdür. Bu boya -35 $^{0}$C ile +280 $^{0}$C arasında ısılara dayanıklı olup, ultraviyole ışınlarına karşı da mukavemetlidir. Aşınmaya karşı çok dayanıklıdır. Üzerinde kabarcıklar, pütürler ve lekeler oluşmaz. Toz boya yapılamayan parçalar, işveren ile karşılıklı mutabakat sağlanarak yaş boya ile de boyanabilir. Bunlar, kuru film kalınlığı 30-40 mikron olacak şekilde bir veya birkaç kat olarak tatbik edilebilir. Cıvatalar, 10 mikron elektro galvaniz kaplamadır. Küreler, 10 mikron elektro galvaniz kaplama üzerine, isteğe bağlı olarak elektrostatik toz boya ile boyanabilir. Somunlar, 50 mikron sıcak daldırma galvaniz kaplama üzerine, isteğe bağlı olarak elektrostatik toz boya ile boyanabilir (Şekil 4.11) (Altınyaldız 2005).



Şekil 4.11. Toz boya kabini

### 4.3.7. Montaj

Uzay sistem çelik elemanların montajı aşağıdaki üç yöntemden biri kullanılarak yapılmaktadır.

a) Sistemin montajı, yapıya yakın ve yerde yapıldıktan sonra kaldırma kapasitesi hesaplanarak bulunan vinç/vinçler yardımı ile yukarıya kaldırılarak yerine konulması ve gerekli bağlantıların yapılması.

b) Sistemin montajının kurulacağı yükseklikte havada yapılması.

c) Her iki yöntemin birlikte kullanılması.

Montaj, yeterli sayıda montaj elemanları tarafından, tüm çubuk ve kürelerin yer aldığı bir montaj paftasında gösterildiği şekilde yapılır. Çubuklar düğüm noktalarına cıvatalar zorlanmayacak ve diş kaptırılmayacak şekilde takılmaktadır. Cıvatalar, düğüm noktası elemanlarına, mevcut somun yardımıyla boşluk bırakılmayacak şekilde vidalanmaktadır (Altınyaldız 2005).

# 5. OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

## 5.1. Optimizasyon

Optimizasyon bir şeyin daha iyisini gerçekleştirme sürecidir. Bir mühendis veya bilim adamı yeni bir fikir ortaya koyar. Optimizasyon bu fikrin geliştirilmesine yardımcı olur (Pierre 1992).

Optimizasyon; fikirleri ilerletmek için ortaya atılan bilgileri kullanarak, başlangıç kavramlarını (parametrelerini) değiştirmektir. Eğer fikri etkileyen parametreler elektronik formata dönüştürülürse bilgisayar mükemmel bir optimizasyon aracı olur. Bir takım bilgiler bilgisayara girilir ve bir çözüm elde edilir. Elde edilen bu çözümün değerlendirilmesi optimizasyon aracılığıyla gerçekleştirilir.

Bir problemin birden fazla çözümü varsa, en iyi çözümü bulmak gerekir. Aslında ‘‘en iyi’’tanımlaması izafi kavramdır. Optimal çözüm, problemi formulize eden kişiye bağlıdır. Eğitim, fikirler, ideolojiler ve sosyal durumlar ‘‘en iyi’’tanımlamasında etkili olan faktörlerdir. Bazı problemlerin tam cevabı bulunurken, bazıları optimal noktalar olarak bilinen, değişik minimum ve maksimum noktalarına sahiptir. İşte burada ‘‘en iyi’’izafi olabilir.

Yerkürede yaşayan insanoğlunun hayatı, optimizasyon problemleri ve çözümleri ile doludur. Bununla ilgili birkaç örnek verilebilir. Hem işe zamanında gitmek,hem de uyku miktarını artırmak için ne zaman kalkılmalıdır,işe giderken en iyi yol neresidir, bir projeyi yürütürken ilk olarak nereden başlanmalıdır, bir şeyin uzunluğunu kısaltmak , ağırlığını azaltmak, bir ürünün cazibesini artırmak ve maliyetini düşürmek optimizasyon tekniğinin ilgi alanı içerisindedir (Pierre 1992).

## 5.2. Optimizasyonun Zaman İçinde Gelişimi

Genel anlamda, optimizasyonun insanlık tarihi ile birlikte doğduğu ve karar vermede güçlü bir araç olarak kullanıldığı yapılan araştırmalar sonunda ortaya çıkmıştır. Nitekim insanoğlunun, günümüzde olduğu kadar, geçmişte de çalıştırdığı karar mekanizmasının altında, belirleme amacı en uygun (optimum) şartlarda elde etme ve bu amaca ulaştıran yollar içinden en iyisini seçme eğiliminin varlığı görülmektedir.

Optimizasyon, matematiksel bir temele oturtulduğu 17.yüzyıla kadar, sezgi ve tecrübeye dayandırılarak problemlerin çözümlerine uygulanılmıştır.

Eski çağlarda savunma amacıyla yapılan kalelerin, genellikle alan/çevre oranı maksimum olan daire şekline benzetilmesi, en az malzeme ve işçilik sarfiyatı ile en geniş bir alanı savunabilme kaygısının sonucu olmuştur.

Rönesans yıllarında, Avrupa'daki bilim adamlarının ilgisini çeken en önemli optimizasyon problemlerinden biri Latincede brachistochron adı verilen en kısa zaman eğrisinin bulunması idi. Söz konusu problemde, konumları farklı iki nokta arasında, en kısa süre içine sürtünmesiz olarak kayan bir cismin, oturduğu yüzeyin profil eğrisinin bulunması isteniyordu. Ünlü Galile şeklin dairesel bir eğri olabileceğini ileri sürmüştür. Ancak problem 1694 yılında Bernoulli kardeşler tarafından enerjinin korunumu prensibinden faydalanarak matematiksel olarak çözülmüş ve şeklin bir sikloid eğrisi olduğu ispatlanmıştır.

Optimizasyon, daha sonraki yıllarda Gauss tarafından geliştirilen ve en küçük kareler metodu adı verilen, deneysel verilere eğri uydurma tekniğinde kullanılmıştır. Regrasyon analizi adı verilen söz konusu eğri uydurma tekniğinde, model eğrisinin katsayıları, deney sonucu bulunan noktaların sapma miktarlarının karelerinin toplamı minimum olacak şekilde tayin edilir.

17.yüzyılda, matematiksel analizin Newton ve Leipnitz tarafından kurulması, optimizasyon teorisi ile ilgili bilimsel çalışmaların yapılmasına neden olmuştur. Söz konusu gelişimi takip eden yıllarda, optimizasyon problemleri; genellikle farklı değişkenlerle tanımlanan bir amaç fonksiyonu (gaye fonksiyonu, maliyet fonksiyonu) ile sınırlayıcı şartları belirleyen eşitlik ve eşitsizliklerle ifade edilerek

çözülmeye başlanmıştır. Ancak analitik optimizasyon metotları teorik yapısından gelen bir takım güçlükler nedeniyle, son derece sınırlı bir uygulama alanı bulmuştur.

II. Dünya Savaşının sonlarına doğru, son derece modern ve hızlı bilgisayarların geliştirilerek yaygınlaşması, optimizasyon problemlerinin sayısal metotlarla çözülebilmesi amacıyla geniş kapsamlı çalışmaların sürdürülmesine neden olur. Sayısal hesap metotları ile uygulamaya oldukça önemli kolaylıklar getirilmiştir. Yapılacak işlemler için sarf edilen zamanın kısaltılmasında ise bilgisayarların önemli bir yeri olmuştur (Akgün 1984).

## 5.3. Optimum Tasarım Problemleri

Burada sistemlerin minimum ağırlıklı olarak projelendirilmesi hedef olarak alınmaktadır. Bu hedef doğrultusunda projelendirilen sistemlerin ise, etkiyen yükler altındaki davranışının kabul edilebilir sınırlar içinde kalması gerekmektedir. Etkiyen yükleri ilgili yönetmeliklerde öngörülen emniyetle taşıyacak şekilde ağırlığı minimum olan sistemin belirlenmesi, optimum tasarım problemini oluşturmaktadır (Saka 1988).

Optimizasyon genel anlamda ‘‘en iyi’’ çözümü bulma tekniği olarak tanımlanabilir. Optimizasyonda en iyinin tanımı problemin niteliğine göre değişir (Keleşoğlu 2002).

Mesela, betonarme yapılar için en iyi çözüm, maliyetin minimum olmasıdır. Uçak yapımında en iyi çözüm zati ağırlığın minimum olmasıdır. Ticari bir işletmede ise en iyi çözüm net karın ya da kar/masraf oranının maksimum olmasıdır. Çelik yapı sistemlerin optimizasyon işleminde en iyi çözüm yapı ağırlığının minimum olmasıdır. Buna bağlı olarak da maliyetinin de minimizasyonunu ifade eder (Akgün 1984).

## 5.4. Optimum Tasarım Teknikleri

Tasarım bir optimum çözüm elde edebilme işlemidir ve optimum çözümü elde edebilmek için çeşitli kriterler bulunabilir. Örneğin bir sistem için tipik kriterler, en düşük maliyet, en az ağırlık, en kısa inşa süresi, en düşük işçilik olabilir. Eğer herhangi bir kriteri matematiksel olarak ifade etme olanağı varsa, optimum tasarım tekniklerinden yararlanabilir.

Genel olarak yapı mühendisliği tasarımında kullanılan optimum tasarım teknikleri üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar matematik programlama, parametrik optimizasyon ve höristik arama yöntemleridir.

### 5.4.1. Matematik programlama

Matematiksel olarak optimizasyon problemi, değişkenlere bağlı olarak değer alan amaç fonksiyonun belli sınırlayıcılar kullanılarak minimum değerinin aranması olarak tanımlanmaktadır. Sınırlayıcılar, problemde değişkenlere bağlı olarak hesaplanan bir takım fonksiyonlar olup, ulaşılan optimum çözümün geçerli olabilmesi için bu fonksiyonların aldığı değerlerin de belli sınırlar içerisinde kalması istenmektedir. Optimizasyon problemi basit olarak, W amaç $x_i$ boyutlandırmada hesaba alınan değişkenleri, göstermek üzere,

$$\min W = f(x_i) \qquad i=1,2,\ldots\ldots n \qquad (5.1)$$

bağıntısıyla ifade edilebilmektedir.

Sınırlayıcılar ise,

$$h_j (x_i) = 0 \qquad j=1,2,\ldots\ldots...,p$$
$$g_k (x_i) \leq 0 \qquad k=1,2,\ldots\ldots...,r \qquad (5.2)$$
$$s_l (x_i) \geq 0 \qquad l=1,2,\ldots\ldots...,t$$

Yapısal optimizasyon da değişkenler yapı sistemini tanımlayan büyüklerdir. Bunlar, çubuk kesit özellikleri, düğüm noktaları yer değiştirmeleri veya düğüm noktaları koordinatları olabilmektedir ( Aydın 2000 ).

### 5.4.2. Parametrik optimizasyon

Parametrik optimizasyon, bir ya da birden çok parametre (faktör) kontrollü bir şekilde değiştirilerek, yapılan bu değişikliklerin elde edilmesi amaçlanan (ağırlık, maliyet inşa süresi gibi) sonuç üzerindeki etkilerin değerlendirilmesi için en iyi çözümün bulunmasıdır.

### 5.4.3. Höristik arama

Höristikler, herhangi bir problemi çözmek için geliştirilmiş mantıksal yaklaşımlardır. Bunlar kesin matematiksel ifadeler yerine, sadece problemin doğru sonuca gitmesini gerektirecek bir mantıksal yaklaşım içermektedirler. Bu nedenle elde edilecek sonuçların en iyi çözüm olacağı garanti edilememektedir.

Höristikler bilgisayarları insanlar gibi düşünmeye çalıştıran yöntemler olarak da değerlendirilebilmektedirler. Örneğin, bilgisayarda, satranç oyununda oyunu kazanmaya yönelik, matematiksel formulasyonlara dayalı bir algoritma geliştirilmesi imkansızdır. Ancak tahtanın merkez karelerini kontrol ederek oynama kuralını hedef alan bir höristik rahatlıkla kurulabilmektedir. Böyle bir höristik kurulduğu takdirde galibiyeti kesin olarak getirmeyecek olsa bile kazanma ihtimalini artıracaktır.

Bugün höristikler bilgisayar oyunlarından, ticari yazılımlara ve bilimsel araştırmalara kadar pek çok alanda kullanılmaktadırlar. Optimum tasarım problemlerinin çözümünde de höristikler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Höristiklerin bu denli yaygın hale gelmesinde özellikle bilgisayarların hızlı gelişmesinin önemli rolü bulunmaktadır. Zira höristikler matematiksel programlara oranla daha sade ifadeler içermesine karşın aynı işlemin çok fazla tekrarlanmasına dayanmakta ve çözüme ulaşmak için daha uzun süre gerektirmektedirler.

Höristik arama kendi içinde, yapay sinir ağları ve genetik algoritma olarak iki gruba ayrılmaktadır.

#### 5.4.3.1. Yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları, giriş ve çıkış veri kümelerini kullanarak sistem davranışını öğrenebilen esnek bir matematik modelleme yöntemidir. Yapay sinir ağları herhangi bir problem hakkında girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi (doğrusal olsun veya olmasın) mevcut örneklerden genelleme yaparak daha önce hiç görülmemiş veya uygulanmamış olan örneklere kabul edilebilir çözümler üretir. Öğrenme yeteneği kolayca farklı problemlere uyarlanabilirliği, genelleme yapabilmesi, daha az bilgi gerektirmesi, paralel yapılarından dolayı hızlı çalışabilme yeteneği ve kolay bir şekilde uygulanabilmesi gibi pek çok avantajından dolayı yapay sinir ağları mühendisliğin pek çok alanında farklı problemlerin çözümünde kullanılmaktadır.

#### 5.4.3.2. Genetik algoritmalar

Genetik algoritmanın özü en iyinin hayatta kalması ve adaptasyonu esasına dayanmaktadır. Genetik algoritma, her ne kadar belirli kriterler sayesinde en iyiyi bulmaya yönlendirilmiş bir arama yöntemi ise de, en iyi çözümü bulması garanti olmamaktadır. Fakat yapılan çalışmalar genetik algoritmalar ile yapılan optimizasyon çalışmalarının çoğunda ulaşılan sonuçların, uygulanabilirlik açısından, diğer optimizasyon teknikleriyle elde edilenlerden daha kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Yapı optimizasyonun da genetik algoritmanın uygulanmasının avantajı, ayrık tasarım değişkenlerini kullanması, sınırlayıcılar için açık bir format kullanması ve birden çok yük kombinezonunun uygulanmasına izin vermesi olarak sayılabilir. Ayrıca genetik algoritma ile bir araştırma yapmak için konu hakkında çok detaylı bilgi sahibi olunması ve çok hassas bağıntıların kurulması gerekmemektedir ( Aydın 2000 ).

# 6. KUBBE SİSTEMLERİN AĞIRLIKÇA PARAMETRİK OPTİMUM DİZAYNI

## 6.1. Kubbe Sistemlerin Optimum Dizaynı

Çelik uzay kubbe sistemlerinin boyutlandırılmasının (dizaynının) amacı, sisteme etkiyecek yükleri güvenle aktaracak ve kendisinden beklenen görevi yerine getirecek optimum çözümü elde etmektir.

Kullanım amaçlarını, dayanıklılık ve ekonomik olma özelliklerini sağlayan çözümler arasında en uygun olanına optimum çözüm denir (Turan 1999). Optimizasyon problemi genel olarak mühendisliğin her alanında, projelendirmenin her aşamasında karar verme işlemi olarak yer alır (Turan 1999). Çünkü sistemin dizaynı yapılarak, sonra çubuk kesitlerini yapıya etkiyen dış yükleri emniyetle taşıyacak şekilde boyutlandırılmaktadır. Bu işlem ardışık yapı analizleri ile yapılır. Seçilen kesitlerle önce yapı analiz edilir, daha sonra şartnamede belirlenen gerilme ve deplasman sınırları kontrol edilir. Bu sınırların sağlanmaması durumunda seçilen kesitler değiştirilerek analiz tekrarlanır.

Genel olarak belli bir alanı en az giderle örtebilen, en sağlam, en dayanıklı, çabuk ve basit, seri üretime uygun bir çelik uzay kubbe sistemi en optimal çözüm kabul edilebilir.

Bu araştırmalardaki asıl amaç en az gereç kullanarak en hafif ve en ekonomik sistemle olanakların elverdiği ölçüde büyük açıklıkları geçebilecek en iyi sistemi bulmaktır.

## 6.2. Çalışmada Kullanılan Optimum Tasarım Yöntemi

Optimum tasarım teknikleri bölüm 5.3 de özetlenerek verilmiştir. Bu çalışmada bu tekniklerden biri olan parametrik optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde ön ve yöntemsel bir bilgi gerektirmeden mevcut paket programlarla

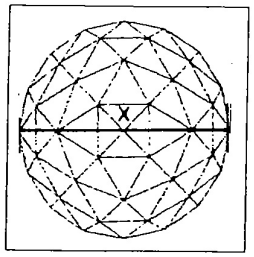
çözülebilen bir yöntem olduğu için parametrik optimizasyon yöntemi tercih edilmiştir.

Bu çalışmada altmış dört adet tek ve çift katlı çember, elips ve parabol kubbe sistemlerde açıklık ve yükseklik gibi iki parametre değiştirilerek, bu parametrelerin çözümünde ise optimizasyon kriteri olarak minimum ağırlık kriteri seçilmiştir. Yani en az malzeme kullanılarak, projelendirilmesi hedef olarak alınmaktadır. Böylece, etkiyen yükleri ilgili yönetmeliklerde öngörülen emniyetle taşıyacak şekilde ağırlığı minimum olan sistemin belirlenmesi optimum tasarımı oluşturmaktadır. Bu çalışmadaki amaç ağırlığın minimum olduğu tek ve çift katlı kubbe sistemlerin belirlenmesidir.

### 6.3. Seçilen Kubbe Sistemler

Kubbeler, çift eğrilikli sistemlerdir. Bu sistemler en az malzemenin kullanıldığı en rijit sistemlerdir. Çünkü elemanlar yükleri doğrudan karşılar.

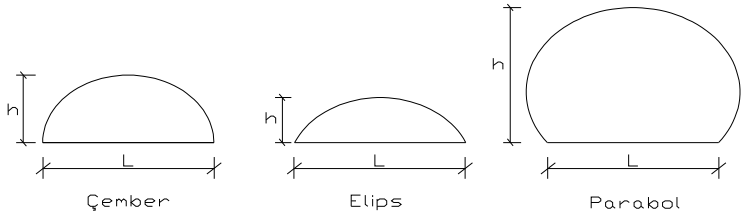
Çelik uzay kubbe sistemlerde sistemin geometrik şekli genellikle çember yayı şeklindedir. Sistemin geometrik şeklinin de açıklık ve yükseklik yanında sistem ağırlığına etkisi olup olmadığını araştırmak için parabol ve elips yayı üzerinde de çalışılmıştır. Bu sistemlerde kubbenin çapı örtülen açıklık olarak alınmıştır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Kubbesel uzay kafes sistemlerde örtülen açıklık

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde açıklığın ilk değeri otuz metre çapla başlayıp onar onar artırılarak kırk, elli, altmış, yetmiş, seksen, doksan ve yüz metrelik açıklıklar ve değişik yükseklikler de AutoCAD programı kullanılarak modellenmiştir.

Şekil 6.2'de çember, elips ve parabol geometrilerinden oluşan çelik uzay kubbe sistemler gösterilmiştir.




Şekil 6.2. Geometrisi açısından çelik uzay kubbe sistemler

Tablo 6.1 ve Tablo 6.2 de tek ve çift katlı kubbe sistemlerde dikkate alınan açıklıklar ve yükseklikler verilmiştir.

Tablo 6.1. Tek katlı kubbe sistemlerde alınan açıklıklar ve yükseklikler

| **Açıklık** (L) (m) | **Çember** **Yükseklik** (h) (m) | **Elips** **Yükseklik** (h) (m) | | **Parabol** **Yükseklik** (h) (m) | |
|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 15 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| 40 | 20 | | | | |
| 50 | 25 | | | | |
| 60 | 30 | | | | |
| 70 | 35 | | | | |
| 80 | 40 | | | | |
| 90 | 45 | | | | |
| 100 | 50 | | | | |

Tablo 6.2. Çift katlı kubbe sistemlerde alınan açıklıklar ve yükseklikler

| **Açıklık** (L) (m) | **Çember** **Yükseklik** (h) (m) | **Elips** **Yükseklik** (h) (m) | **Parabol** **Yükseklik** (h) (m) |
|---|---|---|---|
| 30 | 15 | 10 | 30 |
| 40 | 20 | | |
| 50 | 25 | | |
| 60 | 30 | | |
| 70 | 35 | | |
| 80 | 40 | | |
| 90 | 45 | | |
| 100 | 50 | | |

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde üç farklı kesit geometrisi için verilen bu açıklık ve yükseklik değerleri uygulanmıştır. Bu sistemlerin alanlarının hesabı da Tablo 6.3 verilmiştir.

Tablo 6.3. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin örttükleri alanlar

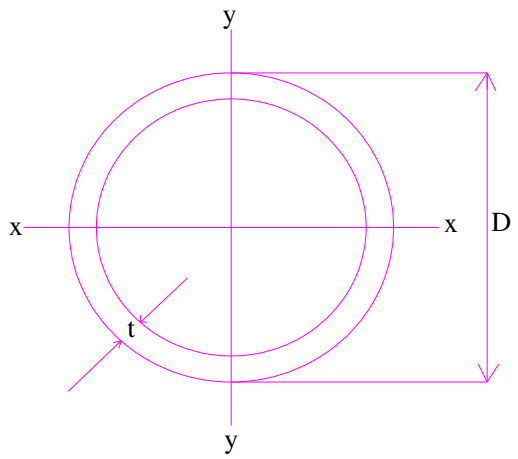
| **Çember, Elips, Parabol** | |
|---|---|
| **Açıklık** (m) | **Alan** ($m^2$) |
| 30 | 706,5 |
| 40 | 1256 |
| 50 | 1962,5 |
| 60 | 2826 |
| 70 | 3846,5 |
| 80 | 5024 |
| 90 | 6358,5 |
| 100 | 7850 |

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde seçilen kubbe tipi lamella kubbedir. Lamella kubbelerin en önemli özelliği yangın, deprem ve rüzgar yükleri etkisinde iyi bir yapısal davranış göstermesidir.

