



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**ÇELİK YAPILARIN MONTAJ
SÜRECİNDEKİ GÖÇMELER:
VAKA İNCELEMESİ - ISPARTA -
GÖKKUBBE**

Sezer SANCAR

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

TEMMUZ 2021





**ÇELİK YAPILARIN MONTAJ SÜRECİNDEKİ GÖÇMELER:
VAKA İNCELEMESİ - ISPARTA-GÖKKUBBE**

Sezer SANCAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2021

Sezer SANCAR tarafından hazırlanan “ÇELİK YAPILARIN MONTAJ SÜRECİNDEKİ GÖÇMELER: VAKA İNCELEMESİ - ISPARTA-GÖKKUBBE” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Hilmi ÇOŞKUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Başkan: Doç. Dr. Hilmi ÇOŞKUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Uludağ Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 01/07/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,

Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,

Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarımı kabullendiğimi beyan ederim.

Sezer SANCAR

01/07/2021

ÇELİK YAPILARIN MONTAJ SÜRECİNDEKİ GÖÇMELER: VAKA İNCELEMESİ
ISPARTA-GÖKKUBBE
(Yüksek Lisans Tezi)

Sezer SANCAR

ISKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Yönetmelikler, standartlar ve şartnameler, çelik bir yapının beklenen ömrü içinde devrilmediği veya kaykılmadığı sürece stabil olduğunu söylemektedir ki bu yapı ömrüne montaj süreci de dahildir. Yapımın tüm aşamalarında birleştirilmiş kısımların ve tek parçaların stabiliteleri ve ayrıca stabilite üzerinde montaj sürecinin etkileri düşünülmelidir. Genellikle tasarımcı bitmiş yapı ile ilgilenmektedir ancak çelik yapıların yapım süresince de göçmeler olmaktadır. Yapım (montaj) esnasında dikkat edilmesi gereken konular yüklenicinin sorumluluğu olarak görülmektedir. Yapım aşamasında oluşacak olumsuz vakalar doğrudan iş güvenliği konusu olarak düşünülmektedir. Ancak tasarımcı hesaplarında yapım esnasında yapılması gereken payandalamayı ve işlem sırasını belirtmelidir. Asıl yüklenicinin ve çelik montajcısının bunları uygulaması ve rüzgar gibi önemli yüklere veya yapı stabilitesini olumsuz etkileyebilecek olan olası durumlara karşı gerekli tedbirleri alması önemlidir. Geçici payandalamanın tasarımı ve yapılması imalatçı firmaya bırakılmış olsa bile çelik yapı tasarımcısı geçici payandalamanın yerlerini stabilite açısından belirleyebilir. Herhangi bir geçici payandalamanın yapımın hangi aşamasında güvenli bir şekilde sökülebileceği de belirlenebilir. Yapım sürecinin ne kadar önemli olduğu, vakaların incelenmesi yoluyla belirtilebilir.

Çelik yapı montajı esnasında en çok karşılaşılabilen sorunlar olarak; standartlara uymamak, bir plan hazırlamadan montaja başlamak, uygun ekipman kullanmamak ve kalifiye personel çalıştırmamak sayılabilir. Bunların yanı sıra, çelik yapı montajı esnasında geçici payandalamanın yeterli olmaması veya geçici payandalamanın bulunmaması sebebiyle göçmeler olabilmektedir. Ayrıca, geçmiş olaylardan ders alınabilmesi ancak bu olaylar hakkında bilgi sahibi olunması sayesinde olabilir. Bu kapsamda tezin ana odağı çelik kubbe formlarının incelenmesi ve kubbe formlu uzay yapılarının kurulumu üzerine dikkat edilmesi gerekenler, montaj gereksinimleri, her aşamada stabil bir yapı elde edilebilmesinin sağlanması olarak sayılabilir. Literatürdeki bazı yapım sürecinde meydana gelmiş göçme olayları, bunların sebepleri ve bunların nasıl engellenebileceği incelenmektedir. Son olarak montaj esnasında göçmüş bir yapının analiz edilmesi ve göçmenin olası sebepleri ve bunların hangi yöntemler ve gereklilikler ile engellenebileceği araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Aşamalı göçme, montaj, çelik kubbe yapılar, standartlar, payandalama, forensik, kalite, çatı kafes-kirişleri,

Sayfa Adedi : 118

Danışman : Doç. Dr. Hilmi ÇOŞKUN

CASES OF STEEL STRUCTURES' FAILURES DURING ERECTION: CASE STUDY

ISPARTA GÖKKUBBE

(M. Sc. Thesis)

Sezer SANCAR

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

July 2021

ABSTRACT

Regulations, standards and specifications state that when a steel structure is not toppled or tilted over or overturned within the expected life which also includes the assembly process, then that steel structure is said to be stable. The effects of erection processes on the stability of all and stability of the assembled parts and of single parts at all stages of the construction must be considered. Generally the designers' interest is about the finished structure, but failures also occur during the construction of steel structures. Aversion from such failures among other construction tasks are usually thought to be the responsibility of the contractor. Failures during construction are considered mainly as work safety problems. Nevertheless, the designer should specify the bracing during the erection and the construction sequence. The main contractor and the steel erector must implement the construction design and take the necessary measures against important loads such as wind. The designer can determine the places for temporary bracing from stability point of view, even if the design and manufacture of the temporary bracings are left to the contractor or manufacturer. The dismantling of any temporary bracing in a secure way should also be specified. In this paper, the importance of the construction period is emphasized by investigation of a specific case. Some of the failure cases that occur during construction found in the literature are being investigated.

The most common causes during the steel structure assembly are; non-compliance with standards, beginning to assembly without preparing a plan, not using appropriate equipment and not employing qualified personnel. In addition, there have been failures in places where steel structures were assembled without the necessary bracing or where temporary bracing was not made. Finally, lessons can be learned from past events, but this only be possible if we have complete information about these events. In this context, this research has been made on steel structures, and the main focus of the thesis is the examination of steel dome forms and the points to be considered on the installation of dome-shaped space structures, assembly requirements, and ensuring a stable structure. Finally, the analysis of a specific collapsed structure during assembly and the possible causes of the collapse and the methods and requirements to prevent these were investigated.

Key Words : Progressive collapse, assembly, steel dome structures, standards, bracing, forensics, quality, roof trusses,

Page Number : 118

Supervisor : Associate Professor Hilmi COSKUN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin fikir aşamasından son aşamasına kadar yanımda olup her zaman beni destekleyen, cesaretlendiren, yönlendiren ve tecrübesiyle benden değerli yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Hilmi ÇOŞKUN'a saygılarımı sunup, teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam süresince ihtiyaç duyduğum zamanlarda yardımcı olmaktan kaçınmayan, başta Arş. Gör. Halil Çağrı YILMAZ olmak üzere İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli araştırma görevlisi arkadaşlarım ve tüm hocalarım ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca yanımda olup cesaretlendirmesi, güvenmesi ve her zaman destek olması hususunda ayrıca minnet borcu duyduğum eşim Gülay SANCAR'a da teşekkür ederek, son olarak bugünlere gelmemde büyük emekleri olan anne ve babam için şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	18
2.1. İnşa Sürecinde Çöken Çelik Yapılara İlişkin Literatür Taraması.....	18
2.2. Çöken Bazı Yapıların Detaylı Bilgileri	24
2.2.1. Stockholm, İsveç, 2008, ticaret merkezi	24
2.2.2. İsveç, spor salonu çatısı.....	25
2.2.3. Teksas, ABD, 2010, tek katlı depo	26
2.2.4. Rhode Island, ABD, 2015, spor salonu	28
2.2.5. Ilford, UK, 2012, kilise binası	28
2.2.6. Enschede, Hollanda, 2011, FC Twente stadyum çatısı	29
2.2.7. Türkiye'den bazı vakalar	30
2.3. Aşamalı Göçme	31
2.4. Geniş Açıklıklı, Kubbe Formlu Çelik Yapılar	38
2.5. Kubbe Formlu Yapıların Göçme Olayları	50
3. MATERYAL ve METOT	62
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	62
3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	65

	Sayfa
3.3. Yapısal Analiz	66
3.4. Ansys	68
4. VAKA ANALİZİ ve BULGULAR.....	71
4.1. Isparta Gökkuşbe Fuar Merkezi'nin Yapı İncelemesi.....	71
4.2. Yapı Özellikleri.....	72
4.3. Yapının Göçme Durumu	76
4.4. Yapının Modellenmesi ve Olası Göçme Senaryolarının Analizi	85
4.4.1. Analiz 1	86
4.4.2. Analiz 2	91
4.4.3. Analiz 3	95
4.4.4. Analiz 4	99
4.4.5. Analiz 5	100
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR	110
DİZİN	117

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İsveç, Stockholm'deki ticaret merkezi inşaatının göçme öncesi ve sonrası...	25
Şekil 2.2. Göçen I-kiriş.....	25
Şekil 2.3. İsveç'teki spor salonu çatısının göçmesi sonrası	26
Şekil 2.4. ABD, Teksas'taki tek katlı depo inşaatının göçmeden önceki durumu	27
Şekil 2.5. ABD, Teksas'taki tek katlı depo inşaatının göçmeden sonraki durumu	27
Şekil 2.6. ABD, Rhode Island'daki spor salonunun göçme öncesi ve sonrası	28
Şekil 2.7. UK, Ilford'daki kilise binasının göçme öncesi ve sonrası.....	29
Şekil 2.8. Hollanda, Enschede'de stadyum çatısının göçme öncesi ve sonrası.....	30
Şekil 2.9. Uzak kafes sistemlerin geometrilerine göre sınıflandırması.....	41
Şekil 2.10. Kubbe örnekleri	42
Şekil 2.11. Radyal kubbe formu	42
Şekil 2.12. Schwedler kubbe formu	43
Şekil 2.13. Rodos Palace kubbesi	44
Şekil 2.14. Rodos içten görünüm	44
Şekil 2.15. Bell's Sports Centre	46
Şekil 2.16. Bell's Sports Centre içten görünüm.....	46
Şekil 2.17. İskele kurulumu, Bell's Sports Centre	47
Şekil 2.18. Kubbe formları (a) üçgenlere ayrılmış, (b, c) üçgenlere ayrılmamış	48
Şekil 2.19. Köşegen bir elemanın ani kaybına maruz kalan bir kubbenin çökmesi	49
Şekil 2.20. Nervürlü kubbe yapısının önemli elemanları	55
Şekil 2.21. İtalya, Brindisi'deki jeodezik kubbe	56
Şekil 2.22. İtalya, Brindisi'deki jeodezik kubbenin montaj aşaması.....	56
Şekil 2.23. Kubbenin montaj bağlantısının yakın gösterimi.....	57

Şekil	Sayfa
Şekil 2.24. Dügüm noktası örneği, Almanya, Thalkirchner Köprüsü.....	57
Şekil 2.25. Almanya, Thalkirchner Köprüsü, Mero Dügüm Konektörü detayı.....	58
Şekil 2.26. Kubbe davranışı.....	59
Şekil 4.1. Kullanılan çelik malzeme özellikleri.....	73
Şekil 4.2. Yapı kubbesinin modellenmesi	74
Şekil 4.3. Yapının Autocad dosyasından plan görünümü	75
Şekil 4.4. Yapının son halinin Autocad dosyasından alınan çözüm planı.....	75
Şekil 4.5. Yapının sağlıklı bir şekilde tamamlandığı durumun inşa süreci resmi.....	76
Şekil 4.6. Sonradan tamamlanan yapıda iskele farkı ve çaprazların görüntüsü	77
Şekil 4.7. İçten bir görünüm	78
Şekil 4.8. Yapının tamamlanmış hali	79
Şekil 4.9. Yapım devam ederken çekilen bir resim	79
Şekil 4.10. Gökkubbe'nin inşaatı sürerken çekilmiş bir resim.....	80
Şekil 4.11. Göçme meydana geldikten sonraki görüntü.....	81
Şekil 4.12. Göçmüş yapının karşıdan görünümü	82
Şekil 4.13. Göçmenin bıraktığı enkazın resmedilmesi.....	83
Şekil 4.14. Göçme sonrası bir diğer resim.....	83
Şekil 4.15. Enkazın başka bir açıdan çekilmiş yakın resmi	84
Şekil 4.16. Enkaz kaldırıldıktan sonraki saha görüntüsü.....	84
Şekil 4.17. Yapının sağlıklı bir şekilde tamamlandığı varsayılan model.....	86
Şekil 4.18. Yapının rijit kabul edilen HEA 400 profilleri	86
Şekil 4.19. Tüm yapı modelinin analizinde kullanılan eleman ve düğüm sayısı.....	87
Şekil 4.20. Yapının 3D biçiminde modellenme aşamasında bir görünümü	87
Şekil 4.21. Yer çekimi yönünde etkitilen yapının kendi öz ağırlığı.....	88

Şekil	Sayfa
Şekil 4.22. İlk analizde kullanılan ankastre mesnetlerin konumlanması.....	88
Şekil 4.23. Basit mesnetlenme durumları.....	89
Şekil 4.24. Toplam deformasyon miktarı	89
Şekil 4.25. Yakınlaştırılmış gösterim ile sehim durumu	90
Şekil 4.26. Y ekseninde meydana gelen deformasyon değerleri	91
Şekil 4.27. Yapının kurulum aşamasında izlenen yöntem.....	92
Şekil 4.28. Toplam deformasyon	92
Şekil 4.29. Rijit bir iskele ile kurulumun yapılması sonucu toplam deformasyon	93
Şekil 4.30. Y yönünde oluşan deformasyon değeri.....	94
Şekil 4.31. Rijit iskeleli yapının Y yönünde deformasyonu.....	94
Şekil 4.32. Yapının denge mekanizması gözetilerek kurulumu	95
Şekil 4.33. Yapının kendi öz ağırlığı altında incelenmesi.....	96
Şekil 4.34. Kolonlar ile bağlantının sağlandığı ankastre mesnet gösterimleri	96
Şekil 4.35. Kirişlerin makaslara bağlandığı basit mesnetler.....	97
Şekil 4.36. Analiz sonucunda elde edilen toplam deformasyon	97
Şekil 4.37. Y yönünde deformasyon değeri.....	98
Şekil 4.38. Rijitliğin yetersiz olduğu durumun deformasyonu.....	99
Şekil 4.39. Analiz sonucunda Y ekseninde meydana gelen deformasyon değeri.....	100
Şekil 4.40. Tekil kuvvet etkisi	102
Şekil 4.41. Rijit iskeleli yapıda tekil kuvvet etkisi ile oluşan deformasyon durumu.....	102
Şekil 4.42. Daha düşük değerde farklı bir tekil bir kuvvet etkisi.....	103
Şekil 4.43. Düşük tekil kuvvet etkisi ile oluşan deformasyon durumu	104
Şekil 4.44. Deplasman etkisi.....	104
Şekil 4.45. Mesnet bağlantılarının yetersizliği	105

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.46. Deplasman etkisi ile yapının göçme durumu 106



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
b	Profil Başlık Genişliği
°c	Sıcaklık Birimi (Celsius)
cm	Santimetre
D	Çap
Fy	Akma Dayanımı
H	Kubbe Yüksekliği
H/D	Kubbe Yüksekliği / Çap
kg	Kilogram
L	Kiriş Açıklığı
L/b	Kiriş Açıklığı / Profil Başlık Genişliği
m	Metre
m²	Metrekare
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
yy	Yüzyıl

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AISC	Amerika Çelik Yapılar Enstitüsü
ASCE	Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği
ÇYY	Çelik Yapılar Yönetmeliği
EKAP	Elektronik Kamu Alımları Platformu
EN	Avrupa Normları
FE	Sonlu Elemanlar
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
İSG	İş Sağlığı Güvenliği
OSHA	İş güvenliği ve Sağlık İdaresi
RBS	Zayıflatılmış Kiriş Kesiti
SEAA	Amerika Çelik Montajcılar Birliği
SJI	Çelik Kiriş Enstitüsü
TS	Türk Standartları
UK	Birleşik Krallık

1. GİRİŞ

Çelik yapıların tasarımı ve yapımı standartlar ve şartnameler dahilinde hesaplamalar yoluyla güvenli bir şekilde yerine getirilmektedir. ABD'de bu konuda pek çok düzenleme mevcuttur. Bunların başında AISC-360 standardı gelmektedir (AISC-360, 2016). AB'de EN-1090 serisi standartlar ülkeler tarafından benimsenerek ülke standardı olarak kullanılmaktadır (EN-1090, 2008). Türkiye'de benzeri şekilde TS EN 1090 standartlarını benimsemiştir. Ayrıca Türkiye'de yasal olarak çelik yapılar ile ilgili yönetmelik de bulunmaktadır. Tüm bu düzenlemeler içinde yapım-montaj aşamaları ilgili bölümler de yer almaktadır (ÇYY-2016).