### 6.3.1. Malzeme özellikleri

Amacı, dış yükleri minimum ağırlıkla taşıyacak standart boruları seçmek olduğundan, optimizasyona girecek çubukların ağırlıkları küçükten büyüğe artacak şekilde sıralanmıştır.

Çubuklar TS301/3/DIN 2440, TS301- 4/DIN 2441, TS416/DIN 1626, EN 10219 standartlarına uygun olarak imal edilmiş borulardan seçilmiştir. Sistemde kullanılan boru profillerin malzemesi ST 37'dir. Kullanılacak çubuk kesitleri Tablo 6.5 de verilmiştir. Şekil 6.3 de çubuk kesiti üzerinde çubuğun çapı ve kalınlığı gösterilmiştir.




Şekil 6.3 Çubuk kesiti

Hem bir kıyaslama olanağı vermek hem de en yaygın yapı çelikleri için ülkemizde halen geçerli olan değerleri toplu halde sunmak üzere, DIN normları ile TS standardında verilen emniyet gerilmeleri aşağıdaki Tablo 6.4 de verilmiştir.

Tablo 6.4. DIN normları ile TS standardında verilen emniyet gerilmeleri

| **Çelik Türü** | **$\sigma_a$** | **TS 648'e göre** | | | | **DIN 18800'e göre** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **$\sigma_{çem}$** | | **$\tau_{em}$** | | **$\sigma_{çem}$** | | **$\sigma_{bem}$** | | **$\tau_{em}$** | |
| | | **H** | **HZ** | **H** | **HZ** | **H** | **HZ** | **H** | **HZ** | **H** | **HZ** |
| St 37 | 2400 | 1440 | 1656 | 831 | 956 | 1600 | 1800 | 1400 | 1600 | 900 | 1050 |
| St 52 | 3600 | 2160 | 2484 | 1247 | 1434 | 2400 | 2700 | 2100 | 2400 | 1350 | 1550 |

Tablo 6.4'te yer alan değerler ($kg/cm^2$) cinsindendir.

Tablo 6.5. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde kullanılan çubuklar

| **KESİT NO** | **DIŞ ÇAP** (D mm) | **ET KALINLIĞI** (t mm) | **KESİT ALANI** ($cm^2$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 26,9 | 2,65 | 2,02 |
| 2 | 33,7 | 3,25 | 3,11 |
| 3 | 42,4 | 3,25 | 4,00 |
| 4 | 48,3 | 3,25 | 4,60 |
| 5 | 60,3 | 3,65 | 6,50 |
| 6 | 76,1 | 3,65 | 8,31 |
| 7 | 88,9 | 4,05 | 10,80 |
| 8 | 114,3 | 4,50 | 15,52 |
| 9 | 114,3 | 5,40 | 18,47 |
| 10 | 139,7 | 4,85 | 20,55 |
| 11 | 139,7 | 5,40 | 22,78 |
| 12 | 165,1 | 4,85 | 24,42 |
| 13 | 165,1 | 5,40 | 27,09 |
| 14 | 219 | 4,50 | 30,30 |
| 15 | 219 | 5,00 | 33,60 |
| 16 | 219 | 6,30 | 42,08 |
| 17 | 219 | 7,10 | 47,24 |
| 18 | 219 | 8,00 | 53,00 |
| 19 | 219 | 8,80 | 58,09 |
| 20 | 273 | 8,00 | 66,57 |
| 21 | 273 | 8,80 | 73,00 |
| 22 | 273 | 10,00 | 82,58 |
| 23 | 323,9 | 8,80 | 87,07 |
| 24 | 323,9 | 10,00 | 98,56 |

### 6.3.2. Yük analizi ve yükleme kombinasyonları

Hesaplarda göz önüne alınan başlıca yük tipleri;

- Zati ağırlık
- Kaplama aşık ağırlığı
- Servis yükü
- Kar yükü
- Rüzgar yükü
- Deprem yükü
- Sıcaklık

olup, yük tipleri hesaplanırken Konya şartları göz önüne alınmıştır.

- Zati ağırlık uzay kafes sistem ağırlığı olup hesaplarda 20 kg/$m^2$ alınmıştır.
- Kaplama ve aşık ağırlığı 20 kg/$m^2$ alınmıştır.
- Servis yükü 30 kg/$m^2$ alınmıştır.
- Kar yükü

Konya için kar yükü bölgesi TS 498'e göre, ek1 listesinden II bölgedir. Konya'nın rakımı 1026 m 'dir. Konya II. bölgede ve rakımı 1026m olduğu için çizelge 11'e göre kar yükü değeri 105 kg/$m^2$'dir. Konya'nın rakımı 1026m>1000m den büyük olduğu için 1500m'ye kadar %10 artırılır. Buna göre de kar yükü değeri 115 kg/$m^2$ alınmıştır.

- Rüzgar yükü

Rüzgar basınç ve emme değerleri TS 498 çizelge 12'den ''yüksekliğe bağlı olarak rüzgar hızı ve emme'' tablosundan sistem yüksekliği 12 m alındığı için rüzgar yükü 80 kg/$m^2$ alınmıştır.

- Deprem yükü

$$A(T) = A_0 \, I \, S(T) \qquad (6.1)$$

Etkin yer ivme katsayısı ($A_o$) ve bina önem katsayısı (I) için A.B.Y.Y.H.yönetmelikten aşağıdaki değerler alınmıştır.

$A_0 = 0{,}10$ (Konya $4^0$ Dep böl.) (A.B.Y.Y.H.Y. Tablo 6.2. )

$I = 1{,}2$ (A.B.Y.Y.H.Y. Tablo 6.3. )

$$T = C_t \, (H_N)^{3/4} \qquad (6.2)$$

$C_t$ değeri A.B.Y.Y.H.Y göre taşıyıcı sistemi sadece betonarme çerçevelerden veya dışmerkez çaprazlı çelik perdelerden oluşan binalarda 0.07 alınacaktır.

$C_t$=0,07, $H_N$ =12m T = 0,44sn dir.

Zemin Tipi Z3 alınmıştır.

Spektrum katsayısı S(T), yerel zemin koşullarına ve bina doğal periyodu T'ye bağlı olarak zemin sınıfı Z3 seçildiği için $T_A$ = 0,15sn ve $T_B$ = 0,60sn 'dir. T= 0,44 sn bulunduğu için T değeri $T_A$ ile $T_B$ arasında kaldığı için spektrum katsayısı S(T) = 2,5 dur.

Değerler 6.1 formulünde yerine konularak A(T) = 0,30 olarak bulunmuştur.

Deprem yükü

$V_t = W\ A(T)\ /R \geq 0{,}10\ A_0\ I\ W$ (6.3)

$$W = \sum_{i=1}^{N} \omega i = gi + nqi \quad (6.4)$$

n, hareketli yük katsayısı kar yükünün %30'u sabit yük olarak alınmıştır.

G, değeri olarak zati ağırlık uzay kafes sistem ağırlığı, servis yükü ve kaplama aşık ağırlığı alınmıştır.

P, değeri olarak kar yükü alınmıştır.

W = 20 + 20 + 30 + 0,30 115 = 104,5 kg/m2

$V_t$ = 104,5 0,30 / 4 ≥ 0,10 0,10 1,2 104,5

$V_t$ = 7,84 kg/m2 ≥ 1,25 kg/m2

- Sıcaklık etkisi $\mp 25\ ^oC$ alınmıştır.

Tüm düşey ve yatay yükler yüzey alanlarına (kabuklara) uygulanarak buradan da çubuklara aktarılır. Sıcaklık etkisi de çubuklara uygulanmıştır.

Sisteme uygulanan yük kombinezonları ;

1. Zati + Aşık kaplama + Kar
2. Zati + Aşık kaplama + Kar + Servis
3. Zati + Aşık kaplama + Kar + Servis + SolRuz. –SagRuz. –ÖnRuz. – ArkaRuz.
4. Zati + Aşık kaplama + Kar +Servis - SolRuz. + SagRuz. – ÖnRuz. – ArkaRuz.
5. Zati + Aşık kaplama + Kar +Servis - SolRuz. - SagRuz. + ÖnRuz. – ArkaRuz.

6. Zati + Aşık kaplama + Kar +Servis - SolRuz. - SagRuz. - ÖnRuz. + ArkaRuz.
7. Zati + Aşık kaplama + Kar + Servis + XDep
8. Zati + Aşık kaplama + Kar + Servis - XDep
9. Zati + Aşık kaplama + Kar + Servis + YDep
10. Zati + Aşık kaplama + Kar + Servis - YDep
11. Zati + Aşık kaplama + Kar + Servis + Sıcaklık
12. Zati + Aşık kaplama + Kar + Servis - Sıcaklık

Burada, zati, servis, sıcaklık, deprem ve aşık kaplama 1,0 ,rüzgar için TS 498 'e uygun olarak basınç için 0,8, emme için -0,4, katsayıları kullanılmıştır.

### 6.4. Statik Analizler Ve Sonuçlar

Toplam 64 adet birbirinden farklı tek ve çift katlı kubbe sistem Autocad programı kullanılarak modellenmiştir. Modellenen bu sistemlerin SAP2000 genel amaçlı sonlu elemanlar programıyla analizleri ve boyutlandırılması yapılmıştır. Sisteme gelen yükler yüzey alanlarına (kabuklara) uygulanarak çubuklara aktarılır. Statik hesaplarda aynı plan ve yük altında zati, aşık kaplama, kar, servis, sıcaklık, rüzgar ve deprem yükleri uygulanmıştır.

Statik hesaplarda yükler ve tasarımla ilgili yürürlükteki Türk Standartları veya uluslararası standartlara göre yapılmıştır. Statik hesaplar, ilgili standartlarda öngörülen yöntemler ile sisteme etkiyen yükler ve bunların bir arada bulunma koşullarını tarifleyen yükleme kombinasyonları kullanılarak yapılır. Yapılan analizler ile her boruya gelen basınç ve çekme eksenel yükleri bulunur, dizayn ile de çubuk kesitleri bulunur.

Tek katlı kubbe sistemlerde tek tip çubuk kesiti seçilmiştir. Çift katlı kubbe sistemlerde de üst için ayrı, alt için ayrı ve diyagonal için ayrı tip çubuk kesiti seçilmiştir.

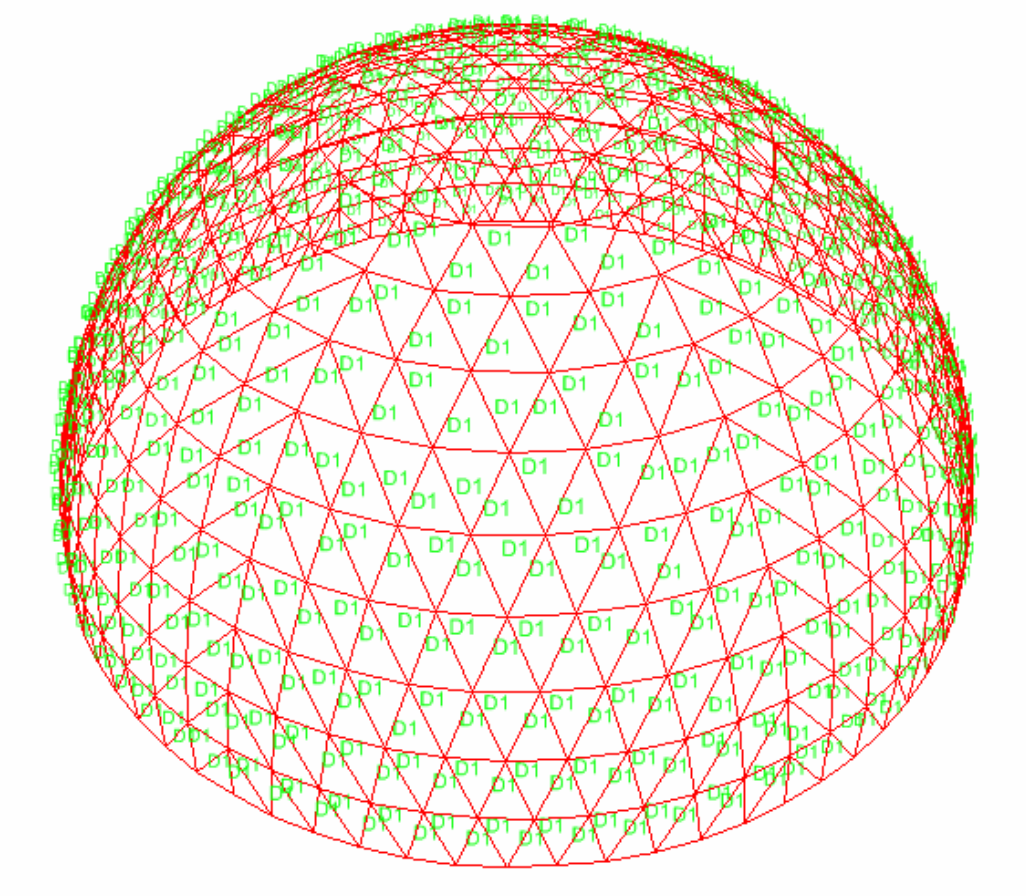
Tek katlı kubbe sistemlerde 469 adet düğüm noktası ve 1332 adet çelik çubuk bulunmaktadır. Çift katlı olanlarda ise 938 adet düğüm noktası ve 4062 adet çelik

çubuk bulunmaktadır. Çelik çubuk sayılarının ve düğüm noktalarının değişmemesine karşın, her sistemdeki çubukların uzunlukları değişmiştir.

### 6.4.1. Tek katlı kubbe sistemlerin analizi ve boyutlandırılması

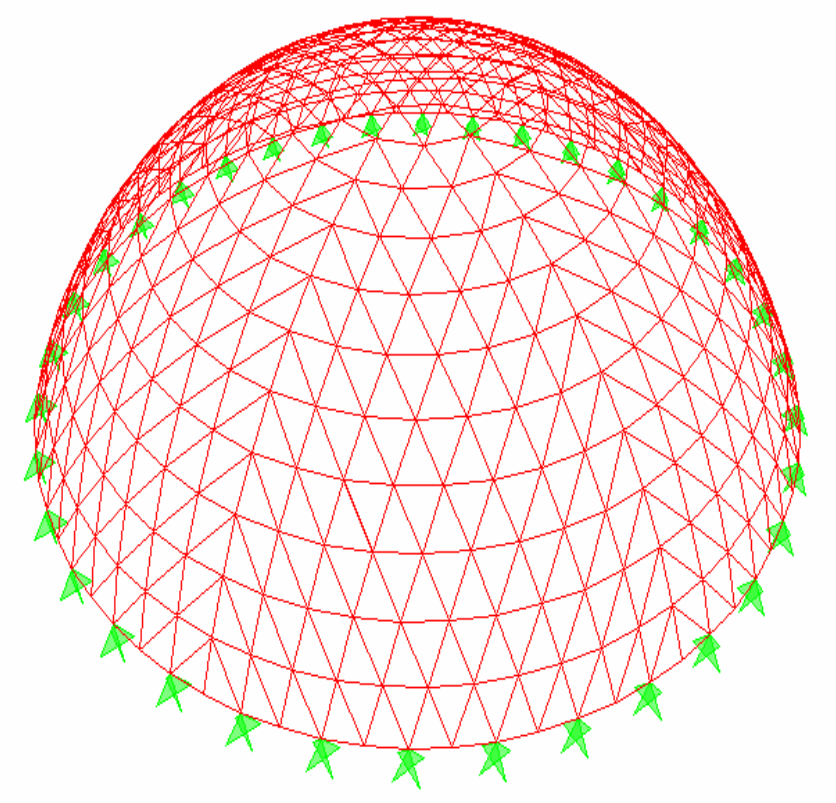
Bu bölümde, açıklığı 30 m olan ve yüksekliği 10 m olan tek katlı elips kubbe sistemi SAP2000 programı ile çözülerek işlem basamakları verilmiştir.

- AutoCAD ortamında tüm tek katlı kubbelerin sistem çubukları çizilir ve DXF dosyası olarak kaydedilir.
- DXF çizim dosyası SAP2000 programına aktarılır.
- Üç boyutlu görünüm ekrana getirilerek sistem geometrisi kontrol edilir.
- Materials bölümündeki listeden steel seçilerek St 37 çeliğinin malzeme özellikleri atanmış olur.
- Alan elemanın tanımlanması için, define area section seçilir. Material ismi D1 verilerek Draw Quad Area element ( kabuk eleman ) basılarak kabuk eleman oluşturulur (Şekil 6.4).
- Kesit özelliklerinin tanımlanması için Define menüsünden Frame/Cable Sections komutuna girilir. Ekrana gelen Frame Properties ileti kutusunun Choose Property Type For Add bölümündeki birinci açılır liste kutusundan Import Pipe seçeneği seçilir ve Add new property düğmesine basılır. TS ve DIN standartlarına uygun olarak 6.3 kısmında verilen yirmidört adet boru kesit oluşturulur.
- Çubukların hepsi seçilir. Assign menüsünden Assign to grup girilerek, Add new group'a hepsi diye isim verilir. Çubuklar için yapılan işlem kabuk elemanlar içinde yapılır.
- Çubukların hepsi seçilir. Sonra Assign menüsünden Frame/Cable sections dan boru kesit seçilir.

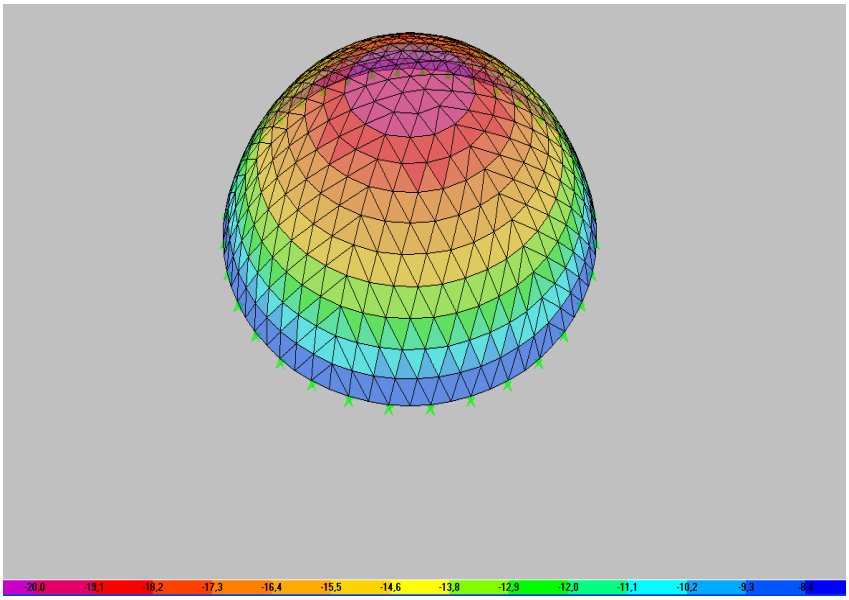


Şekil 6.4. Tek katlı kubbe sistemde kabuk elemanların gösterimi

- Define menüsünden Load Case girilerek define loads' de Zati, Servis, Kar, Sıcaklık, R-Sol, R-Sağ, R-Ön, R-Arka, XDeprem, ve YDeprem girilir.
- Düğümler seçilerek Assign menüsünden joint Restraints ileti kutusunun Fast Restraints bölümünde sabit mesnet tanımlaması yapılır (Şekil 6.5).
- Select menüsünden groups dan bütün kabuk elemanlar seçilir.
- Assign menüsünden Area Loads dan Area, Uniform Loads, Load Case Name: Zati, units: kgf,m,c, Coord System global, Direction Z'projected ve Load da yük değeri girilir. Aynı şekilde Servis, Kar, SolRüz., SağRüz., ÖnRüz., ArkaRüz., XDeprem, ve YDeprem de girilir (Şekil 6.6). Şekil 6.6 da sisteme 20 kg/m$^2$ zati yük uygulandı. Program bu yükün sistemin hangi alanına ne kadar etki ettirdiğini göstermektedir.

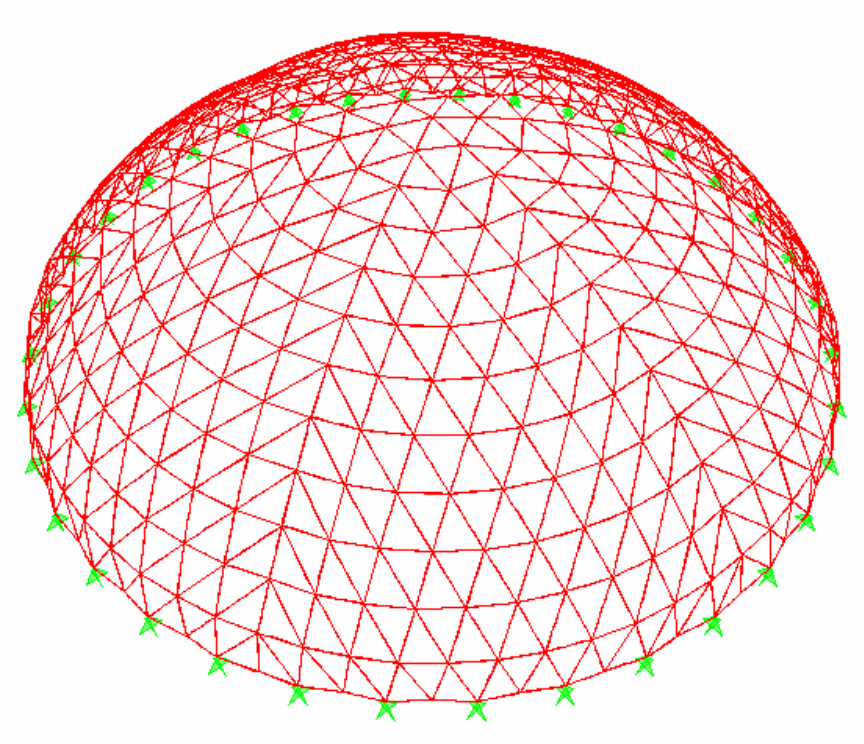


Şekil 6. 5. Sabit mesnetlerin atanması.