ABD'de geçerli olan AISC-360 standardında, montaj aşamasında stabilite için geçici destekler kullanılması gerektiği ifadesi yer almaktadır. AISC-360 ayrıca montaj çizimlerinin de hazırlanması gerektiğini belirtmektedir. EN-1090 standardı epey ayrıntılı bir şekilde montaj aşamalarında yapılması gerekenlerden bahsetmektedir (EN 1090-2). AISC-360 içinde, montajcı firma ve çalışanlar için yeterlilik şartları ve denetim mekanizmasından da bahsedilmektedir ancak bu husus EN-1090 içinde açık şekilde görülmemektedir. ÇYY-2016 metni AISC-360 ile benzerlik göstermektedir ve ayrıca işlerin TS EN 1090'a uygun olarak yapılması gerektiği belirtilmektedir. ÇYY-2016 içinde çelik yapıya ait belgeler kısmında montaj aşaması ile ilgili bir hesaplama, planlama ve çizim yapılması zorunluluğundan bahsedilmemektedir. Şantiye koşullarının hazırlanması, yapısal çelik elemanların montajı ve şantiyede yapılacak diğer işler için TS EN-1090'a atıf yapılmıştır.

AISC-360 ve EN-1090 belgelerinden de açıkça anlaşılmaktadır ki çelik yapılarda montaj aşaması önemli bir konudur. Verilen bu öneme rağmen montaj aşamasında pek çok göçme vakasının yaşandığı da gözlenmektedir.

Göçme vakalarının yasal olarak hassas konular olmalarından dolayı genellikle detaylı inceleme raporlarının elde edilmesi çok zordur. Meydana gelen göçme vakaları dünyanın her yerinde olmakla birlikte özellikle detaylı raporları yayınlanmış olan vakalar için problemi oluşturan sebeplere erişim daha kolay olmaktadır. Ancak ülkemizde bilirkişi raporları aracılığı ile daha detaylı bilgilerin alınması ve göçmenin gerçek sebepleri üzerine yoğunlaşılması nispeten daha zordur.

Bu tez çalışmasında literatürden bulunan çelik yapıların yapım sürecinde meydana gelmiş olan göçme vakalarından bazıları verilmektedir. Bu tezin konusuna bağlı olarak incelenen yapılar daha çok geniş açıklıklı kubbe türü yapılar olup ayrıca montaj süreci devam ederken göçen bir yapı detaylı olarak incelenmiştir. Bu incelemelerde Ansys yapısal analiz programı aracılığı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak göçmenin simule edilmesi sağlanmış ve göçmeye sebep olan muhtemel senaryolar ele alınmıştır. Bu senaryoların analiz edilmesi ile göçmeler hakkında daha net fikir sahibi olunması sağlanmıştır. Böylece sonraki çalışmalarda kaçınılması gerekenler belirtilerek olası iş kazalarının, maddi ve manevi kayıpların en aza indirgenebilmesi için çaba sarf edilmiştir.

Bu tezin amacı çelik yapıların özellikle yapım-montaj sürecinde ne tür önemli problemlerin ortaya çıkabileceğini belirtmek ve böylece aynı türde olayların tekrarlanma riskini azaltmak için neler yapılabileceğini vurgulamaktır. Daha önce yapılmış olan çalışmalar konuya ışık tutacağından detaylıca yer verilmiş olup bu çalışmanın da sonraki çalışmalar için aynı şekilde fayda sağlaması hedeflenmektedir.

Çelik yapılar

Çelik, malzeme olarak; kristal yapıya sahip, belirli bir doğrultuda fiziksel özellikleri ve mukavemeti benzer olan, çekme ve basınç kuvvetlerine dayanım gösteren, homojen ve izotrop yapısal bir malzemedir. Yüksek mukavemeti ve süneklik değerleri ile güvenli bir yapısal malzeme olan çeliğin ham maddesi, cevher hâlinde doğada bulunan demirdir. Ayrıca yapısında %0,2 ile %2 oranlarında değişen miktarda karbon bulunur. Çelik malzemenin bünyesinde barındırdığı karbon oranı arttıkça kopma mukavemeti değeri artar ancak süneklik azalır.

Çelik malzeme ile oluşturulan taşıyıcı sistemlere ise “çelik yapılar” adı verilir. Çelik yapılar genellikle çeliğin yüksek dayanım özelliklerinden dolayı yüksek yapıların inşasında ve geniş açıklıkların geçilmesinde sıklıkla tercih edilir.

Çelik taşıyıcı sistemler genellikle bir dizi farklı kesit kullanılarak oluşturulan standart çelik profillerin montajı ile inşa edilirler. İnşa sürecinde gerekli malzeme boyutları statik hesaplamalar aracılığı ile elde edilir. Çelik yapı sistemlerinin yapımında kullanılan standart boyutlar ve statik değerleri içeren kesit tabloları neredeyse inşaat mühendisliği ile ilgili

güncel referansların tümünde mevcuttur. Üreticiden temini daha ekonomik olduğu için, inşaatlarda bu standart ölçülerdeki kesitler kullanılır. Ancak bu ölçüler tek başına yeterli olmayıp bağlantı tiplerinin doğru seçilmesi ve uygun çerçeveleme sisteminin kullanılması ekonomik ve güvenli bir yapısal tasarımın ön şartıdır. Ayrıca tasarım aşamasında, yapıda kullanılacak olan sistem ve eleman seçimi belirlenirken, bu elemanların birleşim detaylarının da göz önüne alınması ve karşılaştırılması gerekmektedir. Bu hem yapı ekonomisi hem de güvenlik ve kararlılık açısından önemlidir.

Türkiye’de çelik konstrüksiyonun en yaygın kullanım alanları, köprüler, endüstri yapıları, büyük açıklıklı çatılar ve kubbeler olarak sıralanabilir. Yüksek katlı yapılarda ise çelik konstrüksiyon uygulamaları ile daha nadir karşılaşılmaktadır. Çelik konstrüksiyon yapıların, ekonomik olarak betonarme binalara göre daha maliyetli olduğu düşünülse de son zamanlarda yönetmeliklere uygun olarak inşa edilen betonarme binaların maliyetlerinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Yapı hizmet veya servis ömrü ve yenileme maliyetleri de düşünüldüğünde bu maliyet farkının da ortadan kalkacağı rahatlıkla söylenebilir (Çelik Yapılarda Ekonomi).

Belirli bir amaç doğrultusunda tasarımı yapılan ve inşa edilen yapıların hem can güvenliği açısından hem de maliyet açısından düşünüldüğünde belirli ömürlerinin bulunduğu belirtilir. Bu amaçla yapıların hizmet ömrü ve tasarım ömrü gibi farklı tanımlamalar yapılmıştır. Bir yapının veya yapı bileşenlerinin herhangi birisinin, bakım veya onarım için beklenmeyen maliyetler veya bozulmalar çıkarmaksızın kullanılabilirdiği esas süreye hizmet ömrü ya da servis ömrü denmektedir. Hizmet (servis) ömrü, kullanılan malzemelere ve maruz kaldıkları çevre şartlarına, bunların yanında tasarım ve inşaat sürecinin uygunluğuna bağlı olmaktadır. Tasarım, yapım ve kullanım süreci yapının servis ömrünü etkiler.

Çelik konstrüksiyonun dayanım kapasitesi fazladır. Kendi ağırlığı ile taşıma kapasitesi oranı küçük olduğundan yapının tümsel ağırlığı azalmaktadır. Diğer yapı malzemelerine kıyasla çeliğin elastisite modülü yeterince yüksektir. Bu da eğilme rijitliğinin etkin olduğu yerlerde uygun sonuçlar alınmasını sağlar.

Çelik yapıların bir diğer önemli avantajı ise tasarım uygulamaları açısından çözüm çeşitliliğine sahip olmasıdır. Çelik malzeme ile inşa edilen yapılarda, ekonomik boyutlandırma olanağı sağlanmaktadır. Çeliğin, çekme dayanımı ile basınç dayanımının

neredeysi aynı olması sayesinde mimari açıdan pek çok yerde tercih edilir. Ayrıca süneklik seviyesi yüksek olduğundan şekil değiştirme kapasitesi vardır. Bu durum beklenmeyen olaylarda, farklı zemin sınıflarında inşa edilen yapıların istenmeyen oturma hareketlerinde ve deprem bölgelerinde önemli hale gelmektedir.

Çelik konstrüksiyonların atölyelerde imal edilmesi ve işlenmesi, montaj aşamasında hava şartlarından betonarme yapı kadar etkilenmemesi gibi özellikleri yapım süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Ayrıca gerekli durumlarda çelik yapısal elemanlar, takviye yapılabilme ve değiştirilme imkanına sahiptir. Bu elemanların, söküldüklerinde daha az bir maddi kayıp ile tekrar kullanılma olanakları da vardır. Restorasyonun oldukça kolay olduğu çelik yapılarda, inşa sırasındaki kusurların sonradan tespit edilmesi de mümkündür.

Yüksek dayanım, süneklik, rijitlik, elastiklik, kullanılabilirlik, gibi birçok üstün özelliğe sahip olan yapısal çeliğin, önemli sayılabilecek sadece iki temel zafiyete (korozyonlu ortamlarda bakım gerektirmesi ve yüksek ısıda rijitliğinin azalması) sahip olması, yapı inşası yöntemleri için çelik konstrüksiyonu önemli kılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen yüksek ısı durumunda rijitlik kaybını açacak olursak, çelik yapıların yangın durumunda yıkılmaya eğilimli oldukları belirtilebilir. Yüksek ısı derecelerine ulaşılması halinde çelik malzeme mukavemetini büyük ölçüde kaybeder (600 °C’de $F_y \approx 0$). Kapalı mekanlarda çıkan yangınlarda, ısı derecesinin 500 °C’nin üstüne çıkması halinde çelik yapılar hızlıca korunmaya muhtaç hale gelir. Bir diğer dezavantaj, çelik konstrüksiyonun korozyon mukavemetinin zayıflığıdır. Malzemenin kimyasal maddeler veya uzun süre su ile teması durumunda paslanma başlamakta ve malzemenin mukavemeti azalmaktadır. Bu nedenle, çelik yapılar periyodik olarak bakımdan geçirilmelidir (Çelik Konstrüksiyon).

Çelik konstrüksiyon yapıların tarihi

19. yy öncesi dönemlerde daha çok silah ve eşya yapımı amacıyla kullanılan demir malzemesinin, yüksek fırın yöntemi sayesinde çok miktarda demir ve font üretiminin başlaması ile paralel olarak yapı malzemesi olarak kullanılabilmesinin temelleri atılmıştır.

1875 yılından itibaren dövme çelik ve dökme çelik yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çekme mukavemetinin de yüksek olduğu dövme ve dökme çelik ile büyük köprüler inşa edilebilmiştir. 20. yüzyıl ile birlikte, elektrik fırınlarında, ham demirin arıtılması sağlanmış böylece yüksek miktarda dökme çelik üretimine geçilmiştir. 1890 yılı itibari ile dövme çelik, yerini dökme çeliğe bırakmıştır.

Dökme çeliğin daha sık kullanılmaya başlanmasıyla, modern çelik teknikleri ortaya çıkmış ve çelik yapılar alanında önemli ilerlemeler olmuştur. Özellikle Almanya başta olmak üzere diğer Avrupa ülkelerinde II. Dünya savaşıdan sonra, modern çelik yapıların kullanımı yaygınlaşmıştır. Çelik yapıların tarihi gelişimine bakıldığında bilinen ilk yüksek katlı çelik yapının, 1883 senesinde montajı tamamlanmış olan Home Insurance Building (Chicago) adlı yapı olduğu görülmektedir. 1994 yılında meydana gelen Northridge depremi çelik konstrüksiyon yapıların daha güvenilir olması gerektiği üzerine bazı tartışmalara ve araştırmalara dayanak oluşturmuş böylece sünek tasarımın sağlanması ön planda yer edinmiş ve çelik yapıların tasarım ve imalat açısından gelişimi hız kazanmıştır (Çelik Konstrüksiyon Tarihsel Gelişimi).

Çelik yapıların gelişimi beraberinde bazı kuralları da getirmiştir. Çelik yapıların, Amerika'da daha sık kullanılmaya başlanması ve gelişme göstermesi ile birlikte 1921 yılında AISC (American Institute of Steel Construction) kurulmuş ve çelik yapılarla ilgili olarak ilk AISC yönetmeliği 1923 yılında yayınlanmıştır. Bu yönetmelik bilimsel çalışmaların yapılması, çelik yapı göçmelerinden alınan dersler ve bazı deneylerin yapılması ile elde edilen gelişmelere dayanarak birçok kez revize edilmiştir (Galambos, 2016).

Çelik yapı montajı

Çelik yapı elemanları endüstriyel ön-üretimli olup, uluslararası standartlarda belirlenmiş özelliklere göre üretilerek belgelendirilmektedir. Ölçü toleransları mm mertebesinde olduğundan kalifiyeli işçilik ve ilerleyen bölümlerde belirtilecek olan diğer durumların doğru yapılabilmesi şartı ile montajı sorunsuz yapılmaktadır, pratik hesaba uygundur. Şantiyede tamirat gerektirmediğinden, inşaat süresini oldukça kısaltmaktadır. İmalatın atölyede gerçekleşen yüzdesi arttırılarak hem sahadaki iş süresi kısaltılmakta hem de atölye imalatının daha nitelikli olması sebebiyle daha kaliteli üretimler yapılmaktadır. Ayrıca projeye ve standartlara uygunluğu istenildiği zaman denetlenebilmektedir.

Endüstriyel yapılar kapasite artırımını, ekipman değişikliği gibi nedenlerle sık revizyona uğrarlar. Mimari tasarım özgürlüğü ve uzun ömürlü, esnek kullanım sunan çelik yapılar, değiştirme, yenileme, büyütme, küçültme, ekleme, kaldırma, tamir, güçlendirme gibi operasyonlarda kolay, hızlı, sorunsuz ve ekonomik bir tadilat olanağı sağlamaktadır.

Tasarım sırasında güncel yönetmelikler ve şartnameler takip edilerek, en baştan itibaren, montajın kolay ve güvenli yapılabilirliği göz ardı edilmemelidir. Montaj sıralaması göz önüne alınarak planlanmış bir imalat programının, çelik yapıların en önemli kıstası olduğu söylenebilir. Tez kapsamında analizi yapılan kubbe formu çelik yapının montajında bu hususa uyulup uyulmadığı incelenmeye çalışılmıştır.

Montaj nedir, nasıl yapılmalıdır?

Çelik malzemenin üstün nitelikleri sayesinde tercih edilen bir malzeme olması ve birçok yapı tasarımının çelik yapı olarak uygulanması ayrıca imalat kalitesinin belirli standartlar ölçüsünde yapılabilmesi gibi durumlar, çelik malzemenin montaj ve tasarım uygulamasını önemli kılmaktadır. Tezin bu bölümünde çelik elemanların montajı ile ilgili bazı noktalara değinilecektir.

Çelik yapı montajı, çelik yapı elemanlarının fabrikalarda imal edilen parçalarının genel yapı projesine uygun olarak üç boyutlu rijit sistemlerin oluşturulması işlemi olarak tanımlanabilir. Ancak, montajın güvenli bir şekilde yapılabilmesinin ilk şartı olarak bir montaj yönteminin oluşturulması ve çelik yapı montajının, imalat planlamasından itibaren özenle takip edilmesi gerekmektedir. Montaj yöntemi ve iş programı yapılırken, montaj sıralaması, sevkiyat programı, tasarım faktörleri, gibi maddelerin bu kapsamda yer alması gerekmektedir.

Yapısal elemanlar arasındaki bağlantılar ve geçişler ile yapıdaki açıklıklar ve vinç programı tasarım aşamasında ilgili kişiler tarafından önceden belirlenmeli ve belirtilmelidir. Şantiyeye getirilen yapısal montaj elemanlarının (kolon-kiriş-aşık-çapraz-diyagonal vb.) boyutları ve montaj sırasına göre düzenlemesi, yapıda kullanılacak vinç ya da vinçlerin kapasitesi ve yapı sahasındaki pozisyonu, stok ve depolama alanlarının durumu ile ilgili konular önceden çalışılmalı ve planlanmalıdır.

Montaj teknikleri

Montajın başlamasından son montaj elemanının kurulumuna kadar özen ve dikkat terk edilmemelidir. Bununla birlikte yapıda kararlı bir bölge oluşuncaya kadar cıvataların tam sıkılmaması gerektiği önerilmektedir. Özellikle ön germeli cıvata grupları varsa bunların sıkılması en son aşamaya bırakılmalıdır. Sıkma işleminin en rijit parçadan başlanarak yapılmasında fayda vardır.

Montaj elemanlarının taşınması ve yapıya montajı için güvenli yöntemler kullanılmalıdır. Her bir montaj grubunun kurulumundan sonra kullanılan elemanlara ait, hizalamalar kontrol edilmeli, sonraki montaj grubunun kurulum aşamasına geçilmeden önce hatalar varsa düzeltilmelidir.

Yatay ve dikey taşıma elemanları, vinçler, sabit veya hareketli platformlar montaj aşamasında sık kullanılan ekipmanlardır. Bu ekipmanların, periyodik bakımları ve güvenlik önlemleri sıklıkla gözden geçirilmelidir. Vinçlerin konumları belirlenmeli ve kapasiteleri ile kaldırma açıları önceden bilinmelidir. Kule vinçlerin, diğer vinçlere göre yük kaldırma kapasiteleri daha düşük olsa da geniş bir alanı tarayabilmesi ve hızlı montaj yapabilmesi bir avantajdır. Ancak vinçler kurulurken dikkat edilmesi gereken nokta birbirlerine çarpmayacak şekilde konum ve yüksekliklerinin ayarlanmasıdır. Olası güvenlik zafiyetleri giderilmelidir.