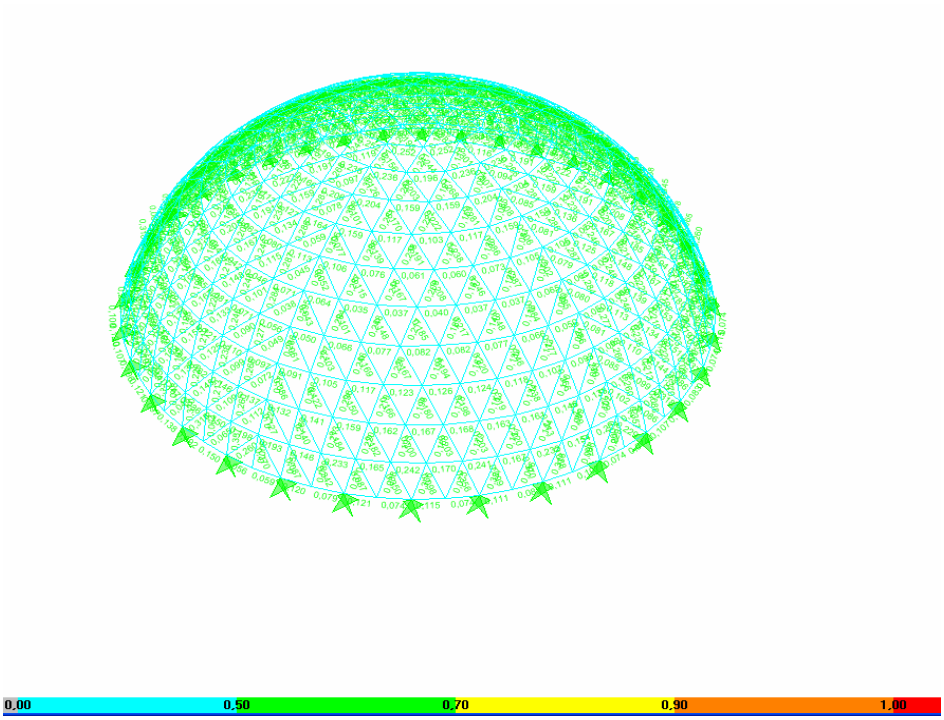



Şekil 6.6. Zati yükün kubbe üzerinde dağılımı

- Select menüsünden groups' dan hepsi seçilir, bütün çubuklar seçilmiş olur.
- Assign menüsünden Frame Cable Loads dan Temperature, Temperatureden de ,Frame Temperature Loadıng, Load Case Name: Sıcaklık ve By Element Temperature sıcaklık değeri girilir.
- Define menüsünden Combinations de Define Response Combinations dan Add New Combo seçilir. Comb 1 den başlayarak comb 12 ye kadar oniki tane kombinasyon oluşturulur. Bu oniki tane oluşturulan yük kombinasyonları bölüm 6.4 başlığı altında verilmiştir.
- Select menüsünden groups' dan hepsi seçilir, bütün çubuklar seçilmiş olur. Assign menüsünden Frame/Cable den Releases/Partial Fixity seçeneğine tıklanır. Ekrana gelen Assign Frame Releases ileti kutusunda Moment 22 (Minor) ve Minor 33 (Major) satırlarındaki start ve end kutucukları seçilir.
- Run Analysis düğmesine basılır ve ekrana gelen ileti kutusunda Run Now düğmesine basılır.
- Analiz tamamlandığında ekrana gelen ve analiz adımlarını gösteren ileti kutusunda uyarı veya hata mesajları bulunmadığını gördükten sonra ileti kutusu kapatılır. Ekranda sistemin şekil değiştirmiş durumu görülür (Şekil 6.7).
- Boyutlama için Options, Preferences den Steel Frame Design den Framing Type: Braced Frame (Program Determined) işaretlenir.
- Tasarımda kullanılacak yükleme kombinasyonları Design menüsünden Steel Frame Design dan Select Design Combos da comb1-comb12 ye kadar olan kombinasyonlar soldakiler sağa, sağdakilerde sola atılır.
- Design menüsünden I Steel Frame Design select design in groups dan hepsini tıklayıp add ile karşı tarafa atılır.
- Design menüsünden Steel Frame Design den Start design check of'a tıklanır. Çubuk üzerinde sağ Mouse tuşuyla tıklandığında ekrana boyutlandırma bilgilerini içeren **Steel Stress Check Information** ileti kutusu gelmektedir. Bu açılan sayfada Details düğmesine basarak ilgili çubuk için ayrıntılı boyutlandırma bilgilerine ulaşılabilmektedir (Şekil 6.8).



Şekil 6.7. Sistemin şekil değiştirmiş durumu




Şekil 6.8. Kubbenin boyutlandırması

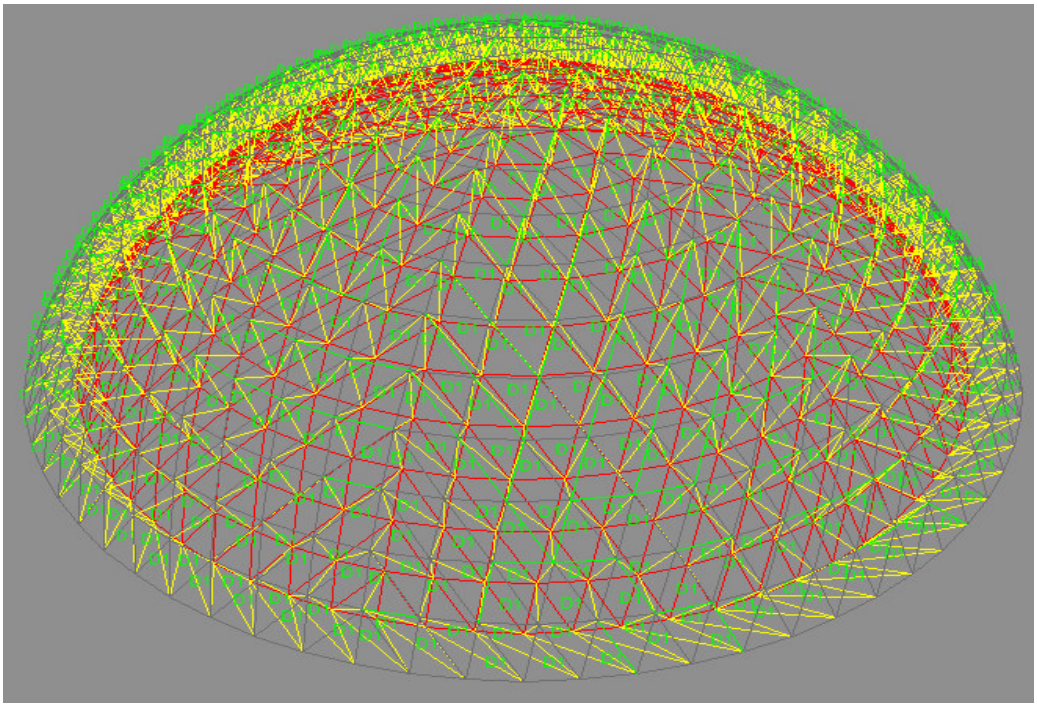
Analiz sonrasında sistem üzerindeki gerilme durumlarının oranı renklerle gösterilmektedir.

### 6.4.2. Çift katlı kubbe sistemlerin analizi ve boyutlandırılması

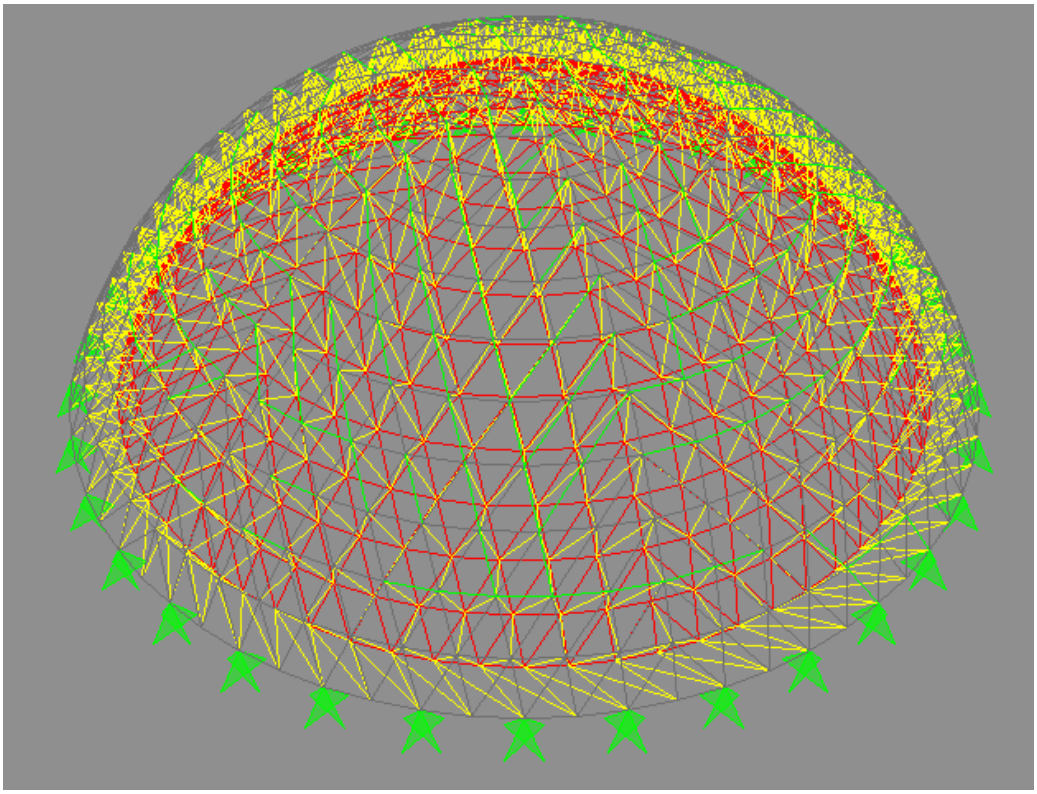
Bu bölümde, açıklığı 30 m olan ve yüksekliği 10 m olan çift katlı elips kubbe sistemi SAP2000 programı ile çözülerek işlem basamakları verilmiştir.

- AutoCAD ortamında tüm çift katlı kubbelerin sistem çubukları çizilir ve DXF dosyası olarak kaydedilir.
- DXF çizim dosyası SAP2000 programına aktarılır.
- Üç boyutlu görünüm ekrana getirilerek sistem geometrisi kontrol edilir.
- Materials bölümündeki listeden steel seçilerek St37 çeliğinin malzeme özellikleri atanmış olur.
- Alan elemanın tanımlanması için, define area section seçilir. Material ismi D1 verilerek Draw Quad Area element ( kabuk eleman ) düğmesine basılarak eleman oluşturulur (Şekil 6.9)
- Kesit özelliklerinin tanımlanması için Define menüsünden Frame/Cable Sections komutu seçilir. Ekrana gelen Frame Properties ileti kutusunun Choose Property Type For Add bölümündeki birinci açılır liste kutusundan Import Pipe seçeneği seçilir ve Add new property düğmesine basılır. TS ve DIN standartlarına uygun olarak yukarı da Tablo 6.3 kısmında verilen yirmidört adet boru kesitler oluşturulur.
- Dış çubuklar seçilir. Assign menüsünden Assign to grup girilerek, Add new group'a dış diye isim verilir. Dış kısımdaki çubuklar için yapılan işlemler iç ve diyagonal çubuklar içinde yapılır. Çubuklar için yapılan işlem kabuk elemanlar içinde yapılır.
- Dış, çubukların hepsi seçilir. Sonra Assign Frame Cable sections dan boru kesit seçilir. Aynı işlem iç ve diyagonal katmanlar içinde yapılır.

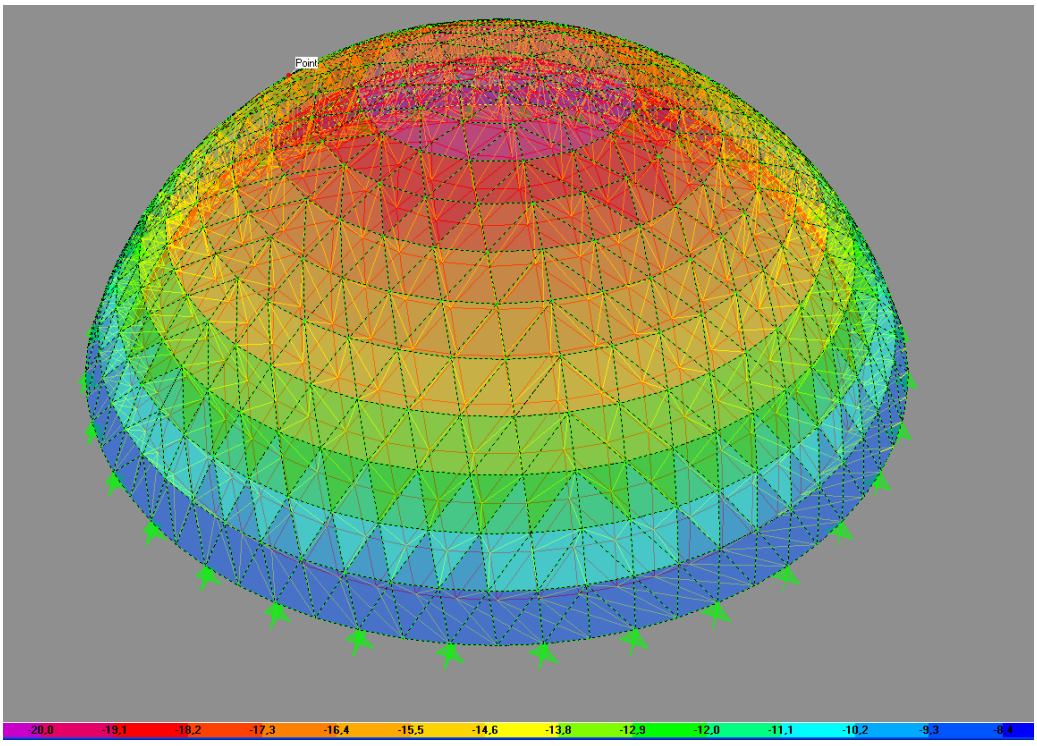
- Define menüsünden Load Case girilerek define loads' de Zati, Servis, Kar, Sıcaklık, R-Sol, R-Sağ, R-Ön, R-Arka, XDeprem, ve YDeprem girilir.
- Düğümler seçilerek Assign menüsünden joint Restraints ileti kutusunun Fast Restraints bölümünde sabit mesnet tanımlaması yapılır (Şekil 6.10).
- Select menüsünden groups dan bütün kabuk elemanlar seçilir.
- Assign menüsünden Area Loads dan Area, Uniform Loads, Load Case Name: Zati, units: kgf,m,c, Coord System global, Direction Z'projected ve Load da yük değeri girilir. Aynı şekilde Servis, Kar, SolRüz., SağRüz., ÖnRüz., ArkaRüz., XDeprem, ve YDeprem yük değerleri girilir (Şekil 6.11). Şekil 6.11 de sisteme 20 kg/m$^2$ zati yük uygulandı. Program bu yükün sistemin hangi alanına ne kadar etki ettirdiğini göstermektedir.



Şekil 6.9. Çift katlı kubbe sistemde kabuk elemanların gösterimi

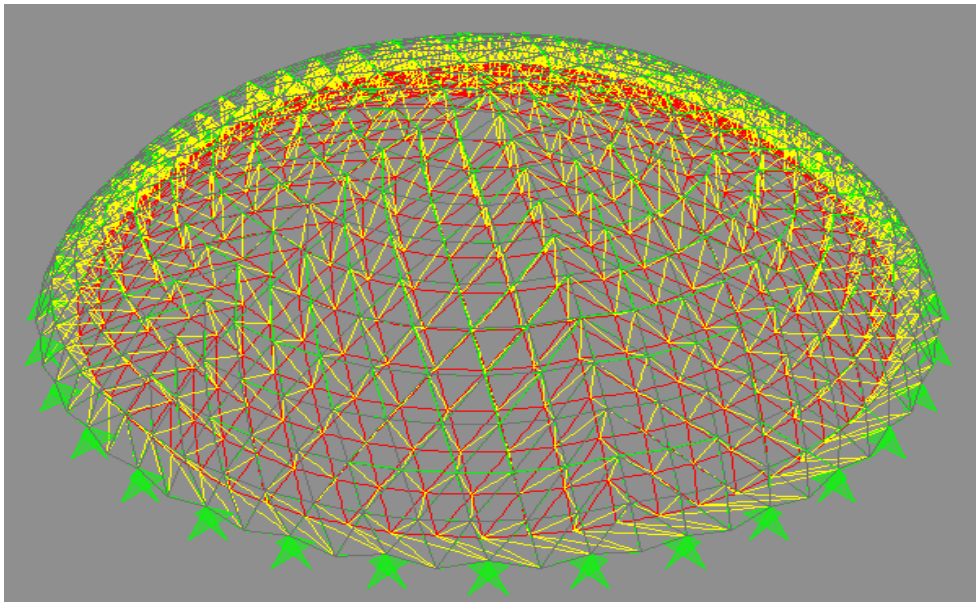


Şekil 6.10. Çift katlı kubbe sistemde sabit mesnetlerin atanması

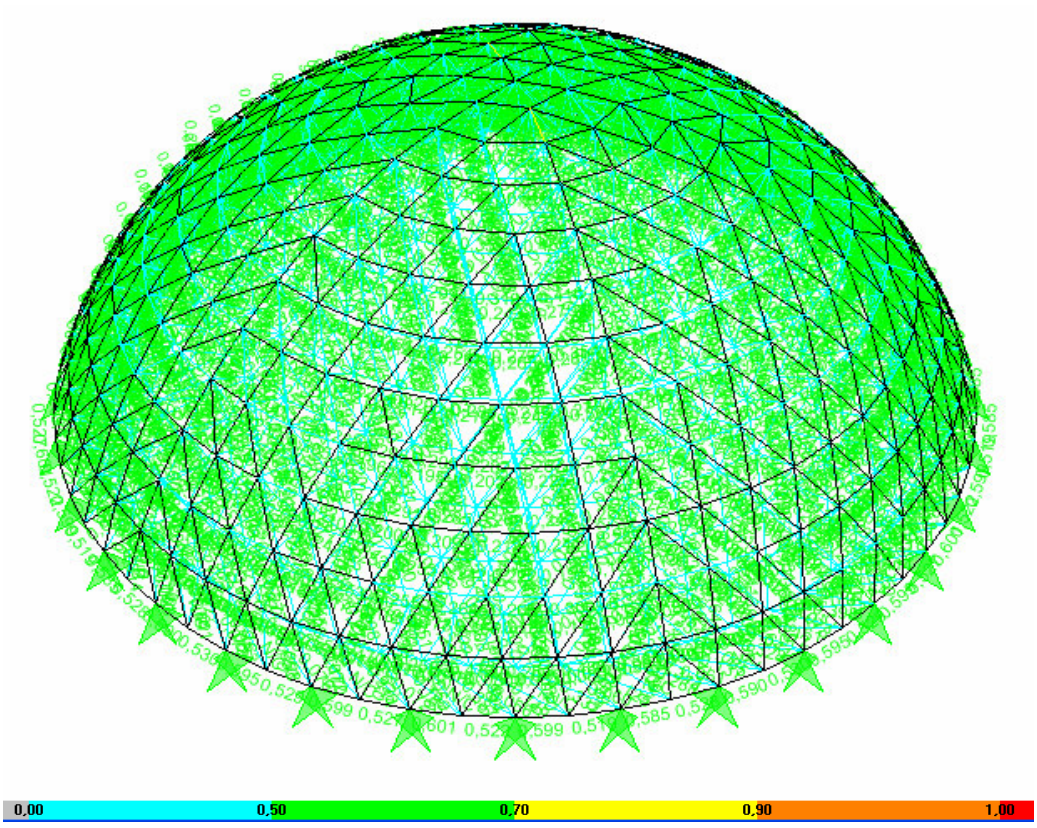



Şekil 6.11. Çift katlı kubbe sistemde zati yükün kubbe üzerinde dağılımı

- Select menüsünden groups' dan dış seçilir, bütün çubuklar seçilmiş olur.
- Assign menüsünden Frame Cable Loads dan Temperature, Temperatureden de ,Frame Temperature Loadıng, Load Case Name: Sıcaklık ve By Element Temperature: sıcaklık değeri girilir.
- Define menüsünden Combinations de Define Response Combinations dan Add New Combo seçilir. Comb 1 den başlayarak comb 12 ye kadar oniki tane kombinasyon oluşturulur. Bu oniki tane oluşturulan yük kombinasyonları bölüm 6 da 6.4 başlığı altında verilmiştir.
- Select menüsünden groups' dan dış, iç ve diyagonal seçilir, bütün çubuklar seçilmiş olur.
- Assign menüsünde Frame/cable Releases/Partial Fixity seçeneğine tıklanır. Ekrana gelen Assign Frame Releases ileti kutusunda moment 22(minör) ve minör 33 (major) satırlarındaki start ve end kutucukları seçilir.
- Run Analysis düğmesine basılır ve ekrana gelen ileti kutusunda Run Now düğmesine basılır.
- Analiz tamamlandığında ekrana gelen ve analiz adımlarını gösteren ileti kutusunda uyarı veya hata mesajları bulunmadığını gördükten sonra ileti kutusu kapatılır. Ekranda sistemin şekil değiştirmiş durumu görülür (Şekil 6.12).
- Boyutlama için Options, Preferences den Steel Frame Design den Framing Type: Braced Frame (Program Determined) işaretlenir.
- Tasarımda kullanılacak yükleme kombinasyonları Design menüsünden Steel Frame Design dan Select Design Combos da comb1-comb12 ye kadar olan kombinasyonlar soldakiler sağa, sağdakilerde sola atılır.
- Design menüsünden I Steel Frame Design select design in groups dan dış,iç ve diyagonal tıklanıp add'le karşı tarafa atılır.
- Design menüsünden Steel Frame Design den Start design check of'a tıklanır. Çubuk üzerinde sağ Mouse tuşuyla tıklandığında ekrana boyutlandırma bilgilerini içeren Steel Stress Check Information ileti kutusu gelmektedir. Bu açılan sayfada Details düğmesine basarak ilgili çubuk için ayrıntılı boyutlandırma bilgilerine ulaşılabilmaktadır (Şekil 6.13).