İmalat aşamasındaki ve montaj sırasındaki işlerin kontrolü, imalat firması ve yüklenici tarafından TS EN 1090 – 2 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Aynı zamanda TS EN 1090 – 2 Bölüm 6 incelenmeli ve bu bölümde verilen kurallara uygun olarak kurulum gerçekleştirilmelidir. Montajın doğru sıra ile yapılabilmesi için bir çalışma sistemi oluşturulmalı ve montaj sıralaması ve imalat en baştan itibaren özenle takip edilmelidir. Tasarım aşamasında yapılacak olan planlama ve montaj prosedürünün belirlenmesi, kurulumun ekonomik, hızlı ve güvenli bir şekilde tamamlanabilmesinin ön koşuludur.

Montaj ve imalat sıralaması

Montaj prosedürü oluşturulup buna göre iyi planlanmış bir yapı inşasının; montajın kolaylığı, güvenlik, inşaat süresi, maliyet gibi birçok konuda avantaj sağlayacağı açıktır.

Ayrıca montaj yapılırken mantık ölçüsünde bir sıralamanın izlenmesi ve kullanılacak birleşimlerin kolay erişilebilir ve uygulanabilir olması da önemli sayılabilecek kriterlerdendir.

Yapının tamamında ya da belirli bir bölümünde standartlarda tolere edilebilecek şekilde belirtilen kuralların dışına çıkılıp çıkılmayacağı, hangi konularda standartlara tartışmasız bağlı kalınacağı, hangi konularda tolerasyon gösterileceği önceden belirlenmelidir. Her aşamadaki eleman boyutları, bu elemanların yapıda bulunacağı yerleri, vinç konumları, malzeme konumu gibi ilgili konular belirlenmeli ve montaj planında belirtilmelidir. Bir yapı elemanının montajının yapılma süresi, kurulum yapılırken vinç aracılığı ile taşınma ve tutulma süresi, kullanılacak parça sayısı, işin toplam süresi gibi konular montaj öncesi etüt edilmelidir.

Montaj metodu

Çelik bir yapının montaj aşaması, çelik yapının kurulumu için üretilen tüm yapı elemanlarının şantiye sahasına getirilmesi ile başlamaktadır. Montaj aşamasında, yapı elemanlarının birleştirilmesi genelde cıvatalı bağlantılar aracılığı ile yapılmaktadır. Cıvata yerine perçin veya pim sistemlerinin kullanılabilmesi durumlar da mevcut olup bunlar bağlantı durumuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Çelik yapı saha montajında, kaynak ile birleştirme zorunlu olmadıkça tercih edilmemektedir. Montajın çoğu, cıvatalı olarak tercih edilmektedir. Cıvatalı birleştirmenin avantajları şu şekilde sıralanabilir (Çelik Yapı İmalatı).

- Montaj kolaylığı,
- Montaj hızı,
- Standartlara uygun kurulum,
- İmalat kontrolünün kolaylığı,
- Montajın hava şartlarından az etkilenmesi,
- Kolay tamirat ve tadilat,

Yapı durumlarına bağlı olarak montaj işlemi vinç, mobil ya da sabit platformlar aracılığı ile yapılır. Kullanılacak olan çelik ürünlerin ağırlık durumları ve hacimsel büyüklüklerine göre

yapıda kullanılacak vinç türü inşaatın başlamasından önce belirlenmelidir. Yapının iç bölümlerinde rahat hareket etme kapasitesi olduğu için mobil vinçlerin tercih oranı yüksektir. Yapı kurulum alanı içinde, vinç kullanılacaksa, tehlike yaratması muhtemel bölümlerin montaj işlemi tamamlandıktan sonra kullanılması sağlıklı olacaktır.

Birden fazla vinç aynı anda çalışacaksa, bunların çalışma sırasında birbirlerini olumsuz etkileme durumlarına yol açabilecek konum ve yükseklik ayarlaması yapılmalıdır. Bu sayede muhtemel çarpışmaların da engellenerek kurulumun yapılması sağlanmalıdır. Bu şekilde çalışılması durumunda çelik yapı montajları daha kolay, hızlı ve güvenli bir şekilde yapılabilecektir.

Yapısal ürünlerin montajının daha kolay yapılabilmesi, bu ürünlerin vinçler ile istenilen yükseklik ve açıda kaldırılması daha sonra birleşim yerlerinde cıvatalama yapılıp sabitlenmesi ile mümkündür.

Montajı yapacak olan personel, yetkililer tarafından daha önce hazırlanmış olan montaj prosedüründe belirtilen sıralamayı dikkate alarak sabitleme ve montaj işlemlerine başlar. Hazırlanmış olan bu prosedürler, kurulumun daha hızlı, daha güvenli ve daha kaliteli bir şekilde yapılmasına olanak tanır. Yapıların, farklı bölümleri için üretilen elemanlar, farklı ölçülere ve farklı özelliklere sahip olabilir. Bu yüzden hangi ürünün montajının nereye yapılacağı projede anlaşılır bir şekilde ve detaylıca belirtilmelidir.

Çelik konstrüksiyon imalatı yapmak için bir diğer önemli nokta, mekan genişliğinin sağlanmasıdır. Yapı kurulumundan önce sağlıklı bir çalışmanın yapılabilmesi, nakliye, boşaltma ve yükleme işlemleri ile montajın sorunsuz gerçekleştirilebilmesi amacıyla geniş bir imalat ve kurulum alanı gerekmektedir.

Montaj işlemine tabi tutulan bir yapı elemanı, diğer bağlantı üyelerini de etkileyebilmektedir. Bu yapı elemanının diğer üyelerin durumlarını olumsuz etkilememesine dikkat edilmelidir. Montajı yapılmakta olan elemanın sisteme güvenli bir şekilde tutturulabilmesi için geçici bir destek kullanılmalıdır.

Geçici montaj elemanlarına çaprazlar örnek olarak verilebilir. Çaprazlar iki ayrı şekilde olabilir. Bunlardan biri geçici çaprazlardır. Geçici çaprazlar, sistemin stabilitesini sağlama

görevini, tüm elemanların montajı tamamlanıncaya kadar sürdürürler. Montaj çaprazları ise tekil elemanlara stabilite kazandırmak için kullanılırlar. Montaj sırasında, bazen tekil elemanların bazen de yapının kısmi olarak tamamlanmış bölümleri için bahsedilen geçici elemanlar kullanılmalıdır.

Yanal yüklere karşı koymak için yapılan destekleme tipleri

İnşa edilen yapıların, depremin, rüzgarın veya diğer etki unsurlarının getirdiği olumsuzluklara dayanım gösterebilmesi son derece önemlidir. Yapı göçmesi olaylarından elde edilen tecrübeler bu konuya eğilimi arttırmıştır. Mühendisler, yapılar üzerindeki dış etkenlerin olumsuzluklarını en aza indirgeyebilmek amacıyla farklı yapı sistemleri veya yapısal elemanlar geliştirmiştir.

Daha sağlıklı çözümlerin elde edilebilmesi için yapılarda oluşması muhtemel yatay deformasyonları kısmen veya tamamen sınırlandıran yapısal elemanların kullanılması gerekmektedir. Bu elemanlar çelik yapılarda çapraz adı verilen desteklerdir.

Çelik malzemeden oluşan yapı elemanlarının diğer önemli problemlerinden biri de burkulma davranışıdır. Burkulma, bir elemanın kritik bir basınç yüklemesinden sonra stabilite kaybına uğrayarak yanal deformasyon yapma eğilimi olarak adlandırılabilir (Burkulması Önlenmiş Çelik Çaprazlar).

Burkulma davranışı eğer önlem alınmaz ise çelik kesitlerde basınç kapasitelerine ulaşmadan göçmeye sebebiyet verir. Euler'in ideal burkulma davranışına göre bir elemanın burkulmaması için ya yanal desteklerle eleman burkulma boyu düşürülmeli ya da kesit rijitliği artırılarak kritik burkulma yükü arttırılmalıdır (Augenti ve Parisi, 2013).

Çelik bir çerçevede destekleme sistemleri yapının önemli bir parçasını oluşturur. Destek sistemi kirişleri stabilize eder ve yük etkilerinin dağılımına katkıda bulunur. Yanal yüklemeye karşı mukavemeti arttırmak için çerçeveye ilave elemanlar eklenir. Bu şekilde yanal sınırlama sağlanır ve kiriş başlıklarının yanlara doğru hareketi engellenerek sistem oldukça rijit bir duruma getirilir. Bilinen bir noktada elemanın plan dışı yanal hareketini sınırlandırmak için çelik çerçeve elemanlara ilave destek sistemleri yapılarak burulma etkisine karşı koyması beklenir. Bu yanal destekleme elemanları eş merkezli (konsantrik) ve

dış merkezli (eksantrik) olabilir. Bu desteklerin çekme ve basınç etkilerini karşılamaları beklenir. Çerçeve düzleminde yer alan çapraz destekler sayesinde yanal yüklere karşı koyan rijit bir çerçeve elde edilmeye çalışılır.

Montajda dikkat edilmesi gereken hususlar

Çelik yapı montajının, projede belirtilen sıraya uygun olarak yapılması ilk ve en önemli durumdur. Bunun dışında aşağıda maddeler halinde dikkat edilmesi gereken diğer durumlar belirtilmiştir.

- Montaj yapılırken gerekli durumlarda geçici bağlantıların kullanılmasından kaçınılmamalıdır.
- Çatı aşık ve merteklerinin olası aks kaymalarının engellenmesi sağlanmalıdır.
- Kurulum yapılırken, elamanların bükülmemesi, burulmaması ve ayrılmaması sağlanmalıdır. Bunlara sebep olabilecek zor kullanımlarından kaçınılmalıdır.
- Yapı elemanlarını hizalamak amacıyla hafif çekmeler tolere edilebilir. Ancak aşırı olabilecek çekme ve germelerden kaçınılmalıdır.
- Şartnamelere uygun olacak şekilde imalat yapılmalıdır.
- Kontrolör firma tarafından onay verilmeyen montaj elemanları kullanılmamalıdır.
- Şantiye sahasına gelen malzemenin düzenli bir şekilde istiflenmesi ayrıca eksik olup olmadığı kontrol edilmelidir.
- Yapılacak olan işin durumuna göre sahaya hareketli bir iskelenin kurulumu ile montaj yapılabilir.
- Vinçler tarafından kaldırılan kirişlerin montajlanması sırasında hizalamanın düzgün yapılıp cıvata deliklerinin üst üste getirilmesi sağlanmalıdır.
- Montaj tamamlanmadan cıvataların tam olarak sıkılmaması gerekir.
- Çelik yapı kurulumu için gerekli olan tüm çizimler verilmelidir.
- Montaj elemanlarının plan ve kesitlerinin ulaşılabilir olması gerekir.
- Birleşim elemanlarının detayları açıkça gösterilmelidir.

Güvenli bir montajın sağlanabilmesi için tüm bunların yanında montaj başlamadan önce tasarım aşamasında alınan kararlar da önemlidir. Tasarımcılar için, kurulum başarısı hedef

olmalıdır. İyi bir saha koordinasyonunun sağlanması, projenin daha kolay yürütülmesini sağlayacaktır (Çelik Yapı İmalatı).

Çelik yapıların montaj ve kurulum kolaylığı sayesinde sanayi yapılarında kullanımı oldukça yaygındır. Ancak, okul, hastane, alışveriş merkezleri gibi önem derecesi yüksek yapılarda ve çok katlı konutlarda çelik yapıların tercih edilme oranı gittikçe artmaktadır. Bu tür çelik konstrüksiyon yapıların inşası için kalifiye personeller ile işin yapılması oldukça önemlidir. Teknik yeterliliğe sahip, deneyimli bu personeller aracılığı ile güvenli çalışmalar yapılabilecektir. Ayrıca İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliklerine göre sertifikalı personellerin çelik konstrüksiyon yapıların montaj işlemleri için çalıştırılması önerilmektedir. Bu sayede montaj aşamasında karşılaşılabilecek olan olumsuzlukların asgari düzeye indirilmesi hedeflenmektedir. Olası bir teknik aksaklığın yaşanmaması için iş makinelerinin de periyodik bakımları yapılmalıdır.

Bazı durumlarda inşaat çalışmalarını hızlandırmak amacı ile çerçeve kolonlarının ara bağlantıları yapılmadan veya ankraj somunlarının bir kısmı takılmadan öteki kolonların montajına başlanmaktadır. Böyle durumlarda geçici çaprazların veya çerçevelerin montajı eksik kalacağından olası bir fırtınada veya küçük bir depremde bile yapı kurulum aşamasında iken devrilebilmektedir.

Bu tür durumların engellenmesi amacı ile yapı kolonlarının kurulumu yapıldıktan sonra çapraz veya çerçeve kirişlerinin montajı projeye uygun ve tam olarak yapılmalıdır. Çatı makaslarının, kolonlara bağlanması esnasında, kolonlar arası mesafenin projede belirtilenden daha kısa olması gibi boyutsal uyumsuzluklar sebebi ile kolon başlarının çekilerek veya gerdirilerek bağlanması sakıncalı olacaktır. Çünkü montajdan sonra yapıya etkiyen düşey yükler bu bağlantı noktalarında kesme kuvvetinin aşılmasına yol açacak ve çatının çökmesine sebep olacaktır (Çelik Yapı Şantiye Uygulamaları).

Kolonları çaprazlarla bağlanmış; enine yönde bir kısım çatı makasları veya çerçeve kirişleri gibi montajı tamamlanmış yapı bölümlerinde yapının bir ucundan aşık ve çatı çaprazları montajına başlanır. Çatı çaprazlarının ve aşıkların montajına, enine yöndeki çatı makaslarının ve ilgili yerdeki çerçeve kirişlerinin montajının tamamlanmasından sonra başlanır. Çatı aşıklarının projelendirilmesi basit kiriş, gerber kirişi veya sürekli kiriş şeklinde olabilir. Bunlardan hangisi seçilecekse, taşıyıcı sisteme uygun bir şekilde çatı kirişlerine

cıvatalar kullanılarak bağlanmalıdır. Aşıkların burkulma boyunun kullanılması gereken şartnamelere uygun olmasına dikkat edilmelidir. Bu şekilde yanal burkulmanın engellenmesi sağlanacaktır.

Çelik katlı otopark, alışveriş merkezi, okul, hastane veya çok katlı konut yapılarında genellikle kolon kesitleri HEB, HEM ve HD profilleri ile kiriş kesitleri ise HEA, IPE gibi profiller ile inşa edilir. Yapısal çelik elamanlarının imalat ve montaj aşamalarına ait genel ve teknik esasların uygulamalarında TS-EN 1090-2 de verilen ilgili koşullara uyulması gereklidir.

Montaj ön aşaması

Yapısal imalatçı, kiriş tedarikçisi ve montaj ekibi seçildikten kısa bir süre sonra, her bir adımı belirlemek için bir toplantı yapılmalıdır. Bu toplantıda yüklenici, imalatçı, yönetici, şef ve yapı sahibi gibi etkili kişiler hazır bulunup sevkiyat programı dahil, bir çok önemli konu montaj öncesi konuşulup belirlenmelidir. Ayrıca montajın başlayacağı alan, vinç kapasitesi, vinç hareketlerine engel bir durumun olup olmadığı, yeterli çalışma alanının olup olmadığı, malzemenin erken mevcudiyeti ve temel iş planının varlığı gibi etkenlerin kontrol edilmesi önemlidir.

Montajcı her bölüm için ne kadar montaj süresi gerekeceğini belirlemeli ve olası kötü durumlar için her koşula hazırlıklı olacak şekilde teslimatları programlamalıdır. Montaj aşamasının sağlıklı olması için üretim ve korumanın da sağlıklı olması gerekmektedir. Yapısal elemanların montajından önce imalat aşamasına da dikkat edilmelidir.

Yapısal elemanların şantiyeye taşınması esnasında veya öncesinde hasar görmüş olan bazı yapı elemanları montaja dahil edilirse bütün bir yapının göçmesine olanak verebilir. Hasarlı veya eksik olan bir malzeme mutlaka not edilip tedarikçi ve montajcıya bildirilmelidir. Montajın başlama aşamasından önce gerekli şakül ayarları ve somunların kontrolü de önemli bir konudur. Bütün bunlar zaman harcama gibi düşünülse de montaj esnasında kolaylık sağlayacaktır.

Montajlı yapılarda kullanılmak üzere üretilen yapı parçalarının ne kadar iyi ve dayanıklı olduğu sadece üretimlerine değil aynı zamanda kurulumlarının iyi olmasına bağlıdır. Bir

kiriş üreticisi dikkate değer bir iç mukavemete sahip giriş ürünleri tasarlayabilir ve inşa edebilir. Ancak bu ürünlerin var olan mukavemeti gerçekte gösterip gösteremeyeceği hem ne kadar iyi kullanıldığına hem de ne kadar iyi kurulduğuna bağlıdır. Aynı zamanda sağlıklı montaj açısından ürünlerin şantiye sahasında depolanması ve montajı için bir iş yöntem ve planının izlenmesi gereklidir.