Şekil 6.12. Çift katlı kubbe sistemde sistemin şekil değiştirmiş durumu




Şekil 6.13. Çift katlı kubbe sistemin boyutlandırılması

Analiz sonrasında sistem üzerindeki gerilme durumlarının oranı renklerle gösterilmektedir.

### 6.5. Boyutlandırma Ve Tahkik

SAP2000 programında analiz sonrasında sistem üzerindeki gerilme durumlarının oranı renklerle belirtilmektedir. Kırmızı renk, oranın 1,0'den büyük olduğu diğer bir deyişle $\sigma > \sigma_{em}$ olan çubukları göstermektedir. Yani SAP2000 programında çubuklar gerilme değerinin 1,00' den küçük olmasına göre boyutlandırılmaktadır ( $\frac{\sigma_{çubuk}}{\sigma_{em}} \leq 1{,}00$ )

Bu sistemlerin hesaplaması yapılırken sisteme etki eden çekme ve basınç kuvvetleri göz önünde tutulmaktadır. Basınca ve çekmeye maruz kalan bu çubuklar için, çubukta oluşan gerilmenin emniyet gerilmesinden küçük olması gerekir.

Boru kesitleri tayin edilirken boruların emniyetli olarak taşıyabileceği kuvvetler aşağıda gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

Boru çapı D

Et kalınlığı t

Boru iç çapı d=D-2t (6.5)

Kesit alanı $F = \frac{\pi\left(D^2 - d^2\right)}{4}$ (6.6)

Atalet momenti $I = \frac{\pi\left(D^4 - d^4\right)}{64}$ (6.7)

Atalet yarıçapı $i = \sqrt{\frac{I}{F}}$ (6.8)

Narinlik $\lambda = \frac{l}{i}$ (6.9)

Çekme Çubuklarında $\sigma_ç = \frac{P_{\max\cdot}}{F} \leq \sigma_{em}$ (6.10)

Basınç Çubuklarında $\sigma_b = \frac{P_{\max\cdot}\omega}{F} \leq \sigma_{em}$ (6.11)

olarak, eksenel basınç ve çekme kuvvetine maruz çubuklardaki gerilme kontrolünün genel uygulama şekli ortaya çıkar. (ω) burkulma katsayısı olup (λ) narinliğine göre Tablo 6.6 da verilmiştir. ($\sigma_{em}$) emniyet gerilmesi değeri de çekme emniyet gerilmesine ($\sigma_{çem}$) eşittir

Burada,

$P_{max}$ : Çubuktaki max çekme veya basınç kuvveti

l.: çubuk boyunu göstermektedir.

Tablo 6.6. St37 çeliği için ‘‘ω’’ burkulma katsayıları

| λ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 1,02 | 1,03 | 1,03 | 1,04 | 1,05 | 1,06 | 1,06 | 1,07 | 1,08 | 1,08 |
| 30 | 1,09 | 1,10 | 1,11 | 1,11 | 1,12 | 1,13 | 1,14 | 1,15 | 1,15 | 1,16 |
| 40 | 1,17 | 1,18 | 1,19 | 1,20 | 1,20 | 1,21 | 1,22 | 1,23 | 1,24 | 1,25 |
| 50 | 1,26 | 1,27 | 1,28 | 1,29 | 1,30 | 1,31 | 1,32 | 1,33 | 1,34 | 1,35 |
| 60 | 1,36 | 1,37 | 1,38 | 1,39 | 1,40 | 1,41 | 1,43 | 1,44 | 1,45 | 1,46 |
| 70 | 1,47 | 1,49 | 1,50 | 1,51 | 1,53 | 1,54 | 1,55 | 1,57 | 1,58 | 1,59 |
| 80 | 1,67 | 1,62 | 1,64 | 1,65 | 1,67 | 1,69 | 1,70 | 1,72 | 1,74 | 1,75 |
| 90 | 1,77 | 1,79 | 1,81 | 1,82 | 1,84 | 1,86 | 1,88 | 1,90 | 1,92 | 1,94 |
| 100 | 1,96 | 1,99 | 2,01 | 2,03 | 2,05 | 2,08 | 2,10 | 2,13 | 2,15 | 2,18 |
| 110 | 2,20 | 2,23 | 2,26 | 2,29 | 2,32 | 2,35 | 2,38 | 2,41 | 2,45 | 2,48 |
| 120 | 2,51 | 2,55 | 2,59 | 2,63 | 2,66 | 2,71 | 2,75 | 2,79 | 2,85 | 2,88 |
| 130 | 2,93 | 2,98 | 3,03 | 3,07 | 3,12 | 3,17 | 3,21 | 3,26 | 3,31 | 3,36 |
| 140 | 3,91 | 3,45 | 3,50 | 3,55 | 3,60 | 3,65 | 3,70 | 3,75 | 3,80 | 3,86 |
| 150 | 3,40 | 3,96 | 4,01 | 4,07 | 4,12 | 4,17 | 4,23 | 4,28 | 4,34 | 4,39 |
| 160 | 4,45 | 4,50 | 4,56 | 4,61 | 4,67 | 4,73 | 4,79 | 4,84 | 4,90 | 4,96 |
| 170 | 5,02 | 5,08 | 5,14 | 5,20 | 5,26 | 5,32 | 5,38 | 5,44 | 5,50 | 5,57 |
| 180 | 5,63 | 5,69 | 5,75 | 5,82 | 5,88 | 5,94 | 6,01 | 6,07 | 6,14 | 6,20 |
| 190 | 6,27 | 6,34 | 6,40 | 6,47 | 6,54 | 6,60 | 6,67 | 6,74 | 6,81 | 6,88 |
| 200 | 6,95 | 7,02 | 7,09 | 7,16 | 7,23 | 7,30 | 7,37 | 7,44 | 7,51 | 7,59 |
| 210 | 7,66 | 7,73 | 7,81 | 7,88 | 7,95 | 8,03 | 8,10 | 8,18 | 8,25 | 8,33 |
| 220 | 8,41 | 8,48 | 8,56 | 8,64 | 8,72 | 8,79 | 8,87 | 8,95 | 9,03 | 9,11 |
| 230 | 9,19 | 9,27 | 9,35 | 9,43 | 9,51 | 9,67 | 9,67 | 9,76 | 9,84 | 9,92 |
| 240 | 10,00 | 10,09 | 10,17 | 10,26 | 10,34 | 10,43 | 10,51 | 10,60 | 10,68 | 10,77 |
| 250 | 10,86 | | | | | | | | | |

Tablo 6.7 ve Tablo 6.8 de tek ve çift katlı sistemlerin gerilme kontrolleri verilmiştir.

Tablo 6.7. 30 m açıklık ve 10 m yükseklikte tek katlı elips kubbe sistemin SAP kontrolü ve gerilme tahkiki

| **Çubuk No** | **Et Kalınlığı** (cm) | **F** ($cm^2$) | **i** (cm) | **Çubuk Boyu** (cm) | $\lambda = \frac{s}{i}$ | ω | **Basınç** ( kgf ) | **Çekme** ( kgf ) | **Gerilme Tahkiki** | **SAP Kontrolü** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 197 | 98,5 | 1,93 | -1583,75 | - | 470,25<1440 | 0,196<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 166 | 83 | 1,65 | -1817,51 | - | 461,37<1440 | 0,191<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 173 | 86,5 | 1,71 | -1614,78 | - | 424,81<1440 | 0,241<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 163 | 81,5 | 1,63 | -2347,06 | - | 588,57<1440 | 0,281<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 169 | 84,5 | 1,68 | -2513,93 | - | 649,75<1440 | 0,339<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 146 | 73 | 1,51 | - | 1634,50 | 251,46<1440 | 0,126<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 136 | 68 | 1,45 | - | 3013,84 | 463,66<1440 | 0,232<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 136 | 68 | 1,45 | - | 1945,38 | 299,29<1440 | 0,150<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 141 | 70,5 | 1,48 | - | 1402,68 | 215,80<1440 | 0,144<1,00 |
| 5 | 0,365 | 6,50 | 2,00 | 141 | 70,5 | 1,48 | - | 2175,17 | 334,64<1440 | 0,167<1,00 |

Tablo 6.8. 30 m açıklık ve 10 m yükseklikte çift katlı elips kubbe sistemin SAP kontrolü ve gerilme tahkiki

| **Çubuk No** | **Et Kalınlığı (cm)** | **F** ($cm^2$) | **i** (cm) | **Çubuk Boyu (cm)** | $\lambda = \frac{s}{i}$ | ω | **Basınç** ( kgf ) | **Çekme** ( kgf ) | **Gerilme Tahkiki** | **SAP Kontrolü** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0,325 | 3,11 | 1,08 | 142 | 131,5 | 2,98 | -684,05 | - | 620,96<1440 | 0,349<1,00 |
| 4 | 0,325 | 4,60 | 1,60 | 157 | 98,12 | 1,92 | -1189,91 | - | 496,65<1440 | 0,277<1,00 |
| 4 | 0,325 | 4,60 | 1,60 | 181 | 113,12 | 2,29 | -1606,12 | - | 799,57<1440 | 0,437<1,00 |
| 4 | 0,325 | 4,60 | 1,60 | 159 | 99,38 | 1,94 | -2346,95 | - | 989,80<1440 | 0,553<1,00 |
| 4 | 0,325 | 4,60 | 1,60 | 159 | 99,38 | 1,94 | -3062,39 | - | 1291,53<1440 | 0,722<1,00 |
| 3 | 0,325 | 4,00 | 1,39 | 149 | 107,19 | 2,13 | - | 594,14 | 148,54<1440 | 0,099<1,00 |
| 2 | 0,325 | 3,11 | 1,08 | 187 | 173,15 | 5,22 | - | 668,08 | 214,81<1440 | 0,143<1,00 |
| 2 | 0,325 | 3,11 | 1,08 | 130 | 120,37 | 2,52 | - | 1126,69 | 362,28<1440 | 0,242<1,00 |
| 2 | 0,325 | 3,11 | 1,08 | 133 | 123,15 | 2,65 | - | 1247,04 | 400,98<1440 | 0,267<1,00 |
| 3 | 0,325 | 4,00 | 1,39 | 207 | 148,92 | 3,83 | - | 393,07 | 98,26<1440 | 0,066<1,00 |

SAP kontrolü, SAP2000 programında boyutlandırma yapıldıktan sonra çubuklardaki gerilme oranlarının 1,00 değeri ile karşılaştırılmasıdır. Gerilme tahkikinde ise 6.10 ve 6.11 denklemleri kullanılarak çubuğun basınç ve çekme olması durumuna göre gerilme değerleri bulunarak emniyet gerilmesi değeri ile karşılaştırılması yapılmıştır.

### 6.6. Deplasmanların Hesaplanması

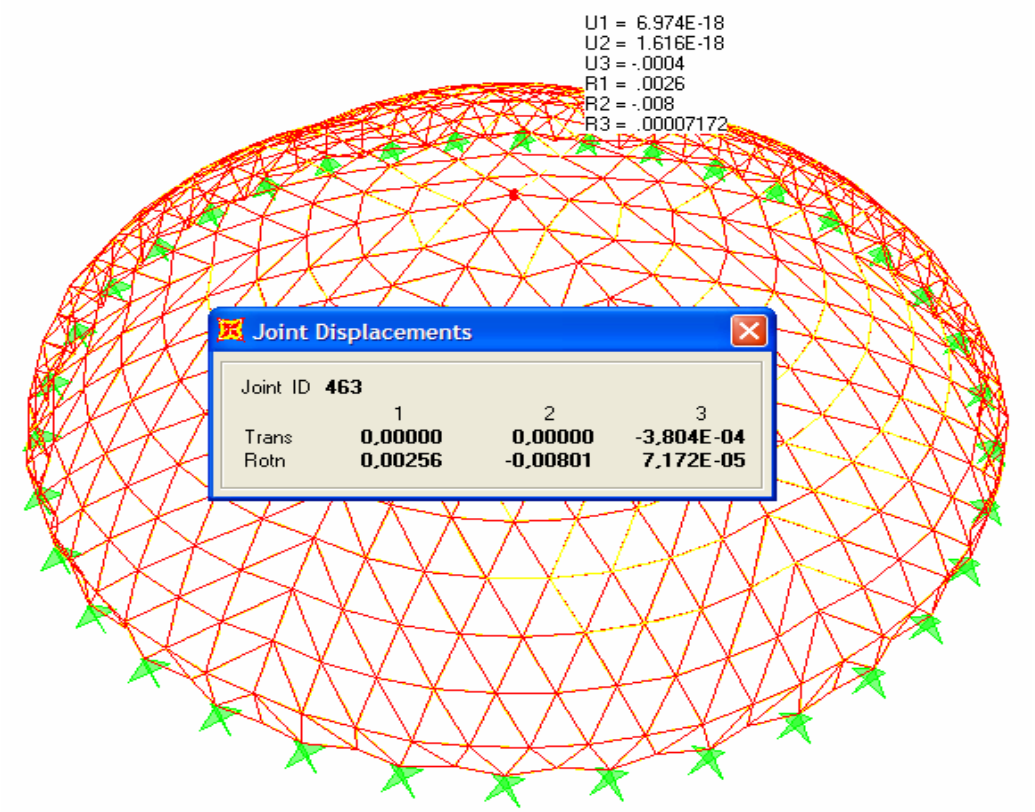
Sonuçların noktasal deplasman tahkiki, maksimum noktasal deplasman ile serbest açıklığın karşılaştırılmasıyla yapılır. Bu sistemlerde maksimum deplasman değeri, serbest açıklığın 300 ‘e oranıdır ( TS 648 ).

Deplasman değerleri alınırken altmış dört adet sistemde en tepe noktasındaki deplasman değeri alınmıştır. Sistemlerin serbest açıklığına göre de deplasman değerleri Tablo 6.9 da verilmiştir.

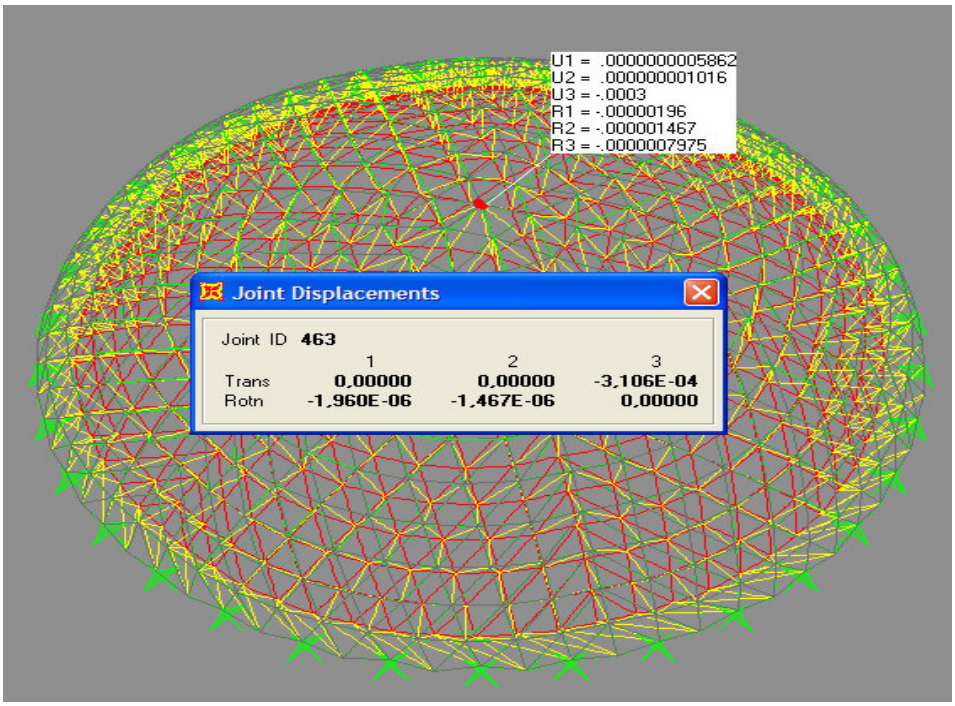
Tablo 6.9. Tek ve çift katlı sistemlerin açıklığa göre maksimum deplasman değerleri

| **Açıklık** (m) | L/300 (m) | L/300 (mm) |
|---|---|---|
| 30 | 0,100 | 100 |
| 40 | 0,133 | 133 |
| 50 | 0,166 | 166 |
| 60 | 0,200 | 200 |
| 70 | 0,233 | 233 |
| 80 | 0,266 | 266 |
| 90 | 0,300 | 300 |
| 100 | 0,330 | 330 |

Şekil 6.14 ve Şekil 6.15 de tek ve çift katlı kubbe sistemlerde deplasmanın alındığı nokta gösterilmiştir.




Şekil 6.14 Tek katlı kubbe sistemlerde deplasmanın alındığı nokta




Şekil 6.15. Çift katlı kubbe sistemlerde deplasmanın alındığı nokta

# 7. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

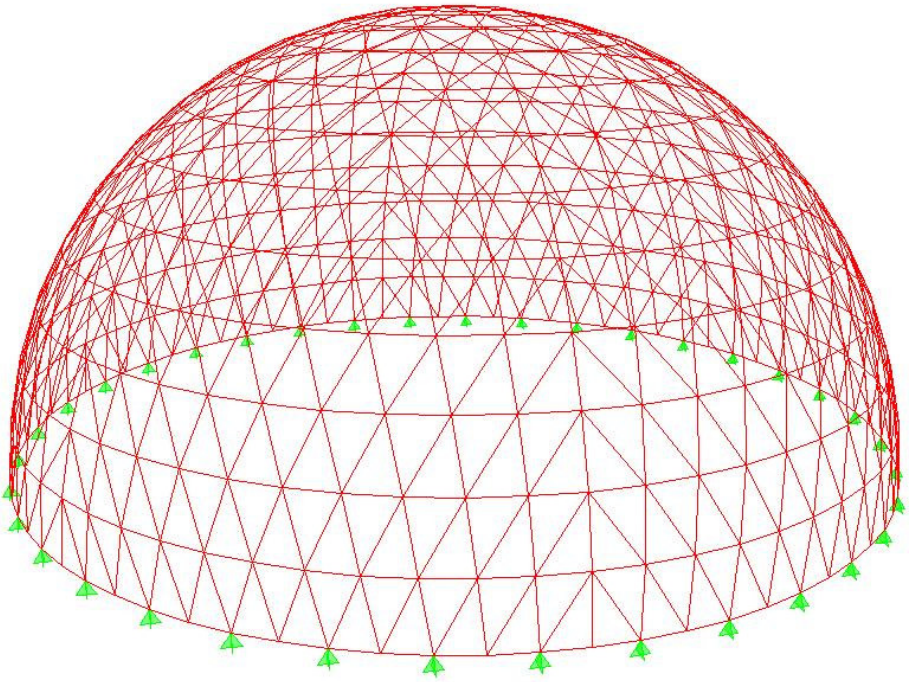
Bir yapının projelendirilmesi ve yapımı; beş ana ilkenin (dayanım, dayanıklılık, işlevsellik, ekonomik ve estetik ) birlikte ele alındığı bir optimizasyon problemi olarak tanımlanabilir.

Yapı servis yüklerini ve deprem gibi etkilerden kaynaklanan yükleri belirli bir güvenlikle taşıyabilmeli, planlanan hizmet ömrü süresince dıştan ve içten kaynaklanan yıpratıcı etkilere karşı dayanıklı (kalıcı) olmalı, kaynak israfına yol açmayacak şekilde ekonomik olmalı, ihtiyaca cevap verebilmeli, özgün ve estetik bir görünüşe sahip olmalıdır. Bir çelik uzay kubbe sisteminde ekonomik olması diğer birçok neden yanında sistemin ağırlığına da bağlıdır.

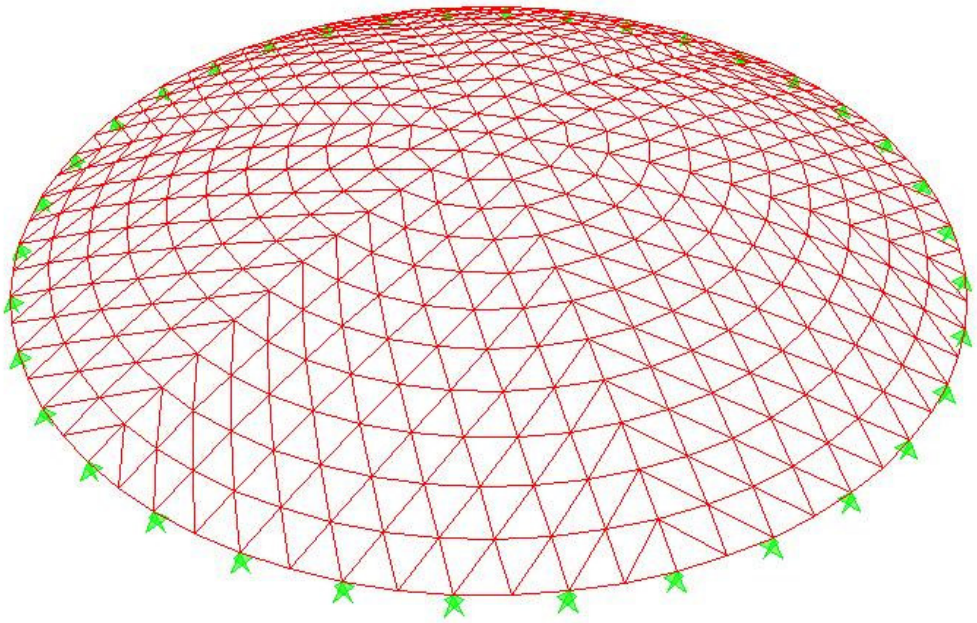
Bu çalışmada eğriliklerine göre çember, elips ve parabol kubbe sistemler tek ve çift katlı olmalarına, açıklıklarına ve yüksekliklerine göre çelik uzay kubbe sistemlerin analizleri yapılmış sonuçlar bulunmuştur.

## 7.1. Tek Katlı Kubbe Sistemlerin Analizi

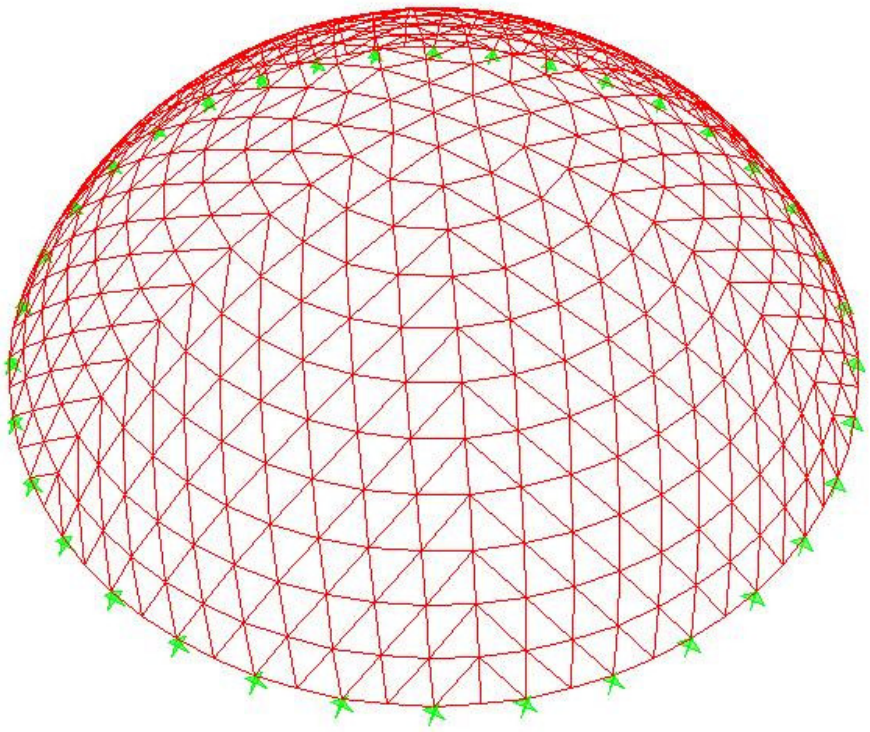
Tek katlı çember, elips ve parabol kubbe sistemler; Şekil 7.1, Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 de gösterilmiştir. Bu sistemlerin ağırlıklarının açıklığa, birim ağırlığının açıklığa ve deplasmanın açıklığa göre değişimini gösteren tablolar Tablo 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 de ve grafiklerde Şekil 7.4, 7.5 ve 7.6 da gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Tek katlı çember kubbe sistemi



Şekil 7.2. Tek katlı elips kubbe sistemi



Şekil 7.3. Tek katlı parabol kubbe sistemi

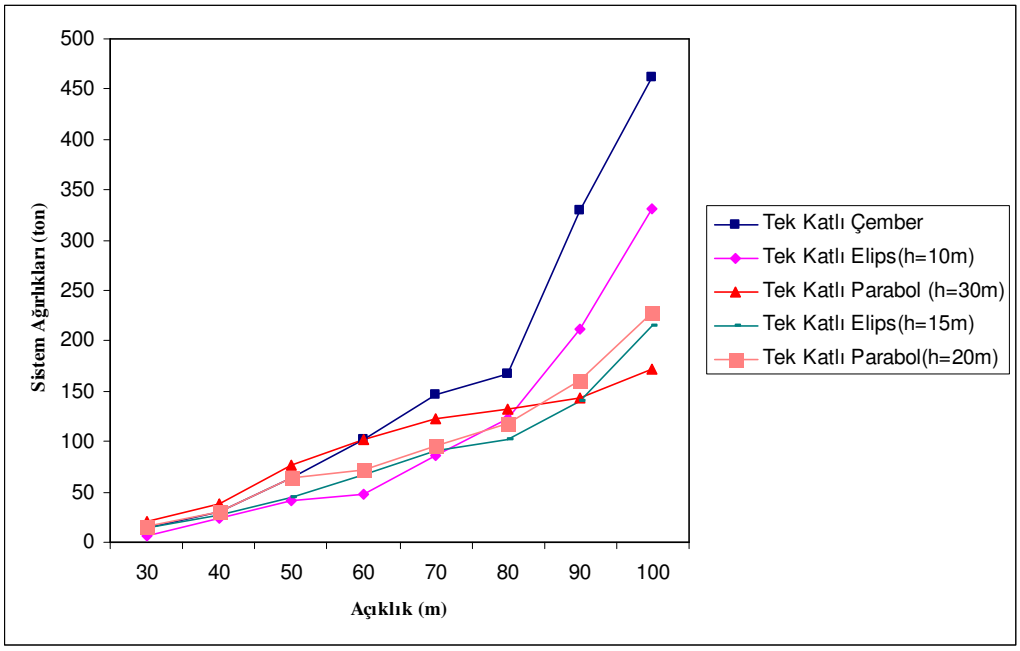
Tablo 7.1. Tek katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember (ton) | 13,94 | 29,89 | 63,95 | 101,42 | 146,99 | 167,94 | 330,41 | 461,08 |
| Tek Katlı Elips (ton) (h=10 m) | 7,03 | 23,52 | 40,73 | 47,84 | 86,64 | 121,89 | 212,42 | 331,12 |
| Tek Katlı Elips (ton) (h=15 m) | 13,94 | 26,34 | 44,12 | 67,17 | 90,62 | 101,66 | 140,20 | 214,21 |
| Tek Katlı Parabol (ton) (h=20 m) | 15,25 | 29,89 | 64,23 | 72,25 | 95,94 | 118,08 | 161,33 | 228,02 |
| Tek Katlı Parabol (ton) (h=30 m) | 20,25 | 38,87 | 77,02 | 101,42 | 122,02 | 132,19 | 142,89 | 172,38 |

Tablo 7.2. Tek katlı kubbe sistemlerde kullanılan çubukların kesit numaraları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember | 5 | 7 | 9 | 12 | 14 | 15 | 18 | 20 |
| Tek Katlı Elips (h=10 m) | 3 | 7 | 8 | 9 | 12 | 14 | 17 | 20 |
| Tek Katlı Elips (h=15 m) | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 13 | 14 | 17 |
| Tek Katlı Parabol (h=20 m) | 6 | 7 | 10 | 11 | 12 | 13 | 15 | 19 |
| Tek Katlı Parabol (h=30 m) | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 | 13 | 13 | 14 |

Tablo 6.5 deki malzeme tablosuna göre kullanılan çubukların her sistem ve açıklık için kesit numaraları verilmiştir.




Şekil 7.4. Tek katlı kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Tek katlı çember, elips ve parabol kubbe sistemleri incelendiğinde açıklığın otuz metre ve yüksekliğin on metre olduğu tek katlı elips kubbe sistemde (h=10 m)ağırlık minimum değer almaktadır.

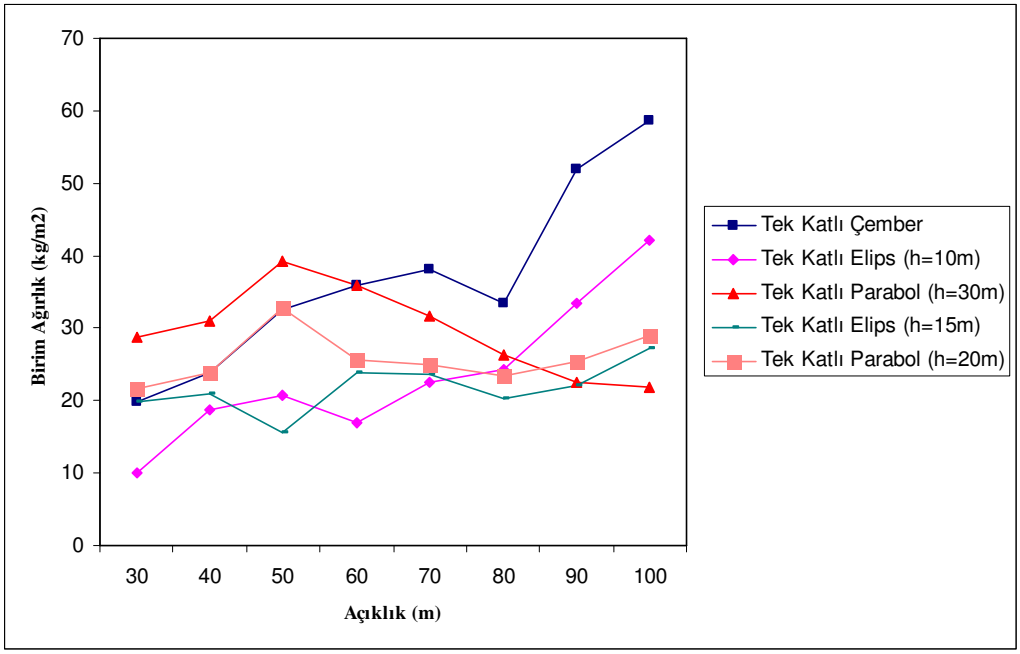
Tek katlı çember sistemlerde yüksekliğin artması, açıklığı da arttıracağından sistem ağırlığını artırmaktadır.

Tek katlı elips sistemler yüksekliği fazla olmayan, fakat büyük açıklık geçilen basık sistemler olduğu için sistem ağırlığı açıklık arttıkça artmaktadır.

Tek katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlığı, toplam sistem ağırlığının Tablo 6.3 'te verilen örtülen alana bölünmesiyle elde edilmektedir. Sistemlerin birim alan ağırlıkları karşılaştırıldığında, açıklıktan bağımsız olarak, hangi sistemin ağırlıkça daha iyi bir performans gösterdiği anlaşılabilmektedir. Tablo 7.3'de tek katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlıkları listelenmiştir.

Tablo 7.3. Tek katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları.

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember ($kg/m^2$) | 19,74 | 23,80 | 32,58 | 35,88 | 38,22 | 33,43 | 51,96 | 58,73 |
| Tek Katlı Elips ($kg/m^2$) (h=10 m) | 9,95 | 18,73 | 20,75 | 16,93 | 22,52 | 24,26 | 33,41 | 42,18 |
| Tek Katlı Elıps ($kg/m^2$) (h=15 m) | 19,74 | 20,96 | 22,48 | 23,76 | 23,55 | 20,23 | 22,05 | 27,29 |
| Tek Katlı Parabol ($kg/m^2$)(h=20 m) | 21,58 | 23,80 | 32,73 | 25,56 | 24,94 | 23,50 | 25,37 | 29,05 |
| Tek Katlı Parabol ($kg/m^2$) (h=30 m) | 28,66 | 30,94 | 39,24 | 35,88 | 31,72 | 26,31 | 22,47 | 21,95 |



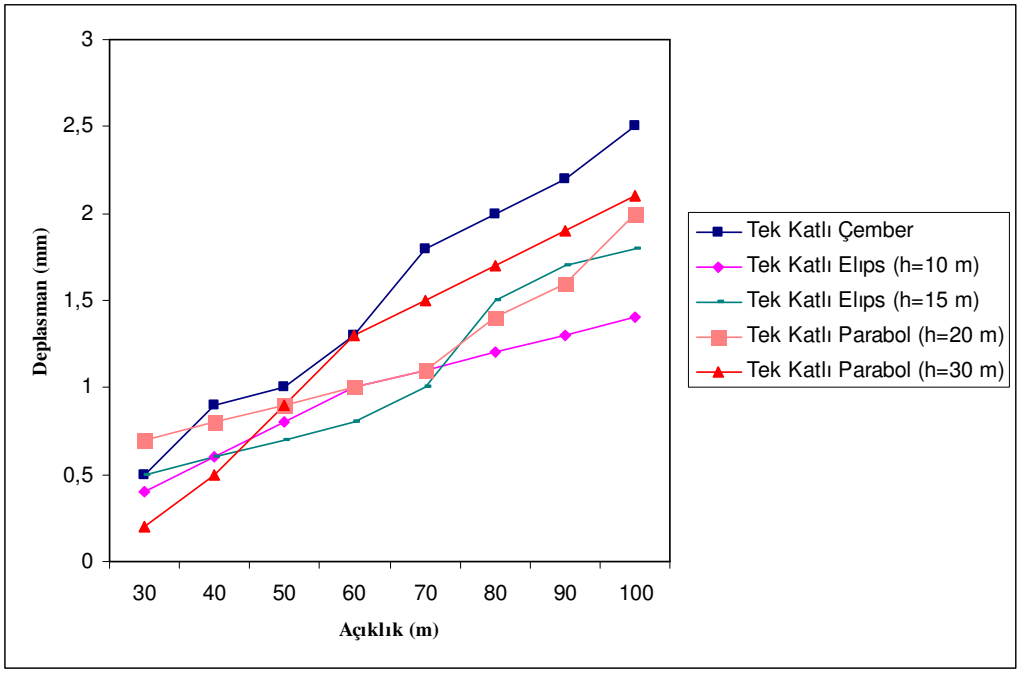

Şekil 7.5. Tek katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Birim alan ağırlıklarının minimum değerleri toplam ağırlık karşılaştırılmasında olduğu gibidir.

Tek katlı çember sistemler 40 metre açıklığa kadar ekonomik olup bu açıklıktan sonra ekonomik olmamaktadır. 10 metre yüksekliğindeki tek katlı elips 80 metre açıklığa kadar ekonomik bu açıklıktan sonra ekonomik sonuç vermemektedir. 15 metre yüksekliğinde tek katlı elips bütün açıklıklarda ekonomiktir. Sadece 100 metre açıklıkta ekonomik değildir. 30 metre yüksekliğindeki tek katlı parabol 60 metre açıklıktan büyük açıklıklar için ekonomik sonuçlar vermektedir. Tablo 7.4 de tek katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanları verilmiştir.

Tablo 7.4. Tek katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim değerleri

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember Dep. (mm) | 0,5 | 0,9 | 1 | 1,3 | 1,8 | 2 | 2,2 | 2,5 |
| Tek Katlı Elips Dep.(mm)(h=10m) | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 |
| Tek Katlı Elıps Dep.(mm)(h=15m) | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1 | 1,5 | 1,7 | 1,8 |
| Tek Katlı Parabol Dep.(mm)(h=20m) | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,4 | 1,6 | 2 |
| Tek Katlı Parabol Dep.(mm)(h=30m) | 0,2 | 0,5 | 0,9 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,1 |



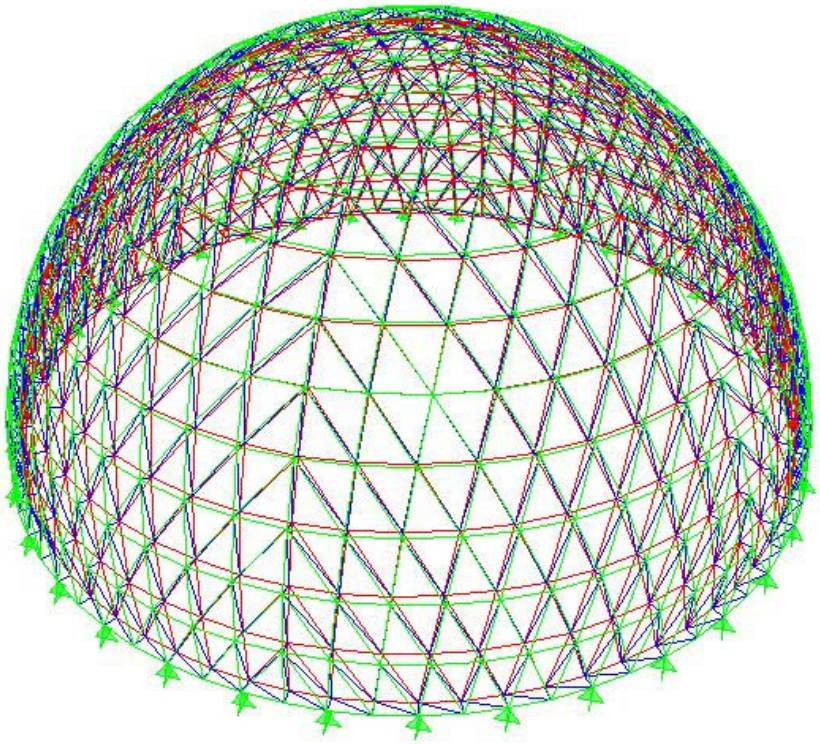

Şekil 7.6. Tek katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim grafikleri

Tek katlı çember sistemlerin deplasman değerleri en büyüktür.30 metre açıklığında yüksekliği 20 metre ve 30 metre parabol sistemde aynı deplasman değerini almaktadır. 30 metre yüksekliğindeki parabol sistemde 40 metre ye kadar deplasman küçük, bu açıklıktan sonra deplasman değeri büyümektedir.10 metre ve 15 metre yükseklikteki elips sistemlerde 70 metre açıklıktan sonra 10 metre yüksekliğindeki elips sistemin deplasman değerleri küçük, 15 metre yükseliğindeki sistemin deplasman değerleri büyüktür.

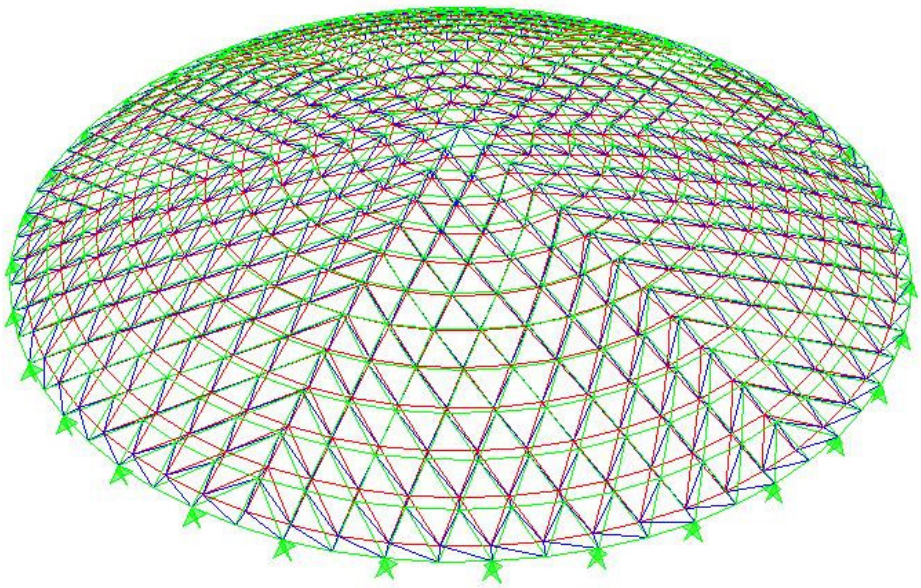
Bütün deplasman değerleri Tablo 6.9 verilen L/300 değerinden küçüktür.