Çalışanları da ürünü de korumak için geliştirilen bazı sistemler vardır. Kullanmak üzere seçilen sistem türlerine bakılmaksızın, tasarımlar kalifiyeli elemanlar tarafından yapılmalıdır. Ayrıca çalışanlar da sistemin doğru kullanımını konusunda eğitilmelidir.

Köprüleme/Kenetleme

Kirişlerin güvenli montajının en önemli yönlerinden biri de düzgün köprülemedir. Köprüleme, inşaat yüklerinin montajı ve yerleştirilmesi sırasında kirişleri yanal yer değiştirmeye karşı koruyan çelik giriş sisteminin bir bileşenidir. Yanal yer değiştirme, inşaat yükünün kirişlerin deforme olmasına ve devrilmesine neden olduğu anlamına gelir. Bu durum hem montajda çalışanların hem de kirişlerin yüksekten düşmesine neden olabilir. Bu tür olayların yaşanmaması için olası tehlikeleri belirleyen şantiyeye özgü planlamaların iş öncesi tamamlanması ve geliştirilmesi gerekir. Son olarak olası tehlikeleri ortadan kaldırmaya yönelik sistem ve prosedürlerin uygulanması bu süreci tamamlar (Green ve Holterman, 2008).

Köprüleme işleminin düzgün çalışabilmesi için sabitlenmesi gerekir. Sabitleme işlemi çelik bir duvar girişi veya yapının başka bir stabil bölümü kullanılarak yapılabilir.

Kaldırma halatları serbest bırakılmadan veya herhangi bir montaj elemanının kirişler üzerinde bırakılmasına izin verilmeden önce belirtilen girişlerin tipine ve uzunluğuna bağlı olarak iki kriterin karşılanması gerekmektedir. Bunlar; gerekli montaj köprüsünün kurulması ve en az bir ucun her iki tarafı da destekleyici şekilde yapıya bağlanmasıdır. Yerine yerleştirilen girişlerin diğer özel gereksinimleri var ise şantiyede mühendis veya yetkili diğer kişilerden bilgi alınmalı ve giriş montaj çizimlerine bakılmalıdır.

Bazen merkezdeki X tipi köprüleme döşemedeki girişlere cıvatalanır. Daha sonra vinç ile giriş sabitlenirken bir montaj çalışanı köprülemenin gevşek ucunu yapı üzerindeki mevcut

kirişe bağlar. Bu uygulama genellikle daha önce yerleştirilmiş ve köprüleme kirişlerinin alt başlıklarını taşıyan bir yürüme tahtası üzerinde durarak yapılır. Belirli tasarım uygulamalarında kirişler alt başlığa dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Çünkü bu kirişlerin ağırlık merkezleri daha yüksek olduğu için dengesizlik sergiler. Aynı zamanda yüksek ağırlığa sahip olan bu kirişler yerleştirilirken ek bir X tipi köprüleme ile de desteklenmelidir. Herhangi bir kirişin en az bir ucundan takılı olduğunun ve gerekli montaj köprülemesinin kurulup sabitlendiğinden emin olunmalı ve ancak sonra diğer kirişlerin montajına başlanmalıdır. Güvenli olmayan kirişlerin dönebileceğini ve devrilebileceğini asla unutmamak gerekir. Son olarak kirişin takılmayan ucu varsa her iki tarafı kaynaklayarak veya cıvatalayarak takmak gerekecektir.

Bir diğer önemli nokta olarak karşılaşılan durum uyumsuzluktur. Kirişler diğer malzemeler ile sağlıklı bir uyum sağlamıyorsa, izinsiz kesilmemeli veya değiştirilmemelidir. Alan değişikliği gerekli ise yetkili mühendis ve kiriş üreticisinin mutlak izni alınmalıdır.

Her iki yönde kolonlar arasında çerçevesiz kirişlerin olmadığı yapılarda, kirişler yanal stabilite sağlamak için kolonlara veya kolonların yakınında cıvatalanmalıdır (OSHA Çelik Montajı, 2006).

Genel olarak köprüleme yatay köprüleme ve diyagonal köprüleme olarak sınıflandırılır. Yatay köprüleme iki sürekli yatay çelik elemandan oluşurken bu elemanlardan biri üst başlığa diğeri alt başlığa tutturulmuştur. Kiriş ile yapılan her bağlantı kaynak veya cıvatalama ile yapılır. Çapraz köprüleme ise komşu kirişlerin üst ve alt başlıklarına bağlanan çapraz desteklerden oluşur. Ayrıca çapraz parçaların kesiştiği yerde de bağlantılar bulunur. Çelik kirişlerin başlıklarına yapılan bu bağlantılar da kaynak veya cıvatalama ile yapılır.

Çelik Kiriş Enstitüsü'nün standart kataloğunda kapsamlı testler ve incelemeler ışığında geliştirilmiş yük tabloları bulunmaktadır. 7m uzunluğuna kadar olan kirişlerde vinç kaldırma halatı serbest bırakılmadan önce köprülemenin takılması tavsiye edilmektedir. Bir montajcının bu tür detaylara dikkat etmeden çalışması, çelik kiriş sistemlerinde montajın işlevsellik kazanmayacağı anlamına gelir. Kirişler üzerinde herhangi bir yük uygulanmadan önce montaj köprülemesinin kurulması gerekmektedir. Buna ek olarak çelik kiriş enstitüsü SJI, gerekli köprüleme sırasının sayısı ile ilgili olarak ve kiriş çeşidi, aralığı ve uzunluğu için yönergelerle sahiptir. Örneğin kiriş uzunluğu 18 metreden fazla olduğunda tüm köprüleme

dizileri çapraz köprüleme ve cıvatalı olmalıdır. Ayrıca kaldırma halatları serbest bırakılmadan önce montaj köprüsü olarak en az iki sıra köprüleme kurulmalıdır. Kirişin uzunluğu 30 metreden fazla olduğunda da vincin kaldırma halatlarını serbest bırakmadan önce cıvatalı çapraz köprüleme sıralarının tümü takılmış olmalıdır (SJI, 2015).

Son olarak çelik montajcısı yapıda oluşacak yükleri tahmin edip belirtmelidir. Bu inşaat sahasına özgü, özel bir montaj planı aracılığı ile yapılır. Ek olarak çizimlere uygun olan montaj elemanları takılmalıdır. En az bir sıra köprüleme takılmış ve sabitlenmiş olmalıdır. İnşaat yükleri uygulanmadan önce kirişler tam olarak kurulmalı ve kenetlenmelidir.

Metal yapı sistemleri, montaj sırasında çökmeye karşı en savunmasız durumda olduğundan, bu aşamada bina kurucusu tarafından çok dikkatli olunmalıdır. Montajcı, üreticinin montaj kılavuzunun bir kopyasını yerinde bulundurmalı ve montaj ilerledikçe bu kılavuza başvurmalıdır. Montaj çizimlerinde istenen tüm destekler, çizimler ve montaj kılavuzunda olduğu gibi kurulmalıdır. Bina konfigürasyonu veya saha koşullarının gerektirdiği şekilde ek geçici destekler kurulmalıdır. Ek geçici destek ihtiyacını belirlerken rüzgar ve günlük sıcaklık dalgalanmaları gibi yerel saha koşulları dikkate alınmalıdır.

Sistem tasarımının doğası gereği, yapının montajı imalatçıların yönergelerine sıkı sıkıya bağlı olarak ve montaj sırasında desteklemeye özel dikkat gösterilerek yapılmalıdır. Bununla birlikte, çerçevenin yerleştirildiği ve aşıkların takıldığı zaman arasında, çerçeve savunmasızdır ve geçici destek kullanılmalıdır. Montaj sırasında yetersiz destekleme muhtemelen diğer tüm faktörlerin toplamından daha fazla metal bina sistemlerinin çökmesine katkıda bulunur. Montajda detaylara dikkat edilmesi, tüketici için kullanılabilir bir ürün sağlamaya yardımcı olacaktır.

Montajcılar, işi zamanında tamamlamak için bazı bahaneleri kullanarak geçici desteklerin kullanılmasını atlayabilirler. Göçmeye neden olabilecek yanal kuvvet, montaj ekibinin hızından bağımsız olarak her an ortaya çıkabilir. Desteklemenin ihmal edilmesi kazalara, can ve para kaybına neden olabilir (Sputo ve Ellifritt, 1991).

Uygun performans için çok önemli olan diğer bir durum, çerçevenin düzlemine dik olarak desteklemenin gerekli olduğudur (Ellifritt 1981). Bu nedenle, bir sistem binasının tasarlanması ve inşasında desteklemenin belki de en önemli unsur olduğu unutulmamalıdır.

Güvenli montaj

Güvenli bir montaj durumunun sağlanabilmesi için bazı gerekliliklere dikkat edilmelidir. Örneğin her bir kirişin yerine yerleştirilmesinde her iki uçta iki montajcı bulunur ve sırayla gerekli bağlantıları yaparlar. Bazen sahada olan bir montaj işçisinin kolon ayaklarında bulunan bazı ankraj cıvatalarını gevşetmesi gerekebilir. Bu şekilde kolonların kiriş delikleri ile hizalanmasına olanak tanınır. Hizalanmanın ardından montaj cıvataları takılır. Cıvatalar takıldıktan sonra bir görevlinin ankraj cıvatalarını yeniden sıkması önemli bir konudur. Sıkılmadan gevşek bırakılan kolon ayakları yapının montaj aşamasında yapının göçmesine sebebiyet verebilir. Kirişin yerleştirme ve ankrajların, cıvataların sıkılma işlemi tamamlandıktan sonra kiriş stabilitesi kontrol edilip kaldırma halatının serbest bırakılması gerekir. Her iki yönde kolonlar arasında çerçeve oluşturacak kirişler yoksa montaj aşamasında ilk tercih bağ veya dikme kirişi olacaktır. Bu kirişler kolon hatlarında destek kirişleri arasındaki çerçevelerdir ve her zaman cıvatalıdır. Aynı zamanda tüm kirişlerin montaj için doğru sırada kullanıldığından veya kullanılacağından emin olunmalıdır. Son olarak güvenli montaj için uygun kiriş aralıklarının, destek kirişleri üzerine işaretlenmesinde ve montaj çizimlerinin kontrolünde fayda vardır.

Vinçten, kirişe bağlı kablolar serbest bırakılmadan önce her iki uçta düzgün oturma olup olmadığı da kontrol edilmelidir. Eğer kirişler hemen bağlanmayacaksa istem dışı yer değiştirmenin ve düşmenin engellenmesi gerekir. Kirişlerin gövde elemanlarının üst başlığa bağlandığı yerde durduğunu doğrulamak için son bir kontrol yapılmalıdır. Kirişler doğru konuma getirildiğinde mümkün olan en kısa sürede bir ucun her iki tarafını da montajlamak gerekir. Bağlantılar çelik kiriş enstitüsünün (SJI) şartnamesine uygun olarak cıvatalama veya kaynaklama ile sağlanmalıdır. Bu uygulamaları yapacak olan çalışanın eğitilmiş, kalifiye ve donanımlı olması gerekmektedir (SEAA, Amerika Çelik Montajcılar Birliği).

Ayrıca, İş Sağlığı ve Güvenli Yönetmeliği incelenerek orada belirtilen kuralların tüm çalışanlar tarafından uygulanması gerekmektedir. Montaj işlemleri öncesinde iş güvenliği açısından gereken tedbirler alınmalıdır. Gerekli tedbirlerin alınması ve bunların İSG uzmanları tarafından denetlenmesinin akabinde, montaj işlemlerine başlanılmalıdır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu bölümde tez kapsamında ele alınan konu ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Literatür çalışması 5 alt bölümden oluşmakta olup inşa sürecinde göçen çelik yapıların genel bir araştırması ile konuya giriş yapılmıştır. Ardından bazı göçme durumlarının detaylı incelemesi Bölüm 2.2’de yapılmıştır. Bölüm 2.3’te aşamalı göçme üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu sayede hem bazı farklılıklar üzerine hem de genel olarak bir yapının stabilitesi üzerine çıkarımlar yapılabilmesi amaçlanmıştır. Bölüm 2.4’te kubbe formu çelik yapılar hakkında araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar sayesinde genel bir anlayışın elde edilmesi amaçlanmış ve son olarak Bölüm 2.5’te kubbe formu çelik yapıların göçmesini konu alan çalışmalardan bahsedilerek özel olarak bu tez kapsamında ele alınan yapının benzer durumları veya farklılıkları incelenmiştir. Bu sayede montaj esnasında kaçınılması gereken hususlar hakkında ve nelerin daha iyi yapılabileceğinin görülebilmesi üzerine fikir edinilmiş ve konu hakkında bilgi verilmeye çalışılmıştır.

2.1. İnşa Sürecinde Çöken Yapılara İlişkin Literatür Taraması

Sputo ve Ellifritt (1991) tarafından ele alınan çalışma, metal yapı sistemlerinin yapım aşamasında çökmesini konu almaktadır. Bu çalışmada, sistem tasarımı yaklaşımı nedeniyle, yapının tüm bileşenlerinin, gerekli yapısal güvenlik seviyesini sağlamak için birbiriyle etkileşime girdiğinden bahsedilir. Çalışma, montaj sırasında 62,8 m açıklıklı rijit çerçeveden oluşan bir metal yapı sisteminin yetersiz bir şekilde monte edilmiş takviye nedeniyle çökmesini bildirmekte ve rijit çerçevelerin yanal destekleriyle ilgili uygun montaj prosedürünü açıklamaktadır.

1990 yılında Florida’da montaj sırasında çöken metal bir yapı ele alınmıştır. 62,8 m açıklığa sahip olan bina için normal montaj prosedürü belirtilmiştir. Ancak bu prosedürün izlenmediği; yetersiz desteklerin olduğu ve bu şekilde başka bölümlerin montajına devam edildiği görülmüştür. Hâlbuki çatı düzlemi ile yan duvarlar arasına tam destek kuruluncaya kadar başka bir montaj yapılmamış olmalıydı. Bir görgü tanığı, çöküşten hemen önce hafif bir rüzgar olduğunu bildirmiştir. Rüzgarın montaj hatası sebebi ile stabil durumda olmayan yapının çöküşünü tetiklediği belirtilmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda montaj çizimlerinde belirtilenden daha fazla ek destek olması gerektiği de belirtilmiştir. Ancak uygulamada buna uyulmamıştır. Çöküşün koşulları tartışılıp öneriler sunulurken bir metal yapı sisteminin imalatçının yönergelerine uygun olarak kurulmamasının sonuçlarını bildirmekte ve bu eylemlerin mühendislik açısından önemine işaret edilmektedir.

Bell ve Linzell (2007) tarafından yapılan bir çalışmada çeşitli montaj prosedürleri ve bunların geniş yarıçaplı, yatay olarak kavisli, çelik I-kirişli bir köprünün nihai geometrisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapı kurulumu esnasında, kavisli kiriş davranışını araştırmak için, çelik montajının ciddi geometrik yanlış hizalamalar ve montaj komplikasyonları mevcut olan çelik I kirişli bir köprü çalışılmıştır. Özellikle tek kirişli montaj, kirişlerin çiftler halinde dikilmesi, üst yan desteklerin etkileri ve yapının inşası sırasında destek kulelerinin uygulanması araştırılmıştır. Spesifik araştırma bulguları aşağıdaki gibidir.

Kalibrasyon sürecinde kanıtlanmış teknikler ve varsayımlar kullanılarak, montaj sıralaması, üst yanal desteklerin uygulanması ve geçici kullanımın etkilerini araştıran çeşitli analizler yapılmıştır.

Bulgular, çift kirişli montajın bu yapı için tek kirişli tekniklere göre daha küçük radyal ve dikey deformasyonlar ürettiğini, bitişik iç kirişler arasında yanal destek kullanımının ve geçici iksa kulelerinin açıklık çeyrek noktalarına yerleştirilmesinin etkili araçlar olduğunu, hem de sehim seviyelerini daha da azaltacağını göstermiştir. Çift kirişlerin dikilmesinin, tek kirişli montaj kullanan prosedürler üzerindeki deformasyon kontrolünde ölçülebilir iyileşme sağladığı ve üst yanal destek uygulamasının veya geçici destek kulelerinin kullanımının inşaat sırasında yaşanan deformasyonları daha da azaltmak için etkili araçlar olduğu gösterilmiştir.

Beri (1993) tarafından ele alınan bir çalışma, siklonik rüzgarlar nedeniyle inşaat sırasında endüstriyel bir çelik binanın göçmesini incelemektedir. Çalışmada siklonların, dönme hareketlerinden dolayı öngörülemeyen rüzgar efektleri yarattığı ele alınmıştır. İnşaat sürecindeki endüstriyel yapılar, bu tür öngörülemeyen doğa olayları sırasında göçmeye özellikle duyarlıdır. Böyle bir göçme durumunun bir vaka çalışması sunulmaktadır. Hasar gören yapı elemanlarının onarımı ve yeniden kullanılması için alınan önlemler de

verilmektedir. Gelecekte bu tür göçmeleri önlemek için ihtiyati tedbirler tartışılmaktadır. İyi tasarlanmış bir endüstriyel yapı, bir kez tam olarak kurulup desteklendiğinde, hem normal hem de ara sıra olan anormal rüzgar basınçlarına karşı koyabilir.