## 7.2. Çift Katlı Kubbe Sistemlerin Analizi

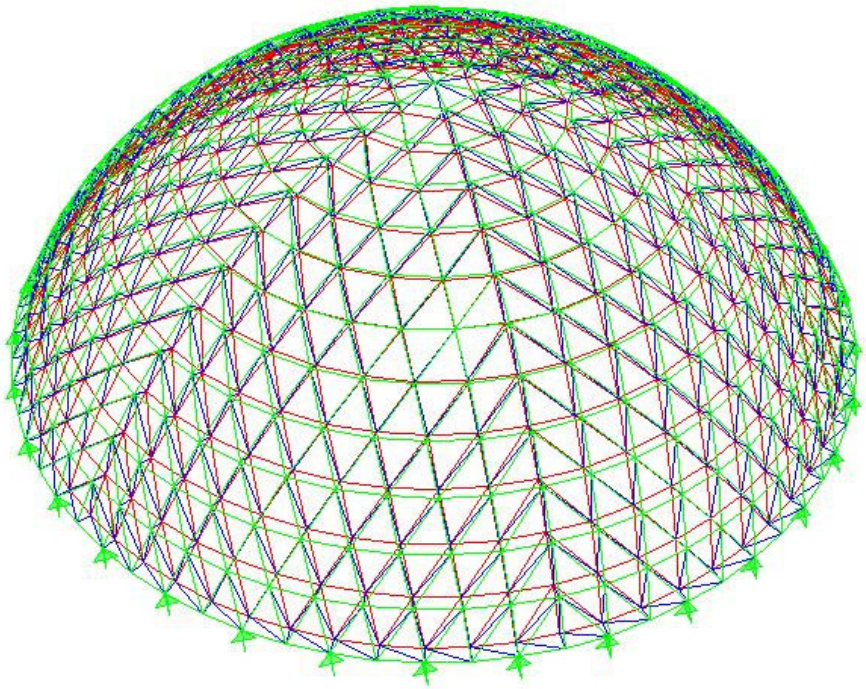
Çift katlı çember, elips ve parabol kubbe sistemler Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9 de gösterilmiştir. Bu sistemlerin ağırlıklarının açıklığa, birim alan ağırlığının açıklığa ve deplasmanın açıklığa göre değişimini gösteren tablolar Tablo 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 de ve grafiklerde Şekil 7.10, 7.11 ve 7.12 de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Çift katlı çember kubbe sistemi



Şekil 7.8. Çift katlı elips kubbe sistemi



Şekil 7.9. Çift katlı parabol kubbe sistemi

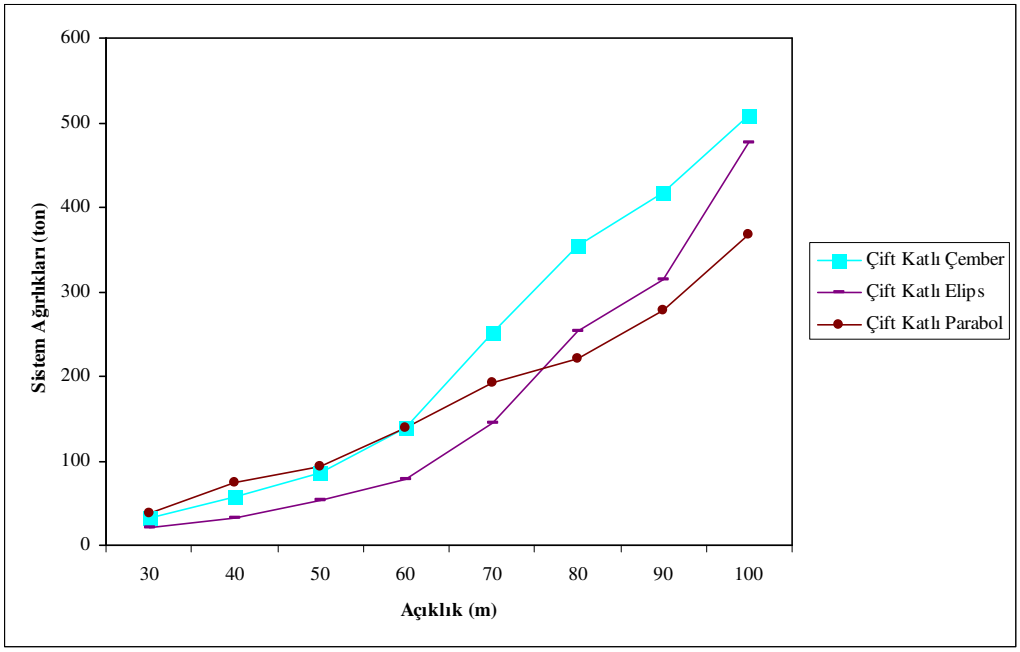
Tablo 7.5. Çift katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Çift Katlı Çember (ton) | 31,62 | 58,01 | 85,65 | 138,19 | 251,04 | 353,88 | 416,98 | 509,33 |
| Çift Katlı Elips (ton) | 20,74 | 31,59 | 53,10 | 78,01 | 145,63 | 252,89 | 315,23 | 476,76 |
| Çift Katlı Parabol (ton) | 38,56 | 74,86 | 93,54 | 138,19 | 191,79 | 220,08 | 278,75 | 366,76 |

Tablo 7.6 Çift katlı kubbe sistemlerde kullanılan çubukların kesit numaraları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Çift Katlı Çember | 5,4,3 | 6,5,5 | 7,6,5 | 8,7,6 | 10,9,8 | 12,11,10 | 14,13,8 | 14,13,10 |
| Çift Katlı Elips | 4,3,2 | 5,4,3 | 7,5,3 | 8,5,4 | 12,7,6 | 15,10,9 | 17,8,7 | 20,8,7 |
| Çift Katlı Parabol | 6,4,3 | 6,5,4 | 7,6,5 | 8,7,6 | 9,8,7 | 10,9,6 | 12,10,7 | 14,11,8 |

Tablo 6.5 deki malzeme tablosuna göre kullanılan çubukların her sistem ve açıklık için kesit numaraları verilmiştir. Çift katlı sistemlerde üst, alt ve diyagonal çubuklar için ayrı ayrı kesit numaraları gösterilmiştir. İlk sayı üst, ikinci sayı alt ve üçüncü sayıda diyagonal çubukları göstermektedir.




Şekil 7.10. Çift katlı kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Çift katlı çember, elips ve parabol kubbe sistemlerin eğrileri incelendiğinde açıklığın otuz metre ve yüksekliğin on metre olduğu çift katlı elips kubbe sistemde ağırlık minimum değer almaktadır.

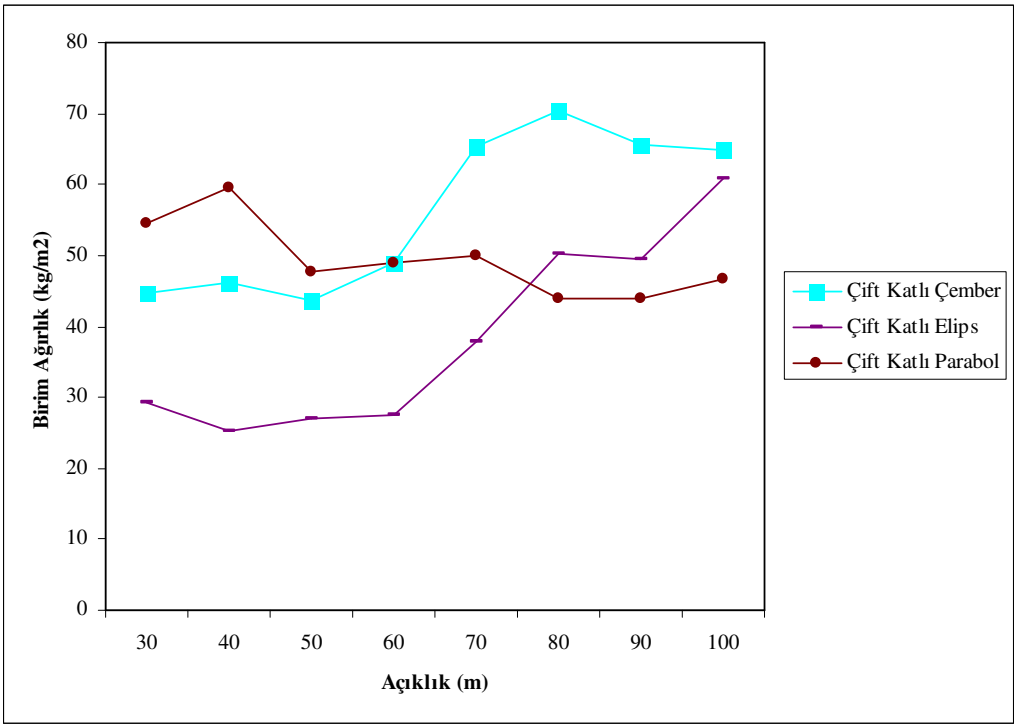
Çift katlı elips kubbe sistemler yüksekliği fazla olmayıp, geçtiği açıklık fazla olan basık sistemler olduğu için çubuk en kesit alanları artmakta dolayısıyla sistem ağırlığı artmaktadır.

Çift katlı çember kubbe sistemlerde, yükseklikliğin artması açıklığı da arttıracağından sistem ağırlığını artırmaktadır.

Çift katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlığı, toplam sistem ağırlığının Tablo 6.3' te verilen örtülen alana bölünmesiyle elde edilmektedir. Tablo 7.7'de çift katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 7.7. Çift katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Çift Katlı Çember ($kg/m^2$) | 44,76 | 46,18 | 43,64 | 48,90 | 65,26 | 70,44 | 65,58 | 64,88 |
| Çift Katlı Elips ($kg/m^2$) | 29,35 | 25,15 | 27,06 | 27,60 | 37,86 | 50,34 | 49,58 | 60,73 |
| Çift Katlı Parabol ($kg/m^2$) | 54,58 | 59,60 | 47,66 | 48,90 | 49,86 | 43,80 | 43,84 | 46,72 |




Şekil 7.11. Çift katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

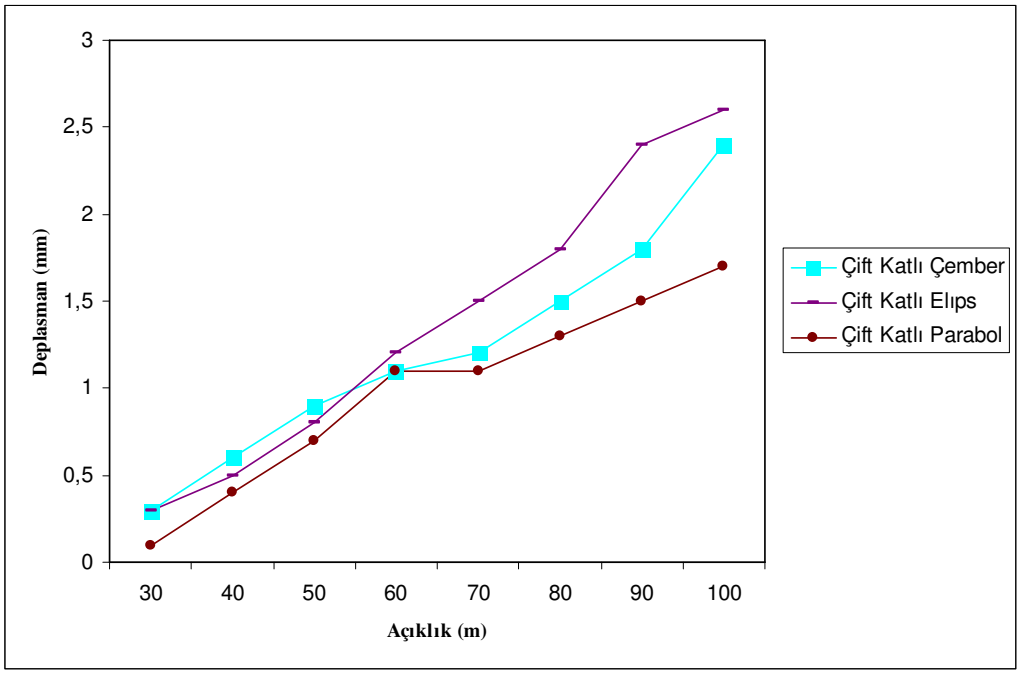
Birim alan ağırlıklarında çift katlı elips sistem 70 metre açıklığa kadar minimum olurken bu açıklıktan sonra maksimum olmaktadır. Çift katlı çember ve

çift katlı parabol sistemlerde 60 metre açıklığa kadar çemberin birim alan ağırlığı küçük parabolünkü büyüktür. 60 metre açıklıktan sonrada çemberin birim alan ağırlığı artarken, parabolün birim alan ağırlığı azalmaktadır.

Geçilen açıklıklara bağlı olarak, geometrik formun etkinliğiyle çift katlı parabol kesitli sistemlerde seksen metre açıklık, çember kesitli sistemlerde elli metre açıklık ve elips kesitli sistemlerde 40 metre açıklık birim ağırlık açısından en uygun değer olduğu görülmektedir. Tablo 7.8 da çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanları verilmiştir.

Tablo 7.8. Çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim değerleri

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Çift Katlı Çember Dep. (mm) | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,4 |
| Çift Katlı Elips Dep. ( mm) | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,4 | 2,6 |
| Çift Katlı Parabol Dep. ( mm) | 0,1 | 0,4 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,7 |




Şekil 7.12. Çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim grafikleri

Çift katlı çemberin 50 metreye kadarki açıklıkta deplasman değeri büyük, 50 metreden daha büyük açıklıklarda deplasman değeri küçüktür. Çift katlı elips

sistemde de 50 metreye kadar olan açıklıkların deplasman değeri küçük, 50 metreden sonraki açıklıklarda değer büyümektedir. Çift katlı parabol sistemlerinde deplasman değerleri en küçüktür.

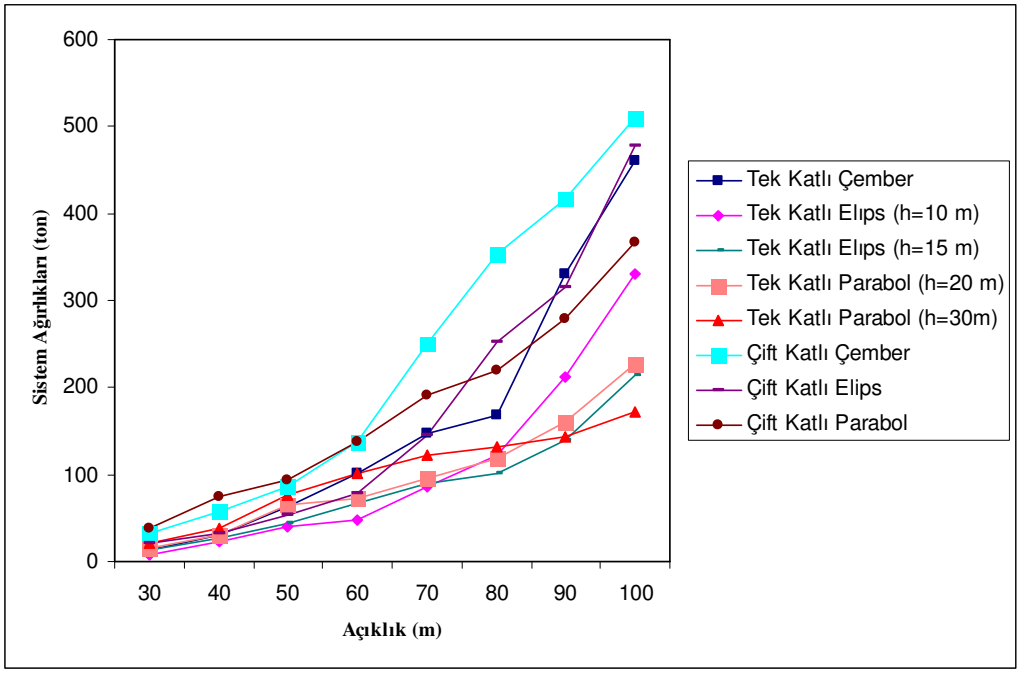
Bütün deplasman değerleri Tablo 6.9 da verilen L/300 değerinden küçüktür.

### 7.3. Tek Ve Çift Katlı Kubbe Sistemlerin Karşılaştırılması

Tek ve çift katlı çember, elips ve parabol kubbe sistemlerin sistem ağırlığının açıklığa, birim ağırlığının açıklığa ve deplasmanın açıklığa göre değişimini gösteren tablolar Tablo 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18, 7.19, 7.20 de ve grafiklerde Şekil 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25 de gösterilmiştir.

Tablo 7.9. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember (ton) | 13,94 | 29,89 | 63,95 | 101,42 | 146,99 | 167,94 | 330,41 | 461,08 |
| Tek Katlı Elips (ton) (h=10 m) | 7,03 | 23,52 | 40,73 | 47,84 | 86,64 | 121,89 | 212,42 | 331,12 |
| Tek Katlı Elips (ton) (h=15 m) | 13,94 | 26,34 | 44,12 | 67,17 | 90,62 | 101,66 | 140,20 | 214,21 |
| Tek Katlı Parabol (ton) (h=20 m) | 15,25 | 29,89 | 64,23 | 72,25 | 95,94 | 118,08 | 161,33 | 228,02 |
| Tek Katlı Parabol (ton) (h=30 m) | 20,25 | 38,87 | 77,02 | 101,42 | 122,02 | 132,19 | 142,89 | 172,38 |
| Çift Katlı Çember (ton) | 31,62 | 58,01 | 85,65 | 138,19 | 251,04 | 353,88 | 416,98 | 509,33 |
| Çift Katlı Elips (ton) | 20,74 | 31,59 | 53,10 | 78,01 | 145,63 | 252,89 | 315,23 | 476,76 |
| Çift Katlı Parabol (ton) | 38,56 | 74,86 | 93,54 | 138,19 | 191,79 | 220,08 | 278,75 | 366,76 |

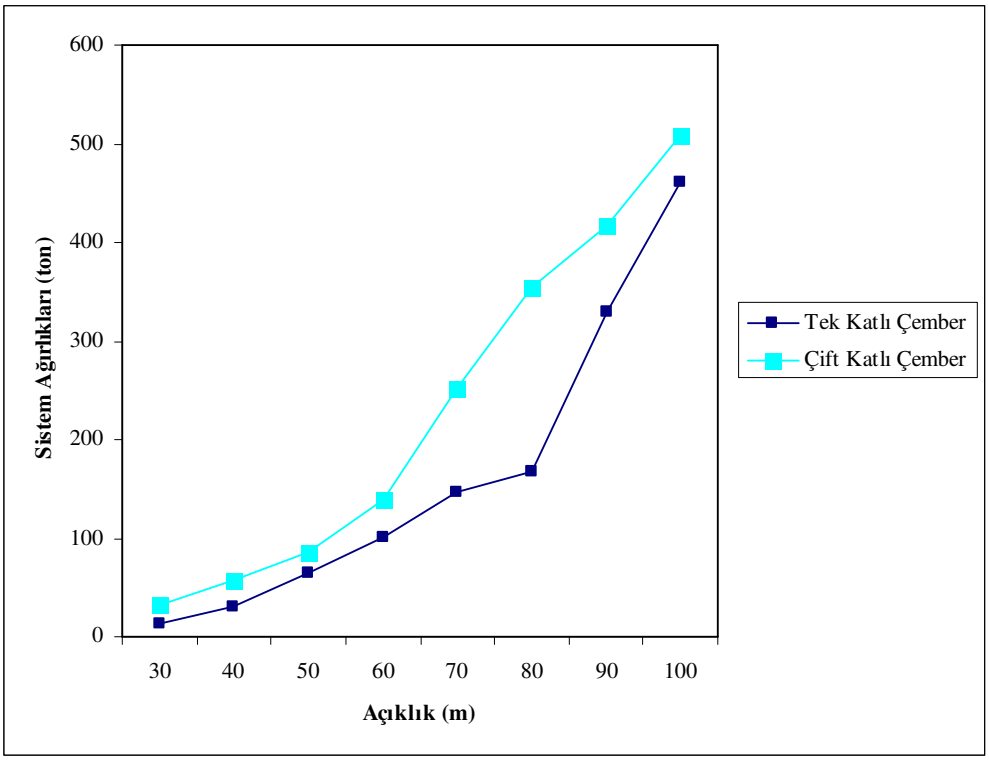



Şekil 7.13. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde ağırlığı en hafif olan tek katlı elips sistemlerdir. Açıklığı otuz metre ve yüksekliği on metredir. En ağır olan sistem çift katlı çember sistemdir. Açıklığı yüz metre ve yüksekliği elli metredir. Tablo 7.10 de tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin sistem ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 7.10. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember (ton) | 13,94 | 29,89 | 63,95 | 101,42 | 146,99 | 167,94 | 330,41 | 461,08 |
| Çift Katlı Çember (ton) | 31,62 | 58,01 | 85,65 | 138,19 | 251,04 | 353,88 | 416,98 | 509,33 |

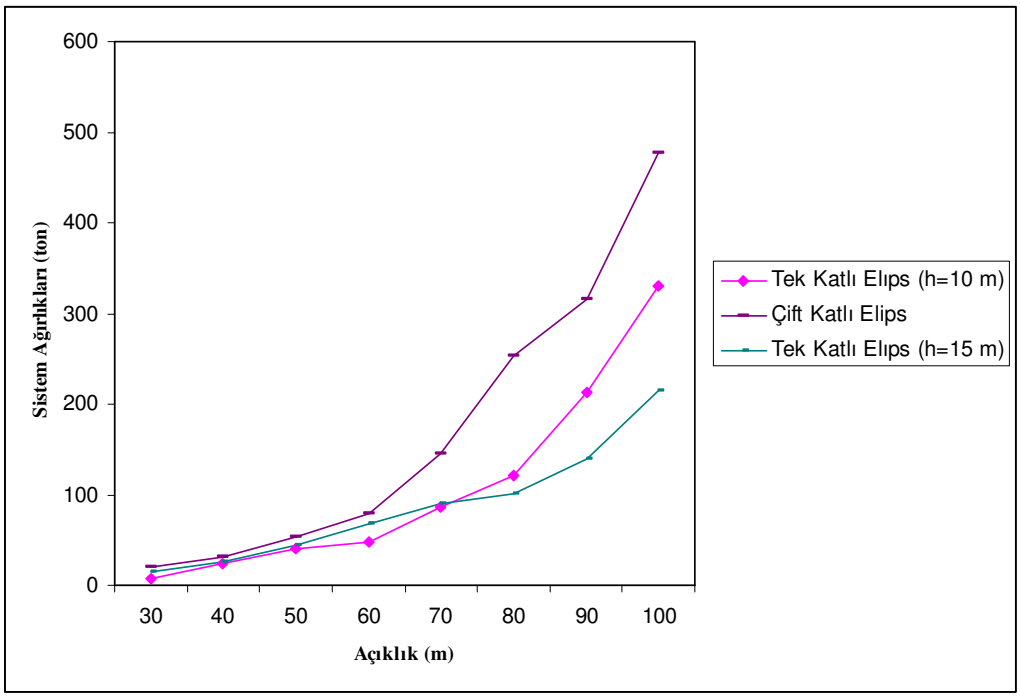



Şekil 7.14. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Çift katlı çember sistemlerin sistem ağırlığı büyük, tek katlı çember sistemlerin ağırlığı küçüktür. Tablo 7.11 da tek ve çift katlı elips sistemlerin sistem ağırlığı verilmiştir.

Tablo 7.11. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Elips (ton)(h=10 m) | 13,94 | 29,89 | 63,95 | 101,42 | 146,99 | 167,94 | 330,41 | 461,08 |
| Tek Katlı Elips (ton)(h=15 m) | 7,03 | 23,52 | 40,73 | 47,84 | 86,64 | 121,89 | 212,42 | 331,12 |
| Çift Katlı Elips (ton) | 20,74 | 31,59 | 53,10 | 78,01 | 145,63 | 252,89 | 315,23 | 476,76 |



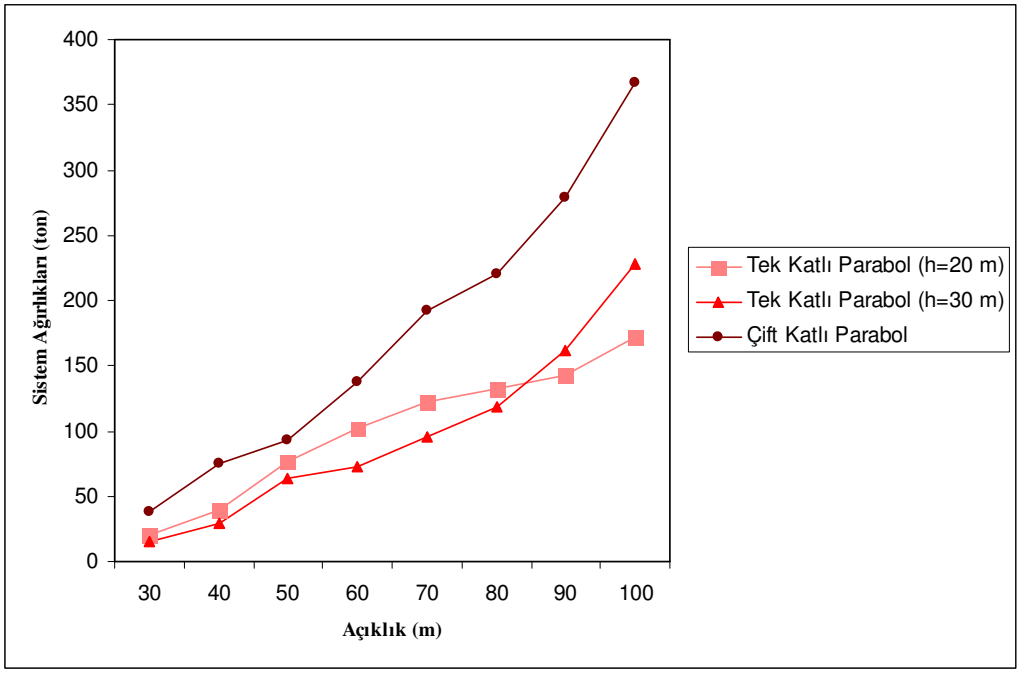

Şekil 7.15. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerde sistem ağırlığı en hafif olan tek katlı elips sistemdir. Açıklığı otuz metre ve yüksekliği on metredir. En ağır olan sistem çift katlı elips olup açıklığı yüz metre ve yüksekliği on metredir.

Çift katlı elips sistemin ağırlıkları büyük, tek katlı elips 10 ve 15 metre yükseklikte 70 metre açıklığa kadar sistem ağırlığı birbirine yakın olurken 70 metre açıklıktan sonra 10 metre yüksekliğindeki sistemlerin ağırlığı daha büyük, 15 metre yüksekliğindeki elips sistemlerin ağırlığı daha küçüktür. Tablo 7.12 de tek ve çift katlı kubbe sistemlerin sistem ağırlığı verilmiştir.

Tablo 7.12. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre sistem ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Parabol (ton) (h=20m) | 15,25 | 29,89 | 64,23 | 72,25 | 95,94 | 118,08 | 161,33 | 228,02 |
| Tek Katlı Parabol (ton)(h=30m) | 20,25 | 38,87 | 77,02 | 101,42 | 122,02 | 132,19 | 142,89 | 172,38 |
| Çift Katlı Parabol (ton) | 38,56 | 74,86 | 93,54 | 138,19 | 191,79 | 220,08 | 278,75 | 366,76 |




Şekil 7.16. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

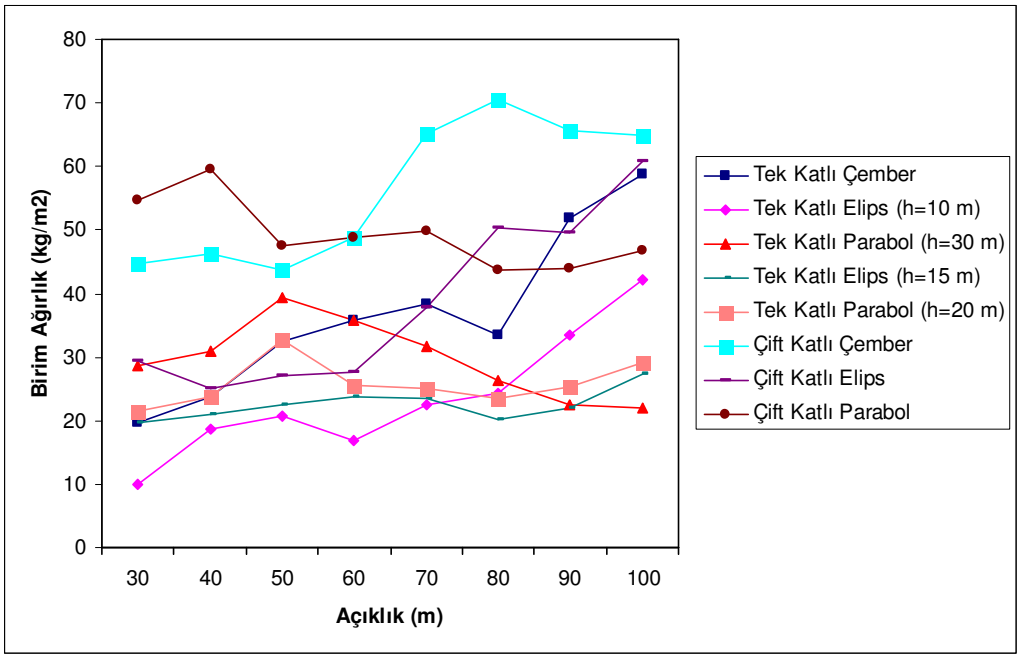
Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerde sistem ağırlığı en hafif olan tek katlı parabol sistemdir. Açıklığı otuz metre ve yüksekliği otuz metredir. En ağır olan sistem çift katlı parabol açıklığı yüz metre ve yüksekliği otuz metredir.

Çift katlı parabol sistemlerin ağırlığı en büyüktür. Tek katlı parabol sistemler 20 ve 30 metre yükseklikte 80 metre açıklığa kadar sistem ağırlığı 20 metre yüksekliğindeki sistemin ağırlığı büyük, 30 metre yüksekliğindeki sistemin ağırlığı küçüktür. 80 metre açıklıktan sonra 20 metre yüksekliğin ağırlığı küçük, 30 metre yüksekliğindeki sistemin ağırlığı büyüktür.

Tablo 7.13 tek ve çift katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının verilmiştir.

Tablo 7.13. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember ($kg/m^2$) | 19,74 | 23,80 | 32,58 | 35,88 | 38,22 | 33,43 | 51,96 | 58,73 |
| Tek Katlı Elips ($kg/m^2$)(h=10m) | 9,95 | 18,73 | 20,75 | 16,93 | 22,52 | 24,26 | 33,41 | 42,18 |
| Tek Katlı Elips ($kg/m^2$)(h=15m) | 19,74 | 20,96 | 22,48 | 23,76 | 23,55 | 20,23 | 22,05 | 27,29 |
| Tek Katlı Parabol ($kg/m^2$)(h=20m) | 21,58 | 23,80 | 32,73 | 25,56 | 24,94 | 23,50 | 25,37 | 29,05 |
| Tek Katlı Parabol ($kg/m^2$)(h=30m) | 28,66 | 30,94 | 39,24 | 35,88 | 31,72 | 26,31 | 22,47 | 21,95 |
| Çift Katlı Çember ($kg/m^2$) | 44,76 | 46,18 | 43,64 | 48,90 | 65,26 | 70,44 | 65,58 | 64,88 |
| Çift Katlı Elips ($kg/m^2$) | 29,35 | 25,15 | 27,06 | 27,60 | 37,86 | 50,34 | 49,58 | 60,73 |
| Çift Katlı Parabol ($kg/m^2$) | 54,58 | 59,60 | 47,66 | 48,90 | 49,86 | 43,80 | 43,84 | 46,72 |

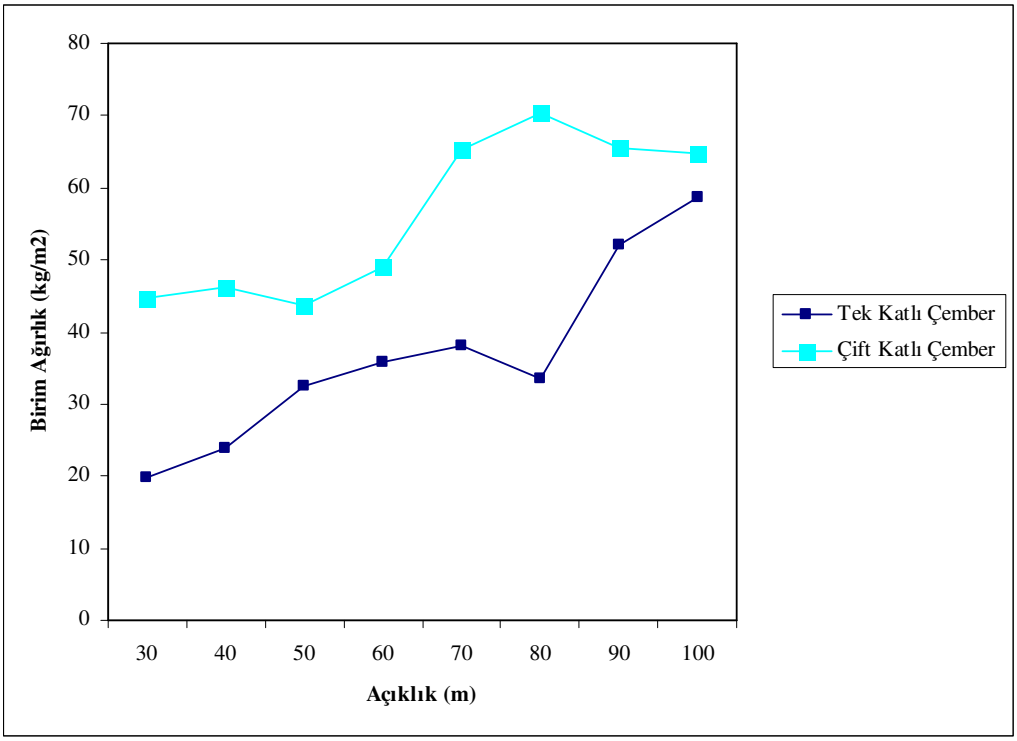



Şekil 7.17. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Birim alan ağırlıklarının minimum değerleri ağırlık karşılaştırılmasında olduğu gibidir. Tablo 7.14 tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin birim alan ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 7.14. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember (kg/m$^{2)}$ | 19,74 | 23,80 | 32,58 | 35,88 | 38,22 | 33,43 | 51,96 | 58,73 |
| Çift Katlı Çember (kg/m$^2$) | 44,76 | 46,18 | 43,64 | 48,90 | 65,26 | 70,44 | 65,58 | 64,88 |



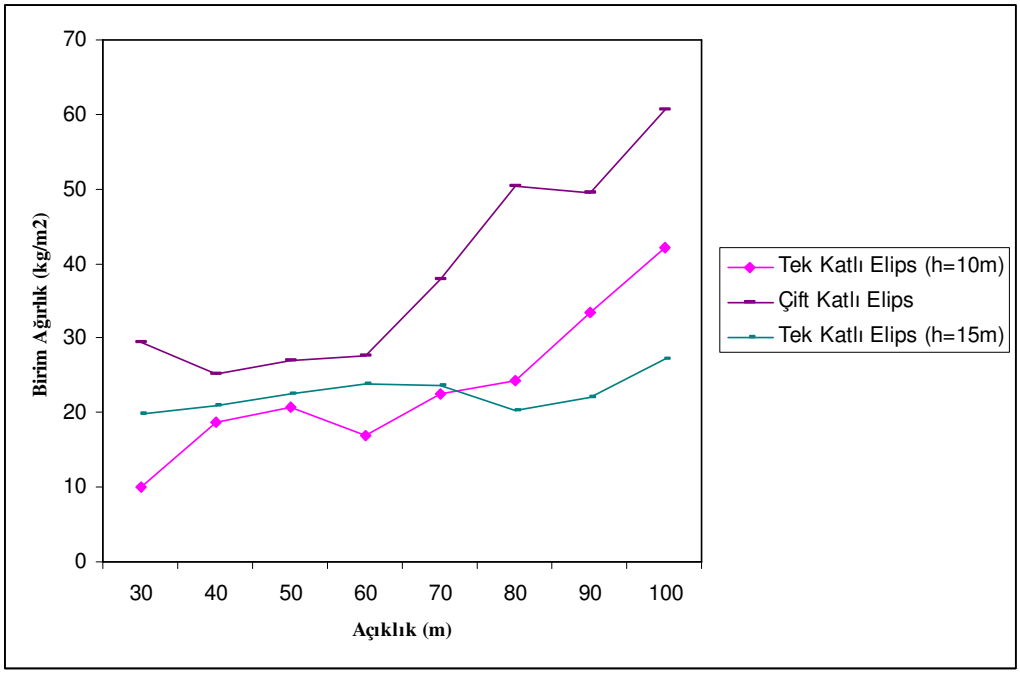

Şekil 7.18. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerde birim alan ağırlığı en küçük olan açıklığı otuz metre ve yüksekliği onbeş metre olan tek katlı çemberdir. Birim alan ağırlığı en büyük olan çift katlı çember açıklığı doksan metre ve yüksekliği kırkbeş metredir.

Çift katlı çember sistemlerin birim alan ağırlığı daha büyüktür. Tek katlı çember sistemlerin birim alan ağırlığı daha küçüktür. Tablo 7.15 tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin birim alan ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 7.15. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Elips ($kg/m^2$)(h=10m) | 9,95 | 18,73 | 20,75 | 16,93 | 22,52 | 24,26 | 33,41 | 42,18 |
| Tek Katlı Elips ($kg/m^2$) (h=15m) | 19,74 | 20,96 | 22,48 | 23,76 | 23,55 | 20,23 | 22,05 | 27,29 |
| Çift Katlı Elips (kg/m2) | 29,35 | 25,15 | 27,06 | 27,60 | 37,86 | 50,34 | 49,58 | 60,73 |



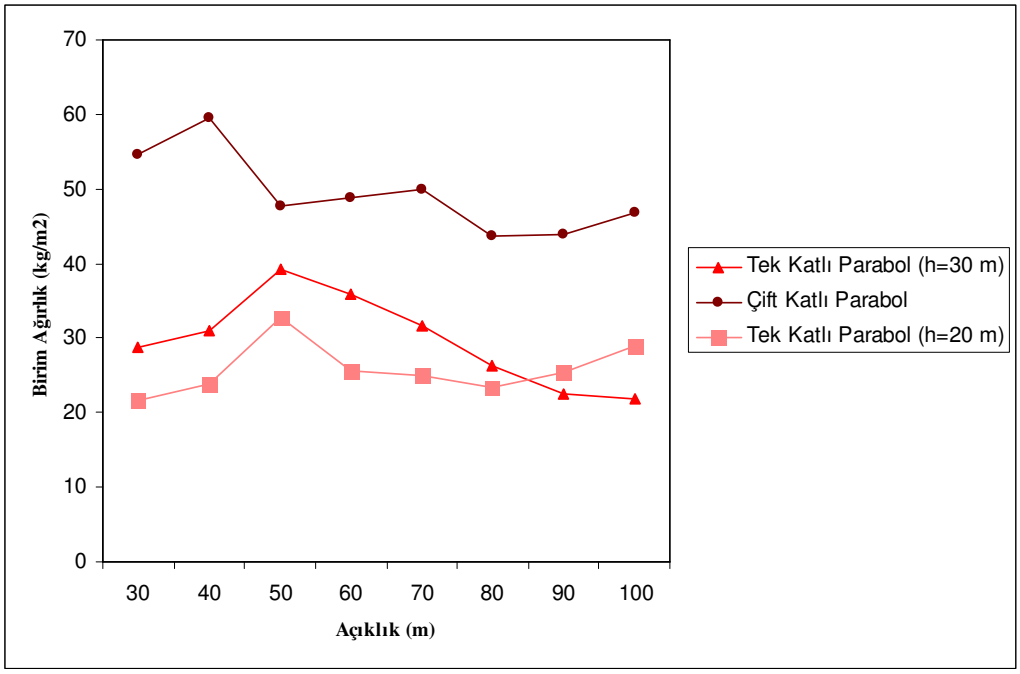

Şekil 7.19. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerde birim alan ağırlığı en küçük olan açıklığı otuz metre ve yüksekliği on metre olan tek katlı elipsdir. Birim alan ağırlığı en büyük olan açıklığı yüz metre ve yüksekliği elli metre olan çift katlı elipsdir.

Birim alan ağırlıklarının minimum değerleri ağırlık karşılaştırılmasında olduğu gibidir. Tablo 7.16 tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin birim alan ağırlıkları verilmiştir.

Tablo 7.16. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin açıklık değişimine göre birim alan ağırlıkları

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Parabol ($kg/m^2$)(h=20m) | 21,58 | 23,80 | 32,73 | 25,56 | 24,94 | 23,50 | 25,37 | 29,05 |
| Tek Katlı Parabol ($kg/m^2$)(h=30m) | 28,66 | 30,94 | 39,24 | 35,88 | 31,72 | 26,31 | 22,47 | 21,95 |
| Çift Katlı Parabol (kg/m2) | 54,58 | 59,60 | 47,66 | 48,90 | 49,86 | 43,80 | 43,84 | 46,72 |




Şekil 7.20. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin birim alan ağırlıklarının açıklığa göre değişim grafikleri

Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerde birim alan ağırlığı en küçük olan açıklığı otuz metre ve yüksekliği yirmi metre olan tek katlı parabol' dur. En büyük olan sistem çift katlı paraboldür. Açıklığı kırk metre ve yüksekliği otuz metredir.

Birim alan ağırlıklarının minimum değerleri ağırlık grafiğinin tersidir.

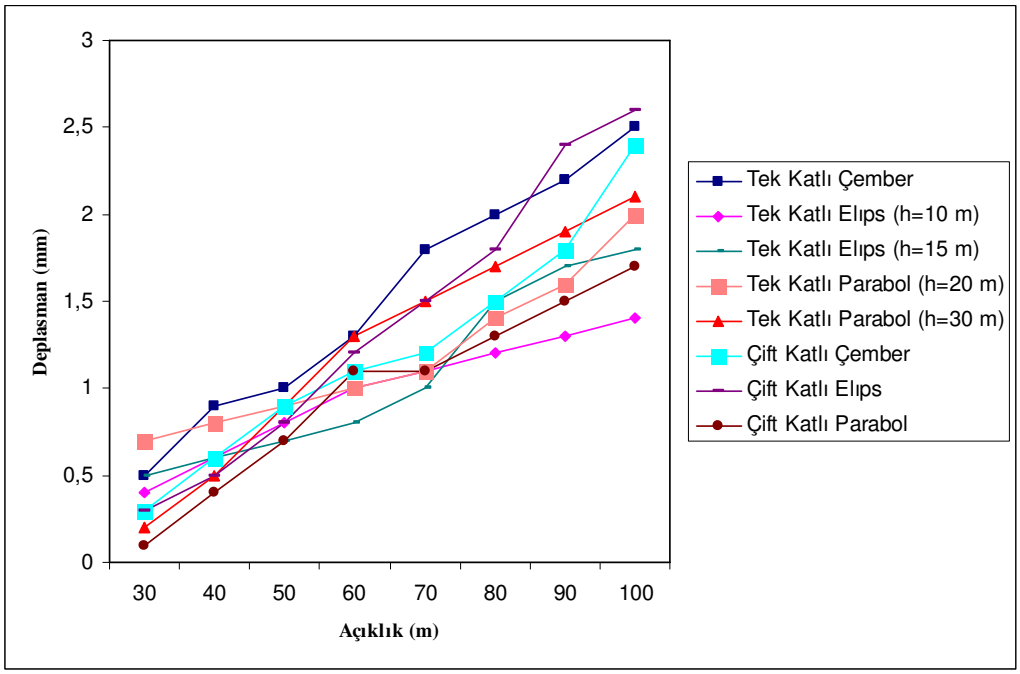
Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde, çubuk boyları çok uzun olduğu zaman, çubuklarda burkulma riski doğmaktadır. Bu riski ortadan kaldırmak için çubuk en kesit alanları artırılır. Bu da sistem ağırlığını artırmaktadır.

Çember, elips ve parabol kubbe sistemlerde çember yayı ile oluşturulan sistemlerin çubuk boyları uzun, elips yayı ile oluşturulan sistemlerin çubuk boyları kısa ve parabol yayı ile oluşturulan sistemlerin çubuk boyları orta uzunlukta olduğu görülmüştür.

Tablo 7.17 de tek ve çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık tabloları oluşturularak grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler tek ve çift katlı çember, elips ve parabol sistemlerin tepe noktası deplasmanları göz önünde bulundurularak düzenlenmiştir.