Bununla birlikte, yapı kısa süren montaj sırasında göçmeye karşı daha savunmasızdır. Çok şiddetli olmayan rüzgarlar, rüzgara maruz kalan yüzey alanı tamamlanmış ve giydirilmiş yapıdakinden çok daha az olduğu için, montaj sırasında uygun şekilde çaprazlanmış bir yapı için pek bir sorun teşkil etmeyebilir. Öte yandan şiddetli rüzgar ve fırtınalar, karmaşık bükülme gerilimleri oluşturarak göçmeye neden olabilir. Yapı montaj sırasında siklonik rüzgara maruz kalırsa, yapının çökmesi söz konusu olabilir (Venkateswarlu ve Arumugam, 1983).

Biezma ve Schanack (2007) tarafından yapılan araştırma çökme olaylarının kötü durumlar olduğunu ancak bu olumsuzluklardan çıkarılan dersler sayesinde bugünün yapısal davranış bilgisine ve nispeten yüksek güvenliğe ulaşılmasında katkıları olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışmada bugün sahip olduğumuz görece yüksek güvenliğin, yapısal korkunç kazalar olmadan sağlanamayacağından bahsedilmiş ve bir yandan da yapısal davranış üzerindeki birçok etkinin daha önce bilinmediğine atıfta bulunulmuştur. Yüksek güvenliği sağlayan bu katkılar, yapısal ve tasarım eksiklikleri, korozyon, yapım ve denetim hataları, kazara aşırı yük ve darbe, oyulma, bakım veya denetim eksikliği ve mücbir sebepler dahil olmak üzere yapı göçmesinin en yaygın nedenlerini sınıflandırarak gösterilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak "...Modern standartların, açıklanan hataları önlemeye yardımcı olan katı kurallar içerdiği, bununla birlikte, her yapının tasarımı ve inşası benzersiz olduğundan, son zamanlarda çökmüş yapı örnekleri, standartların yetersiz olduğunu göstermektedir" denilmiştir.

Jauregui (2014) ise çalıştığı konuda sabit yükler altında başlık basınç geriliminin ve ekskavatör ağırlığının aşırı olduğu bölümün yakınında meydana gelen bir çökme olayında yetersiz destekleme ve sonrasında yanal burulma olduğunu göstermiş ve bir dış kirişin yanal burulma burkulmasından kaynaklanan bir göçme durumunu incelemiştir. Burada sunulan sonuçlar, güverte kaldırma prosedürünün yapısal olarak sağlam olmadığını ve yapının çökmesini başlatan olayın, yetersiz destek nedeniyle dış kirişte basınç başlığı bükülme kapasitesinin aşılması ile oluştuğunu göstermektedir.

Zhao, Yu, Burdette ve Hastings (2009) tarafından yapılan çalışmada çelik bir köprü uygulaması incelenmiş olup çelik yapı montajı hakkında bilgi vermektedir. Bu çalışma, montaj sırasında tek bir çelik köprü kirişinin kararsızlığının ve yanal burulma burkulmasının tüm çelik üst yapının çökmesine neden olabileceğinin bir örneğidir. Basınç başlığına sağlanan yanal desteğin geçici olarak mevcut olmayabileceği durumlarda, montaj sırasında çelik levha yapma kirişlerin rijitliğine çok dikkat edilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar analizlerinin, üst gerilim başlığında destek sağlamanın, montaj sırasında kendi ağırlığı altında konsol kirişin yanal burulma burkulmasını önlemek için etkili bir yol olacağı gösterilmiştir.

Hastings, Zhao ve Burdette (2010) çelik bir köprünün yapım sürecinde çelik levha yapma kirişlerin montajının karmaşık bir işlem olduğunu ve genellikle planlamasının ve uygulamasının yükleniciye ve / veya alt yükleniciye bırakıldığını söylemektedir. Yapılan çalışma sonuçlarından, çoğu durumda montaj sırasında kirişin stabilitesini; öz ağırlık artı rüzgar yükünün kontrol ettiği ve başlık genişliği ile gövde derinliğinin, ayrıca maksimum L/b oranının stabiliteye etkisi olduğu görülmektedir. Özellikle dar başlıklara veya derin gövdelere sahip kirişler için, montaj sırasında kiriş stabilitesini kontrol ederken birleşik rüzgar yükü ve ölü yük etkilerini dikkate almanın kritik olduğu belirtilmiştir.

Chavel ve Earls (2006) yılında eğimli çelik I-kirişli köprüler üzerine bir incelemede bulunmuştur. Mevcut araştırma, montaj sırasında önemli zorluklarla karşılaşılan, yakın zamanda inşa edilmiş yatay olarak eğimli çelik I kirişli köprünün montajını araştırmaktadır. Kiriş ve çapraz çerçeve elemanları, geleneksel olarak sıklıkla yüksüz durumda montaj için detaylandırılır. Bu tür köprüleri inşa etmek için kullanılan montaj sırasının, sahada yüksüz koşulun elde edilebilmesini ve önemli üstyapı bileşeni montaj problemlerinin meydana gelmemesini sağlamak için kapsamlı bir şekilde çalışılmasının zorunluluğu belirtilir. Köprü montajı, ayrıntılı bir doğrusal olmayan sonlu eleman modeli kullanılarak analitik bir simülasyon yoluyla yeniden oluşturulur. Analitik sonuçlar, geçici destek yapılarının uygun şekilde uygulanmasıyla inşaat sırasında sahada yüksüz duruma çok benzeyen bir koşulun elde edilebileceğini ve söz konusu köprü üst yapısının inşası sırasında karşılaşılan zorlukların, takip edilen montaj şemasına atfedilemeyeceğini göstermektedir. Yapının montajı sırasında sahada çapraz çerçeve bağlantısı ve yanlış hizalamalar gibi önemli zorluklarla karşılaşılmıştır. İnşaat sırasında karşılaşılan önemli yapı bileşenlerinin yanlış

hizalamalarının, montaj sırasında yer değiştirmelerin ve gerilmelerin öneminden emin olmak için sağlıklı bir analizinin yapılması gerektiği anlatılmıştır.

Nastar ve Liu (2019) tarafından yapılan çalışmada 1970 ile 2013 yılları arasında çelik yapılarda gözlenen göçmelere ilişkin bazı vaka incelemeleri sunulmuştur. Bu belgedeki her vaka çalışması, belgelenmiş bir inşaat mühendisliği başarısızlığının özet bir tanımını, ardından başarısızlıktan öğrenilen dersleri ve daha fazla çalışma için referansları sunmaktadır. Bahsi geçen bu çalışmada West Gate Bridge, University of Washington Stadium, Colorado State Route, Pittsburgh Convention Center adlı yapıların çöküşünden bahsedilirken, “Bu tür, boyut, karmaşıklık ve önemdeki yapılar için ayrıntılı bir montaj sırası planı tasarlanmalı ve uygulanmalı” denmiştir. Montaj ve yapım planı, inşaatın her aşamasında olmalı, yapının sağlamlığının ve stabilitesinin bu şekilde sağlanabileceği belirtilmiştir.

Zallen (2003) tarafından yapılan çalışmada, açık gövdeli çelik kirişlerin yapısal montajları esnasında ortaya çıkabilecek sorunlar ele alınmıştır. Çalışma, montaj esaslarının çoğu zaman Çelik Kiriş Enstitüsünün 9 no’lu Teknik Şartnamesi (SJI TD No:9) ile uyumlu olacak şekilde kiriş üreticileri tarafından belirlendiğini belirtmektedir. Çalışmada derin uzun açıklıklı çelik kirişlerin çökmesinin araştırılması sırasında yüklenici ve montajcının sözü geçen şartnamenin gerekliliklerine uyup uymadığı araştırılmış ve bunların takip edilip edilmemesinin çöküşe olan etkileri incelenmiştir. Aynı zamanda Zallen, bahsi geçen teknik şartnamenin bazı gereksinimlerini, bunların çöküşle olan ilgisini ve bunların montaj uygulamaları üzerindeki etkilerini de incelemektedir. Çalışma, Amerika’da yapım aşamasında olan, çok büyük ve kompleks bir ortaokul binasının bir bölümünde göçmeye sebep olan yapısal çelik montajını konu almaktadır. Montajcı ustabaşı, kirişlerin bir kısmının yanlış yere konumlandırıldığını fark edip bu kirişlerin bir kısmını hatalı yerlerden çıkarmaya karar vermiştir. Ancak bu işlem sırasında bazı çapraz köprülemelerin kaldırılması ile dikilmiş olan kirişler bükülerek çökmüştür. Yaralanmalara da sebep olan bu kaza dava konusu olmuş olup SJI TD No:9 (1987) şartlarına uyulup uyulmadığı ve bu montaj prosedürleri hakkında da bazı soruların doğmasını sağlamıştır.

Kiriş detayları, montajın nasıl yapılacağı, örnek olarak burkulmayı önleyecek yanal destek gerekliliği, çapraz köprüleme birleşimleri gibi detaylar verilmiştir. Genel montaj prosedürüne göre ne yapılması gerektiği, çapraz köprüleme hakkında bilgi verilmesi,

bağlantı kirişlerinin kirişin her iki ucundaki destek çerçevesi arasındaki göreceli hareketi önleyeceği gibi önemli noktalardan bahsedilmiştir. Kaza anında çalışanların hangi durumda olduğu, pozisyonları, vinç hareketleri ve uygulamaları, çapraz köprülemelerin bağlanması ve civataların gevşek veya elle sıkılmış olarak bırakılması gibi önemli detaylar aktarılmıştır. Kaynakların geçici olarak mı kalıcı olarak mı yapıldığı hakkında büyük problemler olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca kullanılan bazı yöntemlerin şartnameden farklı olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak montajcı SJI TD No: 9 ' da belirtilen bazı kurallara uymamış olsa da şartnamenin gerekliliklerinin yerine getirilmemesi, çökmenin tek başına ya da doğrudan bir nedeni olmadığı görüşü belirtilmiştir.

Kirişlerin bir bütün olarak yatay burkulmasına karşı güvenliği artırmak için, her bir çapraz köprüleme hattında, yerleştirilen ilk kiriş çifti arasına ve çapraz köprüleme hatlarının uçlarına yatay açılı dikmeler eklenmelidir ve OSHA yönetmeliklerinin (2001) gerektirdiği "ankraj" sağlanmalıdır (OSHA, 2001).

Liu, Peng, Zhou, Tong ve Pang (2010) tarafından yapılan bir çalışmada montaj gereklilikleri hakkında bazı bilgiler verilmiştir. Çelik yapıların montaj sürecindeki göçme durumlarının incelenmesine katkıda bulunacağı düşünülen bu çalışmada, olası bir göçmenin önlenmesi için doğru ve uygun bir montaj için gereksinimleri, yöntemleri ve bu konu ile ilgili bazı önemli noktalar aktarılmıştır. Çalışmada Çin'de bulunan Baling Nehir Köprüsü için yapılmış olan çelik berkitme makas kirişinin montaj yöntemleri incelenmiştir. Çalışmada asma köprülerin çelik takviyeli kirişlerinin montajı için uygun olabilecek 4 yöntem incelenmiş olup çalışmanın bazı kısımlarına değinilmiştir. Bahsedilen yöntemler portal vinç yöntemi, kabloya monte vinç yöntemi, derrick vinç ile konsol montaj yöntemi ve artımlı fırlatma yöntemi olarak belirtilmiştir. Sonuç olarak kolay inşaat kontrolü, yüksek inşaat güvenliği, hızlı inşaat süreci, ekonomiklik, çevreye az etki gibi sebeplerle derrick vinç ile konsol montaj yöntemi önerilmiştir.

Bu çalışmada asıl konu Çin'de bulunan Baling Nehri Köprüsünün montaj yöntemi olmakla beraber köprüler ile birlikte diğer çelik yapılar için de önemli sayılabilecek şu çıkarımda bulunulmuştur. Yapının yapım koşullarına bağlı olarak seçilecek olan montaj yöntemi, inşaat güvenliği, kalite, süre, çevre koruma, uygulanabilirlik ve ekonomik performans gibi çeşitli faktörlerin optimal kombinasyonuna göre belirlenmelidir. İnşaatın geometrik

konfigürasyonu ve gerilme seviyesi inşaatın tamamlanmasından sonra tasarım gereksinimlerini karşılamalıdır.

Green ve Holtermann (2008) montajın önemli bir basamağı olan köprüleme üzerine çalışmışlardır. Köprülemenin, kirişlerin güvenli montajı açısından önemine değinilmiştir. Diğer inşaat yükleri uygulanmasa bile, kaldırma kablosu serbest bırakılır bırakılmaz bir kiriş dengesiz olabilir. Kiriş köprülemenin işlevi, hem üst hem de alt kirişleri kalıcı olarak desteklemektir. Yapının ömrü boyunca yapısal sistemin bir parçası olarak kalması gerektiğinden, kurulan köprüleme artık kalıcı köprü olarak adlandırılacaktır.

Metal döşeme kaplaması yeterli bir diyafram oluşturduğunda, köprüleme, inşaat tamamlandıktan sonra üst kirişte kalıcı bir role sahip olmaz. Bir istisna, bir dikme çatısının doğrudan bir kiriş üst başlığına tutturulmasıdır. SJI, bu tip bir çatı kaplama sisteminin gerekli diyafram mukavemetini sağlamadığını, dolayısıyla kirişlerin düzgün çalışması için kalıcı köprüleme gerektiğini belirlemiştir (Hodge ve Galambos, 1986).

2.2. Çöken Bazı Yapıların Detaylı Bilgileri

Bu bölümde montaj esnasında göçme ve çökmelere maruz kalan bazı çelik yapılar hakkında yapılan literatür araştırması detaylandırılmış olup kısaca sebepler ve sonuçlara değinilmiştir.

2.2.1. Stockholm, İsveç, 2008, ticaret merkezi

İlk örnek olarak üç katlı bir ticaret merkezi inşaatının montajı esnasında meydana gelen göçme incelenmiştir (Şekil 2.1). Bu olayda açıkça bir tasarım hatası vardı. Diğer pek çok olayın aksine burada bir uygulama veya işçilik değil tasarımcının hatası söz konusuydu.



Şekil 2.1. İsveç, Stockholm'deki ticaret merkezi inşaatının göçme öncesi ve sonrası

Yapının montajı esnasında kat döşemesi göçtü. Göçmeye sebep olan yapısal eleman 1400 mm yükseklikteki I-profil ana kirişti. Tasarım aşamasında göçen bu I-kirişin sağındaki kolon bina akslarından dışarıda bırakıldığı görülmüştür. I-kirişin dikine yöndeki döşeme kirişlerine ara destek sağlaması söz konusuydu. Bu kiriş bir bilgisayar yazılımı aracılığı ile tasarlanmıştı. Bu tasarımdan elde edilen ölçüler çizimlere aktarılırken, gövde kalınlığı ile gövde kaynaklarının boğaz kalınlığı karıştırılmıştı. Böylece, doğru tasarımdan elde edilmiş gövde kalınlığı için 12 mm yerine çizimlerde 7 mm verilmişti. Bunun daha da ötesinde, sağ uç kolon mesneti üzerinde hiç bir gövde berkitmesi verilmeyerek hata katlanmıştı (Şekil 2.2). Bu olayda bir çalışan ölmüş ve iki kişide yaralanmıştı (Alpsten, 2017).



Şekil 2.2. Göçen I-kiriş

2.2.2. İsveç, spor salonu çatısı

Bir diğer göçme olayı yine İsveç'te bu kez başka bir yapı örneği olarak ele alınmıştır. İncelenen olay, bir spor salonunun 50 m açıklıktaki çatı kafes kirişlerinin göçmesi olayıdır. Çelik yapı montajı altyüklenicisi, yapım sürecinde gerektiği şekilde çatı kafes kirişlerinin

üst başlıklarında geçici destekleme elemanlarını yerleştirmişti. Ancak bu elemanların ne kadar önemli olduğunu fark etmeyen ve asıl görevi çatı mertekleri ve kaplamayı yapmak olan bir altyüklenici tek tek bu geçici destekleme elemanlarını gevşetti. Bu sebeple, gerekli çatı malzemesini kaldıran vincin hareketlerini geçici destekleme elemanlarının engellemesi sorunu yaşandı. Bu sırada ara yanal destekten yoksun iki kafes kiriş yanal-burulmalı burkulmaya bağlı olarak göçtü (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. İsveç'teki spor salonu çatısının göçmesi sonrası

Olaydan sonra kafes kirişlerin bazı düğüm noktalarında kaynaklar hasar gördü. Böyle bir durumda hatalı kaynakların göçme sebebi olduğu çıkarımı yapılabilir. Gerçekten de, deneyimli bir kaynak uzmanı ilk raporunda bunun göçmenin muhtemel sebebi olduğunu yazmıştır. Ancak bu 50 m açıklıklı kafes kirişlerin yanal destek olmadığı zaman göçecekleri kolaylıkla açıklanabilir. Kırılan kaynakların öngörülmemiş zayıf-eksen eğilmesi yüzünden ve hatta yere çarpınca dinamik etkiler yüzünden olması çok daha muhtemeldir (Alpsten, 2017).

2.2.3. Teksas, ABD, 2010, tek katlı depo

Bu yapı bir firma için üretim hattı atölye binası olarak kullanılacaktı (Şekil 2.4). Göçme sonrasında bina ile ilgili yerinde ölçümler yapılmış, kullanılmış olan malzemelerden numuneler alınarak test edilmiş ve tasarım ile çizimler gözden geçirilmiştir. Yapılan bina "systems-engineered metal buildings" olarak tanımlanmıştır. Bu sistemlerde binanın kısa aksı yönünde rijit çerçeveler (moment taşıyan çerçeveler) bulunmaktadır. Binadaki yapısal sistem, duvar sistemi ve çatı sistemi yerçekimi ve yanal yükler altında bütünlük davranış göstermesi gerekmektedir. Sistem elemanları sanki bitmiş yapıdaymış gibi tasarlanırlar. Yapıdan temellere yük aktarımı ankraj çubukları ile olur.



Şekil 2.4. ABD, Teksas'taki tek katlı depo inşaatının göçmeden önceki durumu



Şekil 2.5. ABD, Teksas'taki tek katlı depo inşaatının göçmeden sonraki durumu

Bu yapı örneğinde dikkat çeken bazı olumsuz durumlar, göçmeden sonra yapılan araştırmalar neticesinde açıklığa kavuşturulmaya çalışılmıştır. Üreticinin yapım aşaması çizimlerinde belirtilmiş olmasına rağmen çerçeveler için dik yöndeki geçici payandalar veya sürekli-kalıcı duvar destekleri montajcı tarafından yapılmamıştı. 45 m uzunluktaki çatı aşıkları ara düşey mesnetsiz, alt-başlık desteklemesi olmadan ve çatı kaplaması hizasında çapraz desteksiz olarak kendi ağırlıkları altında uç sınırdaki stabildi. Bu durumdaki aşıkların yanal olarak burkulduğu ve bir ya da daha çok kenar kolonun dönmesine neden olduğu ve kolonların tabanda basit-bağlantılarının kopmasıyla sonuçlandığı düşünülmüştür. Bir kolonun böyle göçmesinin diğer kolonun da burkulması ve tabandan kopmasına ve ankraj cıvatalarının yerinden çıkmasına sebep olduğu düşünülmüştür (Şekil 2.5). Bu olayda güvenli montaj kurallarına alt yüklenicinin uymadığına karar verilmiştir. Bu vakada bir çalışan ölmüş ve bir çalışan da yaralanmıştır (Ayub ve Guttema, 2012).

2.2.4. Rhode Island, ABD, 2015, spor salonu

Yapı, Bryant Üniversitesi Spor Salonu olarak kullanılması amaçlanmıştı. Yapı tek-katlı, "systems-engineered metal buildings" olarak tanımlanmıştı. Kısa aks yönünde 57,6 m açıklıktaki çerçeveler uzun aks yönünde yaklaşık 7,5 m aralarla yapılacaktı. Göçme olduğunda 9 adet çerçevenin montajı yapılmıştı (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. ABD, Rhode Island'daki spor salonunun göçme öncesi ve sonrası

Sözleşme ve genel uygulamaya göre montajcı firma yapım aşamasında yapının stabilitesini ve bütünlüğünü sağlamaktan sorumluydu. Üretici ve tasarımcı firma bir kılavuz şeklinde montaj aşamaları ve çizimlerini vermişti ancak nihai montaj yöntemi montajcı firmaya bırakılmıştı. Önerilen yöntemle göre ilk olarak iki komşu çerçeve tam olarak tamamlanacak ve sonraki çerçeveler yanal stabilite için bu çerçevelere bağlanacaktı. Montajcı firma ise ilk çerçeveyi her iki yönünden üçer adet kablo ile yerdeki beton bloklara sabitlemeyi tercih etti. Ayrıca montajcı firma tarafından bu montaj planı için herhangi bir hesap yapılmamıştı.

Olay günü bir sebepten dolayı çerçevenin bir tarafındaki kablolar söküldü. Bu halde diğer çerçevelerin montajı devam etti. Çalışanlar yeni çerçevelerin şekül ayarını yaparken yapıya kuvvet uyguladıkları için ve kablolar sadece çekmeye çalıştıkları için bu yönde yapının göçmesi gerçekleşti. Olayda altı çalışan yaralandı (Menon ve Braile, 2016).

2.5.5. Ilford, UK, 2012, kilise binası

Bahsedilen yapı, İngiltere'de City Gates Church binasıdır. 5 katlı, çelik çerçeve olarak tasarlanan yapı olay sırasında çatı montaj aşamasına gelmişti. Ana çatı kafes-kirişi 36 m açıklıklı ve 3,5 m derinlikli idi. Kafes-kirişin bazı kısımları atölyede kaynaklanmış ve bu

parçalar şantiyede yerinde kaynaklanarak birleştirilmişti. Altta bulunan iki kat döşemeleri bu kafes-kirişe kutu kesitli profiller ile asılmıştı. En yüksek olasılıklı senaryoya göre, düğüm noktalarındaki hizalamaların düzgün olmaması sebebiyle zayıflamış kaynaklar, düşük kesitli yapılmış kaynaklar, çift kez delinmiş guse plakalar başlangıçta yavaş plastik akmaya maruz kalmış ve sonra bazı kalın kesitlerin gevrek kırılması sonucu göçme olayı meydana gelmişti (Şekil 2.7). Genel olarak bazı birleşimlerdeki yerel göçmeler zincirleme bir göçmeye sebep olmuştu. Göçme olayı şans eseri çalışma saati dışında, gece meydana gelmiş ve can kaybı ya da yaralanma olmamıştı (Yapısal Güvenlik).



Şekil 2.7. UK, Ilford'daki kilise binasının göçme öncesi ve sonrası

2.2.6. Enschede, Hollanda, 2011, FC Twente stadyum çatısı

Yapı, Hollanda'da bir futbol stadyumunun genişletme çalışmaları kapsamında yapılan çelik çatıdır. Montajı hayli ilerlemiş ancak yetersiz stabiliteye sahip durumdaki çatının çökmesinde birden fazla faktör etken olmuştur. Çatı kirişlerinin arka uçlarındaki çiftleme bağlantı borularının yapılmamış olması esas faktördü. Çelik kablolar stabilite bağlantısı olarak kullanılmaktaydı ama olay günü bunlar sökülmüştü. Çatı, fazladan yüklenmişti. Ayrıca çatının oturduğu betonarme kirişler ile arasındaki boyutsal farklılıklar yüzünden yapılan ayarlamalar sebebiyle zorlanmıştı ve bu da ek çekme gerilmeleri oluşturmuştu (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Hollanda, Enschede'de stadyum çatısının göçme öncesi ve sonrası

Yapılan inceleme vakanın meydana gelmesinde şantiye işlerinin koordinesiz ve kontrolsüz ayrıca sorumluluk ve görevlerin de açıkça belirtilmeden yerine getirilmeye çalışıldığını ortaya koymuştur. Olayda iki çalışan ölmüş ve dokuz çalışan yaralanmıştır (Hollanda Güvenlik Kurulu).

2.2.7. Türkiye'den bazı vakalar

Kayseri'de Erciyes Üniversitesi kongre binası, inşaat sırasında çelik çatı üzerine yığılmış yapı malzemesinin aşırı yük oluşturması nedeniyle göçmüştür. Olay 2018 yılında meydana gelmiş, olayda can kaybı yaşanmazken bir çalışan yaralanmıştır (Kayseri Kongre Binası).

Eskişehir'de bir fabrikanın çelik çatı kafes-kirişleri montaj aşamasındayken göçmüştür. Olayın kafes-kirişlerin yanal stabilitesinin yetersiz olmasından veya hiç olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 2018 yılında yaşanan olayda 1 çalışanın öldüğü ve 3 çalışanın yaralandığı belirtilmiştir (Fabrika Kazası, Eskişehir).

Isparta'da Ulusal Fuar Kongre binasının yapımı devam eden çelik konstrüksiyon kubbesi 2013 yılında göçmüştür. Göçme sebebi olarak montaj ve uygulama hatası olduğu iddia edildi. Olayda can kaybı ve yaralanma olmadı (Gökkubbe İnşaatında Çökme).

Türkiye'de çelik yapıların yapımı aşamasında meydana gelmiş göçme vakaları haber sitelerinden edinilmeye çalışılmıştır. Ayrıntılı raporlar buradaki olayların hiçbiri için elde edilememiştir. Benzer göçme olaylarının olmasından kaçınmak bunlardan ders çıkarılmasına da bağlıdır. Bu bağlamda, havacılık endüstrisinden öğrenilecekler vardır. Göçme vakalarının raporlanması ve bunlardan derslerin çıkarılması kültürü Türkiye'de

henüz yeterli seviyede değildir. Pek çok durumda, muhtemel yasal eylemler, sonuçlar ve davalar yüzünden ilgili mühendisler ve kurumlar veya kuruluşlar bu konuda çekimser kalmaktadırlar (Coşkun ve Sancar, 2019).

2.3. Aşamalı Göçme

Montaj süreci devam ederken göçme, çökme, kısmi yıkılma, gibi çeşitli olumsuzluklar ortaya çıkabilmektedir. Burada değinilmesi gereken bir diğer nokta ise yerel bir bozukluğun veya kısmi bir yapısal kusurun tüm yapıyı etkileyecek şekilde büyümesidir. Bu durum literatürde aşamalı göçme olarak yer almaktadır.

Tarihsel olarak, yapı mühendisleri her zaman olası olmayan aşırı yükler için tasarım yapmaktan kaçınma eğilimindeydiler ve aşırı durumları kapsayacak şekilde geleneksel yapısal sistemlerdeki yerleşik yedekliğe (fazlalık, redundancy) ve malzeme güvenlik faktörlerine güveniyorlardı. Son yıllarda, nispeten yerel etkilerin bir sonucu olarak yüksek profilli yapılarda birçok başarısızlık meydana geldi. Sebep olan yükleme durumları aşırı ve olası olmasa da, hasarın boyutu bazen orijinal etkiyle orantısız olabilir. Bu, maliyet açısından optimize edilmiş bazı yeni inşaat sistemlerinde yedeklik eksikliğine ve güvenlik faktörlerinin azalmasına bağlanabilir. Bu tür olaylar, tüm dünyada aşamalı göçme analizine yönelik giderek artan bir ilgiye yol açmıştır (Khalil, 2012).

Aşamalı göçme, bir elemanın ilk yerel başarısızlığının yapının başka bir elemanına genişlemesi ve nihayetinde tüm yapının veya büyük bir kısmının orantısız bir şekilde çökmesine yol açması olarak tanımlanır (Rahnavard, Fard, Hosseini ve Suleiman, 2018).

Mühendislik yapıları, inşaat sırasında yaralanmalara ve aşırı durumlarda ölümlere neden olan büyük arızalara ve yıkıcı çökmelere maruz kalır. Her bir bileşen için küçük arızalar da dahil olmak üzere bu tür istenmeyen olaylar, esas olarak önemli yapıım gecikmeleri nedeniyle büyük ekonomik kayıplara neden olur. Günümüzde aşamalı yapı analizi, yapısal tasarımcılar tarafından inşaatın zaman içindeki ilerleyen doğasını hesaba katmak için sıklıkla kullanılmaktadır, ancak insan hatası ve beklenmedik olayların ortaya çıkması, arıza önleme stratejilerini etkisiz hale getirebilir (Augenti ve Parisi, 2013).

Song ve Sezen (2013) tarafından yapılan araştırmada, ‘‘Aşamalı göçme, bir veya birkaç yerçekimi yükü taşıyan elemanın anlık kaybıyla başlayan arızaların zincirleme reaksiyonudur’’ diye tanımlanır. Yerçekimi yükü taşıyıcı eleman arızalandığında, yapının alternatif bir yük taşıma yolu sağlayabilmesi ve bu eleman tarafından taşınan yükleri komşu elemanlara aktarabilmesi istenebilir. Komşu elemanlardaki dinamik iç kuvvetler, bir elemanın kaybı nedeniyle i enerjinin serbest kalması sonucu artar. Yük, yapı boyunca yeniden dağıtıldıktan sonra, her bir yapısal bileşen, ek iç kuvvetler dahil olmak üzere farklı yükleri destekler. Yeniden dağıtılan herhangi bir yük, çevredeki hasarsız elemanların kapasitelerini aşarsa, başka bir yerel arızaya neden olabilir. Bu tür ardışık arızalar, elemandan elemana yayılabilir ve sonunda yapının tamamının veya büyük bir kısmının okmesine yol açabilir. Genel olarak, bu tür aşamalı göçme olayları birkaç saniye içinde gerçekleşir.

Aşamalı göçme iki ayrı yöntem ile engellenmeye çalışılabilir. Bunlar; dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemleridir. Dolaylı ve doğrudan yöntemler, aşamalı göçmeye karşı direnç sağlamak için tipik olarak kullanılan iki yaklaşımdır. Dolaylı tasarım yaklaşımı, minimum düzeyde mukavemet, devamlılık ve süneklik sağlayarak aşamalı göçmeyi önlemeye çalışır. Bu yaklaşımda özel detaylandırma ile bağlantı direncini artırmak, fazlalığı iyileştirmek ve bir yapıya daha fazla süneklik sağlamak amaçlanır (Song, Giriunas ve Sezen, 2014).

Doğrudan tasarım yaklaşımı ise, bir binanın tasarım süreci sırasında aşamalı göçmeye karşı direncini açıkça dikkate alır. İki doğrudan tasarım yöntemi vardır: Spesifik yerel direnç yöntemi ve alternatif yk yolu yöntemi. Spesifik yerel direnç yöntemi, aşamalı göçmeye direnebilmek için g sağlamayı amaçlamaktadır. Alternatif yk yolu yöntemi ise, bölgesel hasarı emmek ve aşamalı göçmeye direnmek için alternatif yk yolları sağlamayı amaçlamaktadır. Alternatif yk yolu yönteminde tasarım, yerel arızanın oluşmasına izin verir ancak alternatif yk yolları sağlayarak büyük genel okmeyi önlemeyi amaçlar. Yapısal bir elemandaki arıza, yükleri arızalı elemana bitişik elemanlara aktararak yk yolunu önemli lde değiştirir. Bitişik elemanlar yeterli kapasiteye ve sneklige sahipse, yapısal sistem alternatif yk yolları geliştirir.

Amerikan İnaşaat Mühendisleri Derneği (ASCE) aşamalı göçmeyi, ‘‘bir bütün yapının ya da orantısız bir şekilde büyük bir kısmının nihayetinde okmesiyle sonuçlanan, ilk yerel başarısızlığın bir elemandan diğerine yayılması’’ olarak tanımlar (ASCE, 2013). Aşamalı

göçmenin benzer bir tanımı, Amerika Genel Hizmetler İdaresi (GSA) kılavuzlarında şu şekilde belirtilmiştir: “Bir birincil yapısal bileşenin yerel sorununun, bitişik elemanların çökmesine yol açtığı ve dolayısıyla toplam hasarın orijinal neden ile orantısız olduğu bir durumdur” (GSA, 2003).

Bir binadaki bir veya daha fazla kolonun arızalanması ve bunun sonucunda ortaya çıkan aşamalı göçme, farklı yükleme hızları, basınçları veya büyüklükleri olan çeşitli olayların bir sonucu olabilir. Bu nedenle, mevcut aşamalı göçme tasarım yönergeleri genellikle belirli bir tehditten bağımsızdır ve bu tür yerel hasarları önlemeyi amaçlamaz. Aksine, amaçları orantısız çökmeye karşı bir direnç seviyesi sağlamak ve genel yapısal bütünlüğü arttırmaktır. Tasarım yönergeleri tipik olarak minimum düzeyde fazlalık, dayanım, süneklik ve eleman sürekliliği gerektirir.

Aşamalı göçme olarak adlandırılan “Progressive Collapse” doğal tehlikeler veya patlayıcı veya itici yükler gibi insan yapımı yükler nedeniyle ortaya çıkabilen yıkıcı, yapısal bir olaydır. Bu durumda, tek bir yerel (lokal, bölgesel) hata önemli bir deformasyona neden olabilir ve bu da daha sonra bir yapının çökmesine yol açabilir (Izadifard, 2016).

Khandelwall ve El-Tawil (2005) ise bu tanımı yaparken şöyle der: Aşamalı göçme, birincil bir yapısal elemanın yerel göçmesinin, diğer bitişik elemanların da göçmesine yol açarak genel bir göçmeyi tetiklemesi ile meydana gelir. Çöken sistemin, ayakta kalabilmek için sürekli olarak alternatif yük yolları aradığı dinamik bir süreç ortaya çıkar.

Khandelwall ve El-Tawil (2005) çalışmalarında yapısal bir analiz gerçekleştirerek bir aşamalı göçme olayını ele almışlardır. Sonuç olarak; bir iç kolonun kaybının tüm sistemin çökmesine yol açacağı görülmüştür. Simülasyonun ortaya çıkardığı bir diğer önemli nokta ise, RBS (reduced beam section (RBS)) bağlantıları oluşturmak için kiriş başlıklarının kesilmesinin bağlantı bölgesindeki kiriş düzlem dışı mukavemetini zayıflatarak sistem hassasiyetini arttırmasıdır.