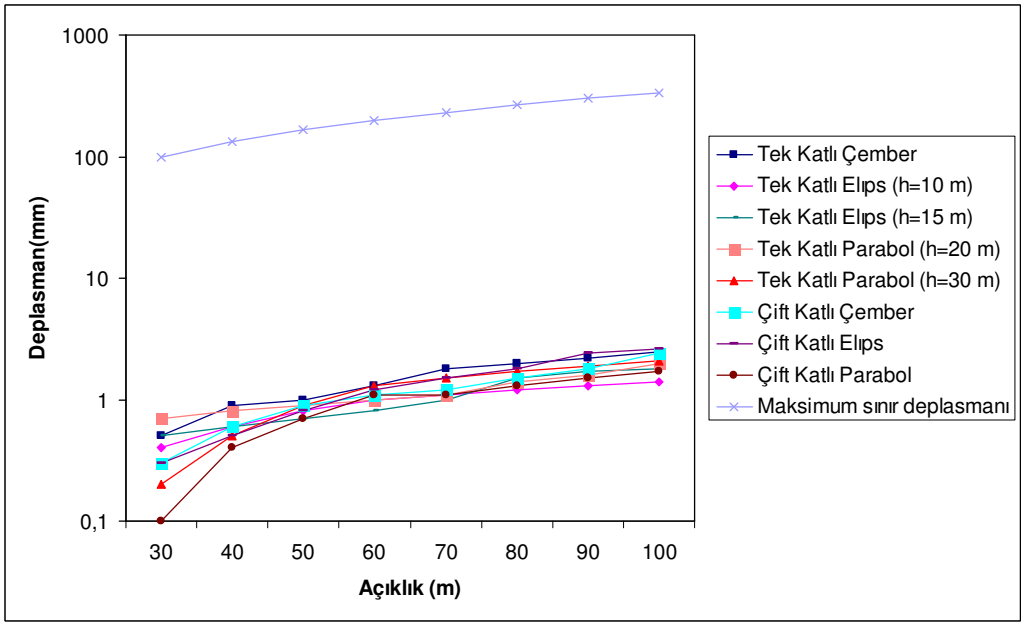
Tablo 7.17. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim değerleri

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember Dep. (mm) | 0,5 | 0,9 | 1 | 1,3 | 1,8 | 2 | 2,2 | 2,5 |
| Tek Katlı Elips Dep. (mm) (h=10m) | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 |
| Tek Katlı Elips Dep. (mm) (h=15m) | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1 | 1,5 | 1,7 | 1,8 |
| Tek Katlı Parabol Dep. (mm) (h=20m) | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 10 | 1,1 | 1,4 | 1,6 | 2 |
| Tek Katlı Parabol Dep. (mm) (h=30m) | 0,2 | 0,5 | 0,9 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,1 |
| Çift Katlı Çember Dep. (mm) | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,4 |
| Çift Katlı Elips Dep. (mm) | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,4 | 2,6 |
| Çift Katlı Parabol Dep. (mm) | 0,1 | 0,4 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,7 |
| Maksimum Sınır Deplasmanı (mm) | 100 | 133 | 167 | 200 | 233 | 266 | 300 | 333 |




Şekil 7.21. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim grafikleri.

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin deplasmanlarına bakıldığı zaman çift katlı çember sistemlerin deplasman değerleri arada kalmıştır.

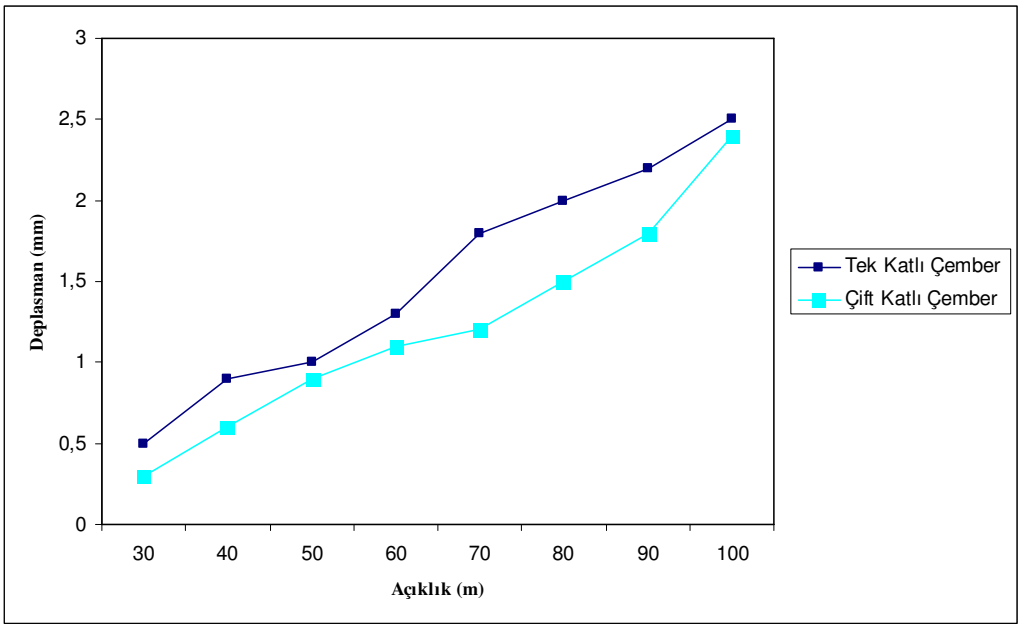



Şekil 7.22. Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanları ve maksimum sınır deplasman açıklık grafikleri

Yarı logaritmik olan grafikte tek ve çift katlı kubbe sistemlerin tepe deplasmanı açıklık ve maksimum sınır deplasman açıklık değerleri görülmektedir. Bütün deplasman değerleri tablo 6.9 da verilen maksimum sınır deplasman değerinden küçüktür. Tablo 7.18 tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin tepe deplasmanları verilmiştir.

Tablo 7.18. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim değerleri

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Çember Dep. (mm) | 0,5 | 0,9 | 1 | 1,3 | 1,8 | 2 | 2,2 | 2,5 |
| Çift Katlı Çember Dep. (mm) | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,1 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,4 |

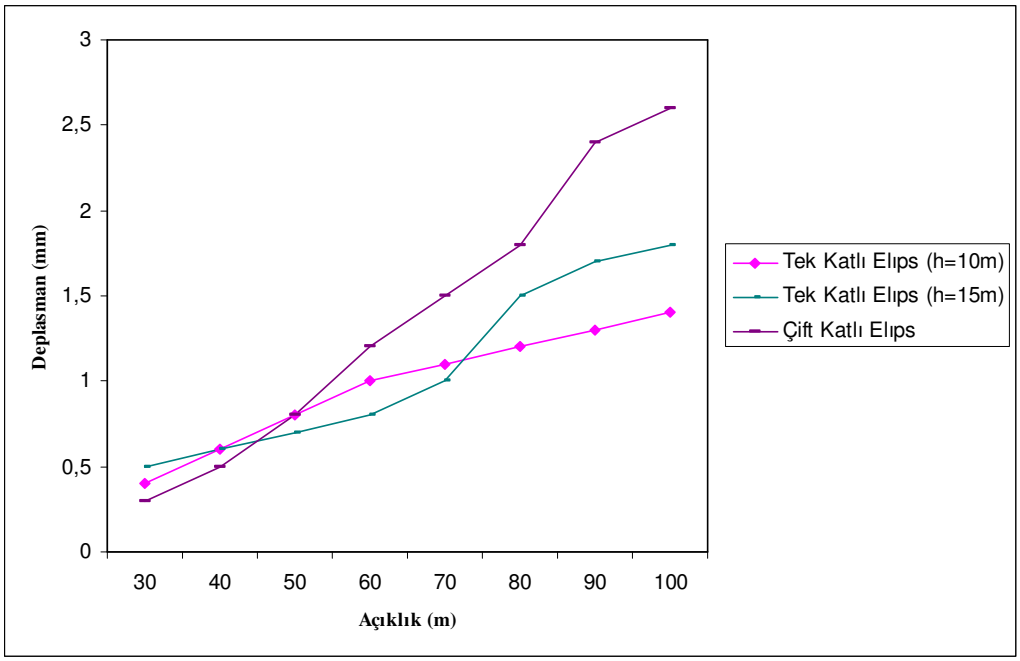



Şekil 7.23. Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim grafikleri.

Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerin deplasman değerlerinde çift katlı çemberin deplasman değerleri daha küçüktür. Tablo 7.19 tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin tepe deplasmanları verilmiştir.

Tablo 7.19. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim değerleri

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Elips Dep. (mm) (h=10m) | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 |
| Tek Katlı Elips Dep. (mm)(h=15m) | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 1 | 1,5 | 1,7 | 1,8 |
| Çift Katlı Elips Dep.(mm) | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 1,5 | 1,8 | 2,4 | 2,6 |



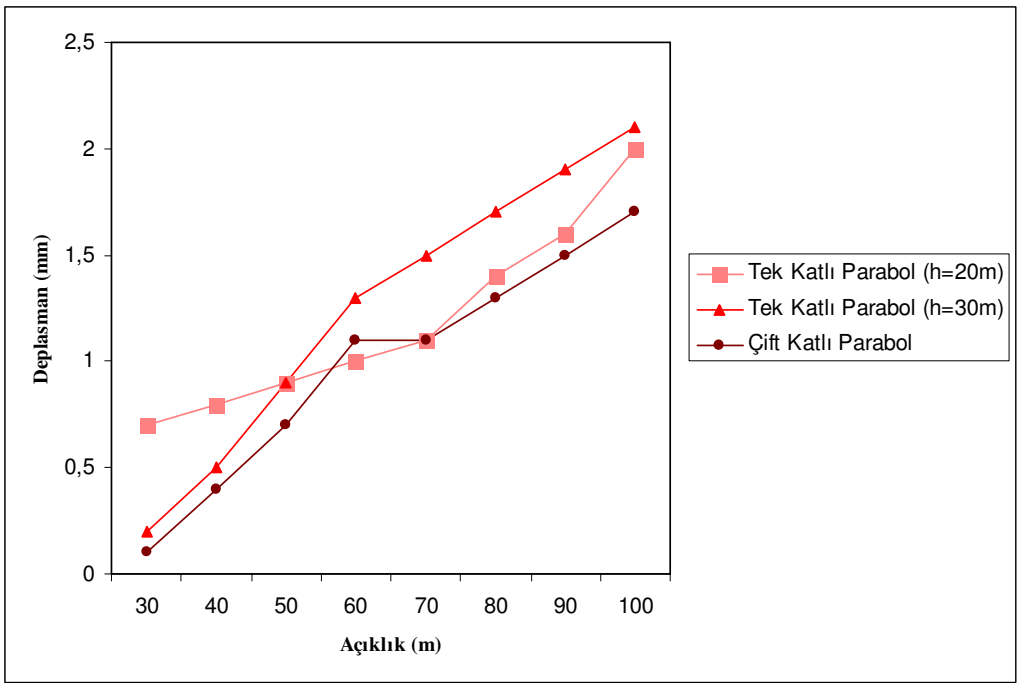

Şekil 7.24. Tek ve çift katlı elips kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim grafikleri

10 metre ve 15 metre yükseklikli tek katlı elips ve çift katlı elips sistemlerde deplasmanlar doğrusal olarak artmaktadır. Çift katlı elips sistemin 50 metre

açıklıktan sonra deplasman değeri artmaktadır. Tablo 7.20 de tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin deplasmanları verilmiştir.

Tablo 7.20. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim değerleri.

| Açıklık (m) | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tek Katlı Parabol Dep. (mm)(h=20m) | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,4 | 1,6 | 2 |
| Tek Katlı Parabol Dep. (mm)(h=30m) | 0,2 | 0,5 | 0,9 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,9 | 2,1 |
| Çift Katlı Parabol Dep. (mm) | 0,1 | 0,4 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,7 |




Şekil 7.25. Tek ve çift katlı parabol kubbe sistemlerin tepe deplasmanı-açıklık değişim grafikleri.

20 metre ve 30 metre yükseklikteki tek katlı parabol ve çift katlı parabolde 60 metre açıklığa kadar deplasmanlar küçük, 60 metre açıklıktan sonra deplasman değerleri artmaktadır.

# 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapı teknolojilerinde hafif, hızlı ve endüstrileşmiş çözümler arayışı uzay kafes taşıyıcı sistemlerin doğmasına neden olmuştur. Bu sistemler büyük açıklıkların kolonsuz ve hafif bir sistem ile geçilmesini sağlayarak işlevsel olarak yapıların daha esnek ve kullanışlı olmasını sağlamıştır. Çelik uzay kubbe sistemlerin projelendirilmesinde amaç, yapının faydalı ömrü boyunca kendisine gelebilecek her türlü etkiyi emniyetli karşılamasını, ekonomik ve fonksiyonel olmasını sağlamaktır.

Çelik uzay kubbe sistemler geçilecek açıklığa göre tek katlı ve çift katlı olarak oluşturulabilir. Günümüzde büyük açıklıkların geçilmesinde sistem neredeyse tek seçeneğe dönüşmüş durumdadır. Betonarme kabuk yapımındaki güçlükler bu sistemleri öne çıkarmıştır.

İnşa edilen bir mühendislik eserinin estetik, dayanıklı, kullanım amaçlarını sağlayan ve ekonomik olması istenir. Bir çelik uzay kubbe sisteminde ekonomik olması diğer birçok neden yanında sistemin ağırlığına da bağlıdır. Sistem ağırlığını minimum yapan çözüm, optimum çözüm olur. Bu tezin konusunda kullanılan kubbe sistemler açıklıkları, yükseklikleri ve geometrik formun çember, elips ve parabol yayı olması değişken olarak alınmıştır. Kubbe sistemlerin ağırlığının minimum olmasını etkileyen kısım açıklık, yükseklik ve etki ettirilen yüklerdir.

Bu çalışmada değişik boyutlardaki altmış dört adet çelik uzay kubbe sistem analiz edilmiştir. Her bir sistemin çelik ağırlığı hesaplanarak, her sistemin ağırlıkları tablolar halinde verilmiştir. Çelik uzay kubbe sistemlerin çözümlerinden belirlenen kesitlere göre her bir sistemin ağırlıkları hesaplandıktan sonra ağırlıkları için eğriler elde edilmiştir. Bu eğrilerin incelenmesinden çalışmaya konu olan bu tip sistemler için aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Tek ve çift katlı kubbe sistemler bugün ve gelecekte uzay sistemlerin önemli bir alt grubu olarak, en etkin taşıyıcı sistemler arasında yerini koruyacaktır.

Tek katlı çember, elips ve parabol kubbe sistemler açıklığın otuz metre ve yüksekliğin on metre olduğu tek katlı elips kubbe sistemlerde ağırlık minimum değer almaktadır. Çift katlı çember, elips ve parabol kubbe sistemler incelendiğinde

açıklığın otuz metre ve yüksekliğin on metre olduğu çift katlı elips kubbe sistemde ağırlık minimum değer almaktadır.

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde endüstrileşmiş üretimin başta gelen koşullarından biri seri üretimdir. Seri üretim çok sayıda, aynı fiziksel ve boyutsal özellikteki elemanın fabrikada üretilmesini gerektirir. Kubbe geometrilerinde ise açıklık büyüdükçe çubuk tipi sayısı arttığından seri üretim mümkün olmamaktadır.

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerde bölme frekansı sayısı sabit kalmak şartıyla açıklığın artırılması sonucu çubuk boyları çok uzun çıkmakta ve çubuklarda burkulma riski doğmaktadır. Bu riski ortadan kaldırmak için çubuk en kesit alanları artırılmaktadır. Bu durum sistem ağırlığını artırmakta dolayısıyla maliyeti de artırmaktadır.

Tek ve çift katlı çember, elips ve parabol kubbe eğri sistemlerde çember yayı ile oluşturulan sistemlerin çubuk boyları uzun, elips yayı ile oluşturulan sistemlerin çubuk boyları kısa ve parabol yayı ile oluşturulan sistemlerin çubuk boyları orta uzunlukta olduğu görülmüştür.

Aynı alanı örten, aynı yüksekliğe sahip ve bölünme sayıları aynı olan tek ve çift katlı kubbe sistemlerin karşılaştırılması yapılırken çift katlı kubbe sistemlerin ağırlıkları tek katlı kubbe sistemlere göre daha yüksek çıkmıştır.

Tek ve çift katlı çember kubbe sistemlerde, yüksekliğin artması, açıklığı da arttıracağından sistem ağırlığını artırmaktadır.

Tek ve çift katlı elips sistemler yüksekliği fazla olmayan, fakat büyük açıklık geçilen basık sistemler olduğu için sistem ağırlığı açıklık arttıkça artmaktadır.

Tek ve çift katlı kubbelerde bölme frekansı da önemlidir. Tek ve çift katlı kubbelerde açıklık arttıkça bölme frekansı sabit olduğu için çubuk boyları da açıklık ve yükseklik büyüdükçe büyük olmaktadır.

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin birim alan ağırlığı, tek katlı kubbe sistemlerde metre kareye düşen kg miktarı düşük çift katlı kubbe sistemlerde yüksektir. Buda sistem ağırlığının alana bölünmesiyle bulunmaktadır.

Tek ve çift katlı kubbe sistemlerin deplasman açıklık değişim grafiklerinin karşılaştırılması yapıldığında çift katlı kubbe sistemlerin deplasmanlarının daha küçük olduğu görülmüştür.

Tek katlı kubbe sistemler orta açıklıklarda en fazla uygulanan sistemlerdir. Tek katlı kubbe sistemlerle otuz kırk metre ‘lik açıklıklar pek aşılmamaktadır. Tek katlı kubbe sistemler çok geniş açıklıkları geçemezler. Geniş açıklıkları geçmeleri için çok büyük enkesitli çubuk elemanlara ihtiyaç gösterirler. Günümüzdeki uygulamaların büyük bir çoğunluğunda tek katlı kubbe sistemler küçük açıklıkların geçilmesinde kullanılmıştır. Küçük açıklıkları çift katlı sistemle geçen yapılarda bulunmaktadır.

Tek ve çift katlı kubbe sistemler üç boyutlu, çok rijit bir yapı tarzıdır. Bu yüzden düşük sistem yükseklikleriyle büyük açıklıklar geçilebilir.

## 9. KAYNAKLAR


Akgün, Ö.R., (1984), "Betonarme Yapı Sistemlerinin Optimum Boyutlandırılması'', Anadolu Üniversitesi Yayınları, No:58.

Akın, S., (1997), "Uzay Kafes Sistemlerin Yapısal Analizi'', Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Arat, A., (1999), "Uzay Kafes Sistemlerin Statik Hesabı Ve Maliyet Analizi'', Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Arda, T.S., (1985), "Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemler'', II. Çelik Yapılar Seminer Notları, Cilt II., Sayfa: 251-319, İstanbul, 16-21 Eylül.

Aşkar, G., (1985), "Çelik Uzay Taşıyıcı Sistemler'', II. Çelik Yapılar Seminer Notları, Cilt II., Sayfa: 239-249, İstanbul, 16-21 Eylül.

A.B.Y.Y.H.Y., (1997), ''Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik'', TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir.

Altınyaldız Firması Bilgi Föyleri, (2005), İstanbul.

Aydın, Z., (2000), "Uzay Kafes Sistemlerin Genetik Algoritma İle Optimum Tasarımı'', Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Bayülgen, C., (1993), "Çağdaş Strüktür Sistemleri'', Y.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Baskısı, İstanbul.

Gökçe , G., (1977), "Başlangıcından Günümüze Kadar Mimaride Strüktür'', Yapı Dergisi, Sayı 23

Gündüz, M.S., (2002), "Çelik Uzay Kafeslerin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi Ve Maliyet Analizi'', Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Keleşoğlu, Ö., (2002), "Lineer Olmayan Uzay Kafes Sistemlerin Bulanık Mantık Yöntemi İle Optimizasyonu'', Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Köksal, T., (1995), "Sonlu Elemanlar Metodu'', Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Makowski, Z.S., (1966), "Steel Space Structures'', London.

Makowski, Z.S., (1984), "Analysis, Design And Construction Of Braced Domes'', Granada Publishing, London.

Makowski, Z.S., (1988), "History Of The Development Of Braced Domes, Proceedings Of IA.S-S. – M.S.U Symposium'', İstanbul.

Meek, J.,Loganathan, S., (1988), "Geometrically Nonlinear Behavior Of Geodesic Domes, Proceedings Of IA.S-S. – M.S.U Symposium'', İstanbul.

Odabaşı, Y., Özgen, A., (1987), "Uzay Kafes Kirişlerin Yaklaşık Statik Hesabı, Boyutlandırma Esasları Ve Ekonomi Etüdü'', III. Çelik Yapılar Seminer Notları, Cilt II., Sayfa: 119-162, İstanbul, 30 Kasım-5 Aralık.

Öztorun, N., (1997), "Uzay Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Karşılaştırılması'', Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özmen, G., (2004), ''SAP 2000 Yazılımında Etkileşimli Veritabanı Uygulamaları'', Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 434, Ankara.

Pierre, D.A., (1992), ''Optimization İn McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology 12, NewYork: McGraw-Hill, PP 476-482

Saka, M.P., (1988) “Optimum Desıgn of Nonlinear Space Trusses’’, Computers and Structures Vol. 30, No. 3, PP. 545-551.

Saka, M.P., Kameshki, E., (1998), ‘‘Optimum Desıgn Of Nonlinear Elastic Framed Domes’’, Journal Of Advances İn Engineering Software, Vol. 29, No. 7-9, pp. 519-528.

Savaşır, K., (1999) “Silindir Yüzeyli Uzay Kafes Sistemlerde Yükseklik Ve Geçilen Açıklık Bakımından Tek Ve Çift Tabakalı Sistemlerin Karşılaştırılması’’ Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Tekgüvercin, Z.D., (2002), “Uzay Kafes Sistemler Tarihi Gelişim Güncel Durum’’, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Turan, M., (1999), ‘‘Uzay Kafes Sistemlerin Lineer Olmayan Davranışının Optimum Boyutlandırılmasına Etkisi’’, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Türkçü, H.Ç., (2003), ‘‘Çağdaş Taşıyıcı Sistemler’’, Birsen Yayınları, İstanbul.

TS 648, (1980), ‘‘Çelik Yapıların Hesap Ve Yapım Kuralları’’,Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS 301/3, (1983), ‘‘Borular-Dikişsiz ve Dikişli Vida Dişi Açılabilir, Vidalı Çelik Orta’’ Türk Standardları Enstitüsü ,Ankara.

TS 498, (1987), “Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri’’, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uman, O., (1989) “Boyu Enine Oranla İki Kat Olan İç Kolonsuz Çelik Yapıda Değişik Düzlem Ve Uzay Sistemlerde Ağırlık Kıyaslamaları’’, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Vural, N. , (2000), “Uzay Kafes Sistemleri Ve Türkiye’deki Uygulamaları’’, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.