Yapıların, aşırı yükleme olaylarının neden olduğu yaygın yerel arızaları önlemek için yeterince sağlam olması beklenir, böylece binaların tamamen veya orantısız çökmesi önlenebilir (Kong, Y. Yang, B. Yang ve Zhou, 2020).

Kaza olaylarındaki yerel başarısızlıklardan kaynaklanan aşamalı göçme, geçmişte birçok trajediye ve can kaybına neden olmuştur. Yapısal bütünlük ve çökmeye direnme kapasitesi, yapısal tasarım uygulamasında temel bir gereklilik olarak kademeli olarak gelişmektedir. Endüstriyel tesisler ve büyük ölçekli kamu binalarındaki tipik sistemlerden biri olarak, düşük fazlalıklı bir kafes çatı, taşıyıcı bir duvar ve çerçeve sisteminden farklıdır. İç kuvvetin yeniden dağıtım mekanizmasının incelenmesi ve ilk yapısal elemanın kaybı ile birlikte aşamalı göçme sürecini etkileyen mekanizmanın önemi ve bunun ortaya çıkarılmasının gerekliliği belirtilmiştir (Jiang ve Chen, 2012).

Aşamalı göçme doğrusal olmayan dinamik bir süreç olmasına rağmen, aşamalı göçme kodları bazı yük faktörleri ile birlikte doğrusal statik analizin kullanımına izin verir (Khalil, 2012).

Statik analiz ise eğer varsa, olası yeni bir kararlı denge konumunu yaklaşık olarak tahmin edebilir. Ancak doğrusal olmayan dinamik analiz, çökme sürecinin ayrıntılarını tamamlayabilir ve kalan yapının son konfigürasyonunu yakalayabilir. Özellikle de deformasyon çok büyük olduğunda, yapının geometrik konfigürasyonu önemli ölçüde değiştiğinde önem arz eder (Jiang ve Chen, 2012).

L. Li, G. Li, Jiang ve Lu (2018) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, ani bir kolon sökümü veya kolonun herhangi bir sebep ile görevini yerine getirememesi senaryosu altında çelik çerçevelerin aşamalı göçmesi üzerine bir sonlu eleman (FE) modelleme çalışması sunulmaktadır.

Çelik çerçevenin tipi (örneğin, zayıf kirişli güçlü kolon veya tersi) ve yapısal elemanın konumunun, çelik çerçevelerin kritik yükünü ve sağlamlığını etkilemede önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Basitleştirilmiş prosedürlerin kullanılması ve bu basitleştirmenin bir yük faktörü kullanarak hesaplanması her zaman kabul edilen bir mühendislik uygulaması olmuştur ancak, bu faktörlerin sağlam mühendislik analizine veya deneysel çalışmaya dayandığı varsayılmaktadır (Khalil, 2012).

Mirtaheri, Emami, Zoghi ve Salkhordeh (2019) konuya ilişkin şu incelemelerde bulunmuştur. Yüklerin yeniden dağıtılması için alternatif bir yol düşünülmez ise, yapılardaki yerel arızayı aşamalı bir çökme takip edecektir. Bir çelik yapının düşey taşıyıcı elemanı

arızalandığında, ona bağlanan kirişler desteğini kaybedecektir. Buna göre, açıklık uzunluğundaki bir artış, kirişlerdeki iç kuvvetlere eklenir. Kirişlerde bahsedilen artan yük, oradaki ve benzer şekilde karşılık gelen bağlantılarındaki momentlerin yükseltilmesine yol açar. Yapının tüm unsurlarını bu olguya karşı pekiştirmek mümkün olmadığından, belirli güçlendirilmiş bağlantılar gibi diğer teknikleri kullanmak mantıklı görünmektedir. Bu çalışmada, pasif bir bağlantı olarak tanıtilen belirtilen olguyu ele almak için yeni bir bağlantı önerilmektedir. Bu bağlantı, yapının dikey elemanın arızalanmasından sonra eklenen yükleri tolere etmesini sağlar.

Chen, Peng, Ma ve He (2012) yatay desteklemenin çelik moment çerçevelerinin aşamalı göçme direnci üzerindeki güçlendirici etkisi üzerine bir çalışma sunmaktadır. Bu çalışmada, yatay takviyenin bir çelik moment çerçevesinin aşamalı göçmeye karşı direncine katkısı alternatif yol yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Yatay köşebentlerin yerleşiminin, çelik moment çerçevesinin direncini artırmak için etkili bir yöntem olduğu görülmüştür. Yatay köşebentler, kirişler ve kolonlardan oluşan en üst kattaki makaslar için alternatif bir yük yolu oluşturabilir ve kolon kaybı olsa dahi dikey yükü bitişik kolonlara etkili bir şekilde aktarabilir. Yapılan analizlere dayanarak, yatay köşebentlerin düzenlenmesinin aşamalı göçme direncini iyileştirmek için etkili bir araç olduğu sonucuna varılabilir.

Choi, Lim, Kim, Cho ve Kang (2016) yüksek bina inşaatında, çekirdek yapı süreci için uygun inşaat yönteminin benimsenmesinin, hem binanın yapısal yönü hem de program tahmini açısından kritik olduğunu belirtmişlerdir.

Çelik çerçevelerin aşamalı göçmeye karşı direnci, yanal ve dikey kısıtlama uygulanarak artırılabilir ve bu iki sınırlamanın kombinasyonu, tek başına uygulamaya göre daha iyi bir direnç gösterir (Jiang, Li ve Usmani, 2014).

Mühendislik yapılarının maruz kaldığı hasar ve çökme mekanizmalarının sayısal simülasyonu, bu çökmelerin nedenlerinin nicel bir değerlendirmesi için etkili bir araç olabilir. Sık sık büyük arızalar ve hatta burkulmadan dolayı çökme durumları ile karşılaşılabilen çelik çatılar gibi oldukça esnek yapılarda elastik olmayan deplasman analizleri gerekebilmektedir. Bir çalışmada, şiddetli rüzgarın neden olduğu düzlem dışı bir burkulma olgusunun bir sonucu olarak, inşaat sırasında aniden düşen uzun açıklıklı çelik çatı yapısının çökmesi incelenmektedir. Kazanın nedenlerini belirlemek için adli makam adına

adli bir soruşturma yapılmıştır. Saha araştırmalarından ve proje belgelerinden elde edilen detaylı bilgilere dayanarak, inşa edildiği haliyle yapının üç boyutlu bir sayısal modeli oluşturulmuş ve çökme anındaki güvenlik seviyesini değerlendirmek için burkulma analizleri yapılmıştır. İnşa edildiği şekliyle yapı, bazı aşıklar ve zemin seviyesinde sabitlenmiş çelik kablolar ile desteklenmiştir. Yapısal stabilite, çökmeyi önlemede çeşitli takviye sistemlerinin etkinliğini karşılaştırmak için ileri modelleme varsayımları altında araştırılmıştır. Analiz sonuçları, inşa edildiği şekliyle yapının rüzgar esintisi meydana geldiğinde kararsız bir denge durumunda olduğunu göstermiştir. Eş merkezli çatı destekleri yerine yapıya takılan geçici çaprazlama elemanlarının genel stabiliteyi sağlamak için yeterli olmadığı görülmüştür (Augenti ve Parisi, 2013).

Kafes yapıları özellikle kar ve rüzgar yüklerine karşı savunmasızdır. Çaprazlanmamış elemanlardaki basınç gerilmeleri, yapının yerel burkulmasına veya genel burkulmasına yol açabilir. Bu nedenle, Del Coz Díaz, Nieto, Martínez-Luengas ve Sierra (2010) kendinden ağırlıklı metal çatıların doğrusal olmayan burkulmasını, çatı desteklerini birbirine bağlayan çelik kablo direkleri ile araştırmıştır.

Rüzgar yükü genellikle kafes giriş yapılarının çökmesine neden olur. Del Coz Díaz ve diğerleri (2010) tarafından yapılan araştırma adli soruşturmanın ilk adımını, yani yapının gözlenen hasar ve semptomlarına dayanarak olası nedenleri ve çöküşün kökenini belirlemeyi amaçlayan bir ön tanı aşamasıydı. İkinci araştırma adımı, yapının çökme modunu yakalamayı ve ilk adım hipotezlerini doğrulamayı amaçlayan bir sonlu eleman (FE) analiziydi. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan burkulma analizlerinin sayısal sonuçlarıyla da teyit edildiği üzere, kablo tel halatlarının korozyonu ve rüzgar yükü kazanın ana nedenleri olarak bulunmuştur. Analiz sonuçları, çatı kalınlığının hem kırılma modu hem de kendinden ağırlıklı metal çatıların yük taşıma kapasitesi üzerindeki önemli etkisinin olduğunu göstermiştir.

Büyük bir endüstriyel çelik bir yapının 10 cm'lik bir taze kar tabakası altında çökmesi, Brencich (2010) tarafından tartışılan ilginç bir vaka çalışmasıydı. Saha incelemeleri, mafsallı plakalarının kırıldığını ortaya çıkardı ancak son incelemede tasarım, montaj ve bir dizi hatanın kazanın nedenleri olduğu bulunmuştur.

Çatı makaslarında, yanlış bir tasarım veya inşaat tekniği kullanılması durumunda, rüzgar yüklemesi yanal veya yükselme (uplift pressure) basınçları nedeniyle yapısal bütünlük kaybına neden olabilir. Bir dizi burkulma problemi oluşabilir, bu da tüm yapının aşamalı olarak çökmesine neden olabilir ve hatta benzersiz bir ani burkulma çökmesi meydana gelebilir. Yapısal konfigürasyon inşaat sırasında sürekli değişir ve geçici destek sistemleri eksik veya etkisiz olabilir; bu nedenle, bu aşamada, kararsızlık olaylarının meydana gelme olasılığı, son yapısal konfigürasyondakinden daha yüksektir.

Brencich (2010) tarafından yapılan bu çalışmada, inşaat sırasında uzun açıklıklı bir çatı yapısının çökmesi, çatı için kullanılan inşaat tekniğinin nedenlerini belirlemek ve etkilerini araştırmak için tartışılmıştır. Yapının kaza anındaki güvenlik seviyesini, nedenleri ve sorumluluklarını değerlendirmek için adli makam adına adli soruşturmalar yapılmıştır. Çökme mekanizmasının bir rüzgar esintisi altında kirişlerin anlık burkulması olduğu, göz önüne alındığında, yazarlar inşa edildiği gibi çelik yapı üzerinde hem doğrusal hem de doğrusal olmayan burkulma analizleri gerçekleştirdiler. Yapısal tasarımcı tarafından tanımlananın yerine geçici bir destek sistemi kullanıldığından, yapıya genel stabilite sağlamadaki etkinliği tartışılmaktadır. Kazayı önlemek için izlenebilecek bir yapı inşa dizisi, bu vaka çalışmasından öğrenilen bir ders olarak tanımlanmaktadır. Tartışmayı desteklemek için, bazı yapısal kararsızlık kavramları, analiz prosedürleri ve hesaplama stratejileri kısaca gözden geçirilmiştir.

Yapısal dengesizlik, inşa edilen tesislerde büyük arızalara veya çökmeye neden olabilir. Yapının doğal denge yolu, kuvvet-yer değiştirme düzleminin başlangıcından geçen bir kuvvet yer değiştirme eğrisi olarak tanımlanır. Stabil burkulma sonrası konfigürasyonlar yapı için büyük bir başarısızlıktır, oysa stabil olmayan burkulma sonrası koşullar çökmeye neden olur. Yapı bir sınır yüküne ulaşırsa, büyük yer değiştirmeler aşamalı veya geometrik burkulmaya neden olur, bu da malzeme arızası meydana gelirse büyük bir arızaya ve hatta çökmeye yol açabilir. Aşamalı ve anlık burkulma olayı, 1978'de Hartford Civic Center Coliseum çatısının feci çöküşünün gösterdiği gibi, genellikle çatı yapılarını içerir (Martin ve Delatte 2001).

Yapının genel kararsızlığı, rijitlik matrisi tekilliğine ulaşılmasına karşılık gelir. Bu tür durumlarda, yer değiştirmeler sonsuza yükselir ve herhangi bir kuvvet, ne kadar küçük olursa olsun, doğrusallaştırılmış teoriye göre sonsuz büyük yer değiştirmelere neden olur.

Genel olarak bahsedilen bu vaka çalışması, mühendislik yapılarının maruz kaldığı büyük arızaların ve çökmelerin nedenlerini ve dolayısıyla sorumluluklarını değerlendirmek için sayısal analizlerin başarıyla gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Adli soruşturmalar daha sonra hem küçük hem de büyük felaketlerin nitel değil nicel bir değerlendirmesi için sağlam bir bilimsel temel sağlayan bir dizi yapısal analizi içerebilir.

Bahsedilen çalışmada inşaat sırasında uzun açıklıklı bir çatı yapısının anlık burkulma çökmesi incelenmiştir. Saha incelemelerine ve bir fotogrametrik incelemeye dayalı olarak, yerleşik yapının üç boyutlu bir FE modeli oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Gerçekte aşıklar ve kabloların sayısı stabiliteyi sağlamak için yeterli değildi; bu nedenle, tasarımda varsayılandan önemli ölçüde daha düşük rüzgar basınçları, çökmeye yol açan denge konfigürasyonunun ölümcül bir bozulması haline geldi. İkincisi, hem dikey hem de yatay X tipi destekler ile ana kirişlerden çatı yapısının montajına başlanarak engellenebilirdi.

Buraya kadar yapılmış olan literatür araştırmaları ile çelik yapıların yapımı esnasında meydana gelen göçmeler ve aşamalı göçme olayları bağlamında bir anlayış oluşturulmaya çalışılmıştır. Genel bağlamda bu konulara dair fikir oluşması sağlanmaya çalışılıp sonraki bölümde daha özel kapsamlı çalışmalardan bahsedilmiştir.

2.4. Geniş Açıklıklı, Kubbe Formlu Çelik Yapılar

Tez kapsamında bu bölümde daha spesifik olarak kubbe yapıları incelenmekte, kubbe yapıların genel bir tanımı yapılmakta ve kubbe formlarının özelliklerine değinilmektedir. Ayrıca kubbe formlu yapılar için aşamalı göçme durumlarına ve yapı montajı sırasındaki olumsuzluklara değinilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmaların aktarılması ile analizi yapılan kubbe formlu yapının detaylı incelemesi için bir temel oluşturulmaya çalışılmıştır.

Herhangi bir yapının doğru şekilde tasarımını yapmak, yapılan tasarımı iyileştirmek ve güncel taleplere uygun şekilde cevap verebilmek adına tasarım bütünlüğü son derece önemlidir. Taşıyıcı sistemin, malzemenin mekanik özellikleri ile birlikte montaj ve yapım aşaması da öncelikli olarak planlanmalıdır. Tüm inşaat yapıları için sağlıklı bir süreç izlenebilmesi için gerekli tüm prosedürlere uyulmalıdır. Bu bölümde uzay kafes yapıların daha spesifik olarak da kubbe formlarının gereklilikleri, özellikleri ve ilgili çalışmalar ele alınacaktır.

İnşaat mühendisliği alanında uzay kafes literatür taraması yapıldığında geniş anlamıyla üç boyutlu yapılardan bahsedildiği görülmektedir. Daha özel olarak ise birden fazla düzlem aracılığı ile çubuk ve düğüm noktalarından meydana gelen ve yapıya etkiyen yükleri üç boyutu kullanarak bir bütün halinde dengeleyen özel bir yapı tanımıdır. Uzay kafes sistemlerin, kesişen yapısal elemanların tek tabakalı, çift tabakalı veya çok tabakalı diziler halinde düzenlenmiş formları bulunmaktadır (Özcan, 2019). Bu tez kapsamında tek tabakalı kubbe formu çelik bir yapıya odaklanılmıştır.

Geçmişten günümüze, geniş açıklıkları sağlıklı bir şekilde geçmeyi sağlayacak yeni yapısal form arayışı, tasarımcıların en temel amaçlarından birisi olmuştur. Bu arayışın bir sonucu olarak, uzay kafes sistemler ortaya çıkmıştır. 1900'lü yıllardan itibaren, uzay kafes sistemlere olan ilgi dünya genelinde artmıştır. Malzeme ve yapı teknolojilerindeki gelişmelerin doğal sonucu olarak uzay kafes sistemler, mimarlar ve mühendislerin yapısal form arayışlarında hafiflik, ekonomiklik ve hız açısından en uygun çözüm haline gelmiştir. Yapı mühendisliğinin gelişmesinde en etkili iki dürtü; güvenli olmak şartı ile ne kadar açıklık geçilebileceği ve ne kadar yüksek yapılar inşa edilebileceğidir.

Kolonsuz geniş alanlar gerektiren yapılar için uzun açıklıklı yapı sistemlerinin gerekliliği bilinmektedir. Uzay yapıları bir tür verimli uzun açıklıklı yapısal sistemdir (Ramaswamy ve Eekhout, 2002). Engelsiz kapalı alanlar, birçok amaç için talep edildiğinden, geniş açıklıkların kullanılabilirliği her zaman etkileyici olmuştur. Uzay yapıları ve daha spesifik olarak kubbe yapı sistemi, bu istenen hedefe ulaşmak için etkili bir yoldur. Bu yapılar her yönden gelen yüklere dayanabilen üç boyutlu yapılardır. Ayrıca imalat hassasiyeti ve montaj kolaylığı sağlamaktadır. Kurulum civatalama ile gerçekleştirilir ve atmosferik koşullardan bağımsız olarak yapılabilirken, estetik nitelik sağlamaktadır. Düğüm noktası tasarımlarının geliştirilmesine paralel olarak, geniş açıklıklı sistemlerde kullanım alanı bulan tek tabakalı uzay kafes sistemlerin en yaygın kullanılan formu; minimum yüzeyde maksimum hacim ve ekonomik malzeme kullanımı sağlayan kubbelerdir. Bu yapılara verilebilecek en iyi örnekler; müzeler, sanayi yapıları, spor yapıları, fuar merkezleri, hangarlar, sergi merkezleri, havaalanları, toplantı salonları, yüzme salonları ve endüstriyel binalar gibi yerlerdir.

Büyük açıklıkları geçmek için genellikle beşik tonozlar, kubbelere, kemerler vb. gibi çeşitli yapılar kullanılmaktadır. Ancak, geniş alanların bir çatı formu ile geçilmesi için kolay ve

ekonomik bir yöntem sağlayan kubbe, tasarımcılar için en etkileyici olanıdır. Yapısal elemanların, tasarıma uygun bir geometri ile üretilmesi halinde, yapı bileşenlerinin birbiri ile yüksek ölçüde uyumlu çalışacağını net bir biçimde gösteren kubbe formları ile geniş açıklıkların geçilmesi hem güvenlik açısından hem de ekonomik açıdan daha avantajlı olmaktadır (Kuzulu, 2015). Kubbe, minimum miktarda yüzey alanı gerektirirken maksimum miktarda alanı çevreleyebilir (Makowski, 1984). Bu nedenle kubbeler, minimum malzeme gerektirirken son derece geniş bir alanı kaplayabilme yeteneği sayesinde genellikle ekonomik bir yapısal sistem olduğunu kanıtlar.


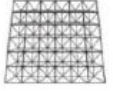







Kubbe, uygulanan yükleme için uygun şekilde oluşturulmuş ve dizayn edilmiş ise, tüm elemanları yükleri bükülme veya burulma momentleri olmadan yalnızca aksenal harekette taşıyacak şekilde tasarlanabilir. Yapının biçimi yalnızca aksenal gerilmelere ulaşmak için belirlenebiliyorsa, bu son derece çekici ve etkili bir yapısal sistemdir (Makowski, 1984). Geleneksel bir yapısal şemada, kuvvetler, ikincil kirişlerden birincil kirişlere ve daha sonra nihayetinde kuvvetleri zemine ileten kolonlara belirli bir üye hiyerarşisi yoluyla aktarılır (Ramaswamy ve Eekhout, 2002).

Uzay kafes kubbe yapıları için, belirli bir konumdaki bir yükleme, kuvvetlerin çok sayıda üyeye dağıtılmasına neden olur. Kubbe yapıları oluşturan elemanlar, etkiyen kuvvetleri, öncelikle basma veya çekme yoluyla aktarır. Bu kuvvetlerin üç boyutlu olarak iletilmesinin sayesinde, elemanlar daha hafiftir. Bu nedenle, uzay yapılarının öz ağırlıkları diğer yapısal sistemlere kıyasla nispeten küçüktür. Bir diğer önemli nokta şudur ki; ekonomik olarak uzay yapıları, inşa edilmesi ve imal edilmesi daha kolay olduğu için daha ucuzdur. Birçok üyenin belirli bir yükü taşımaya yardımcı olması nedeniyle farklı boyuttaki üye sayısı en aza indirilmiştir. Çoğu durumda, bir uzay çerçevesi yalnızca bir veya iki boyutlu üyeden oluşacaktır. Bu, uzay çerçevelerinin seri üretimine izin verir ve sonuç olarak fabrika üretimi nedeniyle daha kolay inşaat yapılmasına izin verir (Ramaswamy ve Eekhout, 2002).

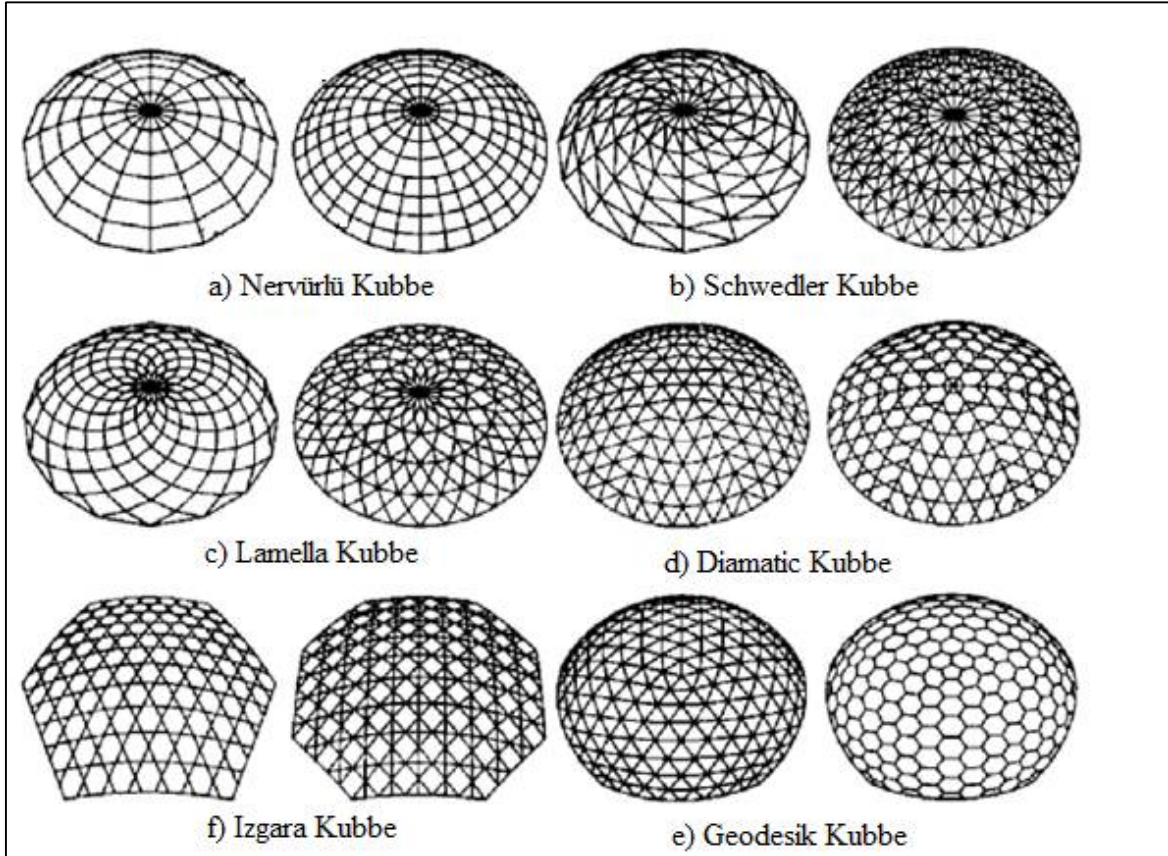
Kubbelerin yapımı malzeme niteliklerinin ve üreticilerin iş bilgisinin artması ile doğru orantılı olarak gelişmiştir. 19. yy'da demirin ortaya çıkışı ve akabinde çelik malzemenin üretilerek kullanılmaya başlanması ile birlikte tasarımcılar için heyecan verici gelişmeler yaşanmıştır. Mühendis ve mimarlar nispeten yüksek mukavemet ve nispeten hafif ağırlığın potansiyelini ve avantajlarını hızlı bir şekilde fark etmişlerdir. Böylece özellikle son yıllarda çelik yapılar hızlı bir şekilde betonarme yapıların yerini almaya başlamıştır. Bu durum en

çok kubbe tarzı yapılar için gelişmelere hız kazandırmış ve geniş açıklıkların çelik elemanlardan oluşan kubbeler ile örtüldüğü örnekler ortaya çıkmıştır. Betonarme ve betonun daha sonraki gelişimi, beton ve çelik takviye çubuklarının kombinasyonu ile yeni tip kabuk kubbe yapılarının inşasına olanak sağlamıştır (Makowski, 1984). Çelik malzemenin kubbe formları için kullanılma sebebi olarak diğer avantajlar arasında imalat kolaylığı öncelikli olarak sayılabilir. Çelik için bağlantı kolaylığı da bir avantajdır çünkü kaynak ve cıvatalama nispeten gelenekseldir ve bu nedenle ucuzdur. Prefabrikasyon, montaj ve seri üretim kolaylığı, çelik yapı elemanlarının diğer önemli avantajlarıdır (Narayanan, 2006).

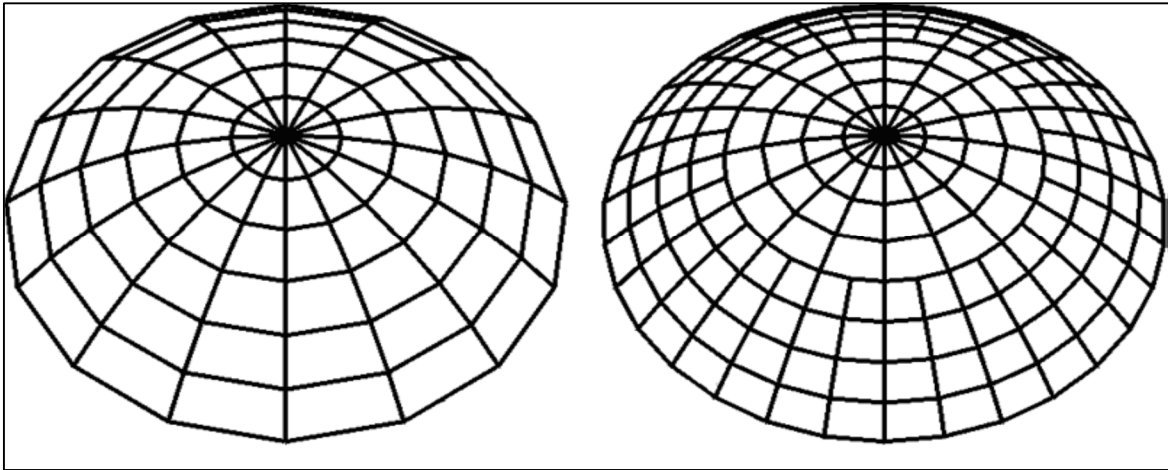
Kubbesel yapılar tek, çift veya çok tabakalı olarak tasarlanabileceği gibi eğriliklerine göre de birbirlerinden ayrılabilirler (Şekil 2.9). En sık kullanılan tek tabakalı kubbe formları ise Radyal, Schwedler, Lamella ve Jeodezik kubbe sistemleri olup Şekil 2.10 bazı kubbe formlarını göstermektedir (Kara, 2019).

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

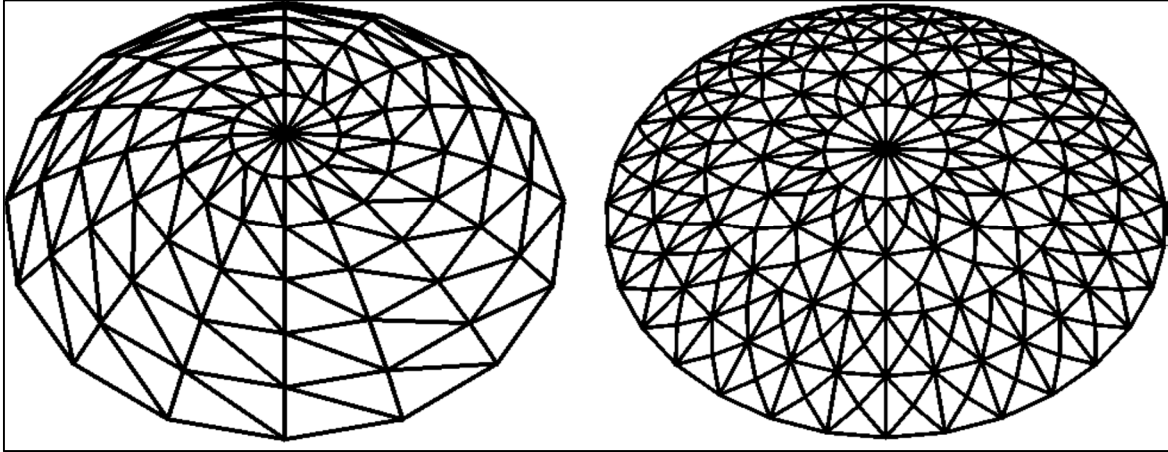
Şekil 2.9. Uzay kafes sistemlerin geometrilerine göre sınıflandırması (Kara, 2019)



Şekil 2.10. Kubbe örnekleri (Sophianopoulos, Argyriou ve Papanikolaou, 2011)



Şekil 2.11. Radyal kubbe formu (Urfalı, 2012)



Şekil 2.12. Schwedler kubbe formu (Urfalı, 2012)

Bu bölümde, nervürlü kubbe ve Schwedler kubbenin özellikleri ve davranışı incelenmiştir. Üretim kolaylığı yönüyle daha sık tercih edilmekte olan kubbe formlarının nervürlü kubbe ve Schwedler tipi kubbe olduğu (Şekil 2.11-12) belirtilmektedir (Özcan, 2019). Bu kapsamda ele alınan ve analizi yapılan kubbe türü, radyal (nervürlü) kubbe olup Schwedler kubbe ile kıyaslamalarına da yer verilecektir.

Kubbe şeklinin, kolonlar veya kısıtlamalarla engellenmeyen yeterli bir iç hacim sağlayarak, yapı malzemelerinin kullanımı açısından çok uygun maliyetli olduğu kanıtlanmıştır. Nervürlü kubbenin köşegen elemanları yoktur ve yapısal olarak sabit değildir; bu nedenle, stabilite için rijit olarak mafsallı bir sistem olarak tasarlanmalıdır (Nayak ve Vedant, 2017).

Nervürlü kubbe sistemleri olarak da bilinen radyal kubbe sistemler tarihteki en eski kubbe formlarındandır. Radyal(nervürlü) kubbeler, üstte bir basınç halkası, altta bir çekme halkası ve basınç halkasından uzanan nervürler ile oluşturulan kubbe biçimidir. Sistemde üçgen birimler yer almadığından; yapı stabilitesi, rijit birleşimler ile veya çapraz kablolar ile sağlanmalıdır. Basınç halkasından uzanan nervürlerin ısı kaynaklı genleşmelerden fazla etkilenmemesi için radyal doğrultuda düzenlenen ve yatay yönde yer değiştirmeye izin veren kayar mesnetlere birleşmesi gerekmektedir (Lan, 1999).

Schwedler kubbe sistemleri, radyal kubbedeki gibi ışınsal uzanan nervürlerin kendi arasında bir ya da daha fazla sayıda eleman ile bağlanması durumunda oluşan kubbe formlarıdır. Nervürlü kubbelerde her nervür tek bir olarak eleman sayılırken, Schwedler kubbe formunda nervürler diğer elemanlarla birlikte çalışmaktadır. Nervürler, kubbenin tepe noktasında yer alan basınç çemberine rijit ya da mafsallı, çekme çemberine genellikle mafsallı birleşir.

Mafsallı kubbelerde, halka sayısının artmasıyla yapı rijitliğinin azaldığı; ancak rijit birleşimli kubbelerde aksi durumun yaşandığı ifade edilmiştir (Lopez, Puente ve Serna, 2007). Radyal kubbeler ahşap, çelik veya alüminyum malzemeden yapılabilir. Güncel radyal kubbe örneklerinden biri Yunanistan'da bulunan, 61 m açıklıklı Rodos Palace kubbesidir (Şekil 2.13 ve 2.14).



Şekil 2.13. Rodos Palace Kubbesi



Şekil 2.14. Rodos içten görünüm.

Schwedler kubbede stabilite sağlanması için, nervürler arasında çapraz bağlantılar kullanılmaktadır. Kubbede bulunan yatay halkalar ile meridyenlerin kesişiminden meydana gelen her dilim, başka bir çapraz eleman tarafından iki üçgen haline getirilir. Bazen üçgen yerine yamuk şeklinde dilimlere de ayrılabilir. Sistem, çaprazlar sayesinde asimetrik yüklerden dolayı oluşabilecek kesme kuvvetine karşı dayanıklıdır (Lan, 1999). Çapraz elemanlar halka veya meridyen çubuklardan büyük ölçüde daha uzundur ve bu nedenle burkulma yüklerine karşı dayanıklı olmaları gerekir. Cam kaplamalı kubbelerde kullanım bulabilirken diğer kullanımlar için bu geometri, alternatif geometrilere kıyasla %20-30 daha ağır bir yapı oluşturmaktadır.

Vaznaa ve Zarrin (2020) tarafından yapılan çalışma da yukarıdaki bulguları doğrular niteliktedir. Nitekim bu çalışmada Schwedler kubbesinin aşamalı göçme direncinin, ilave diyagonal elemanlar tarafından dikkate değer ölçüde geliştirildiği görölmektedir.

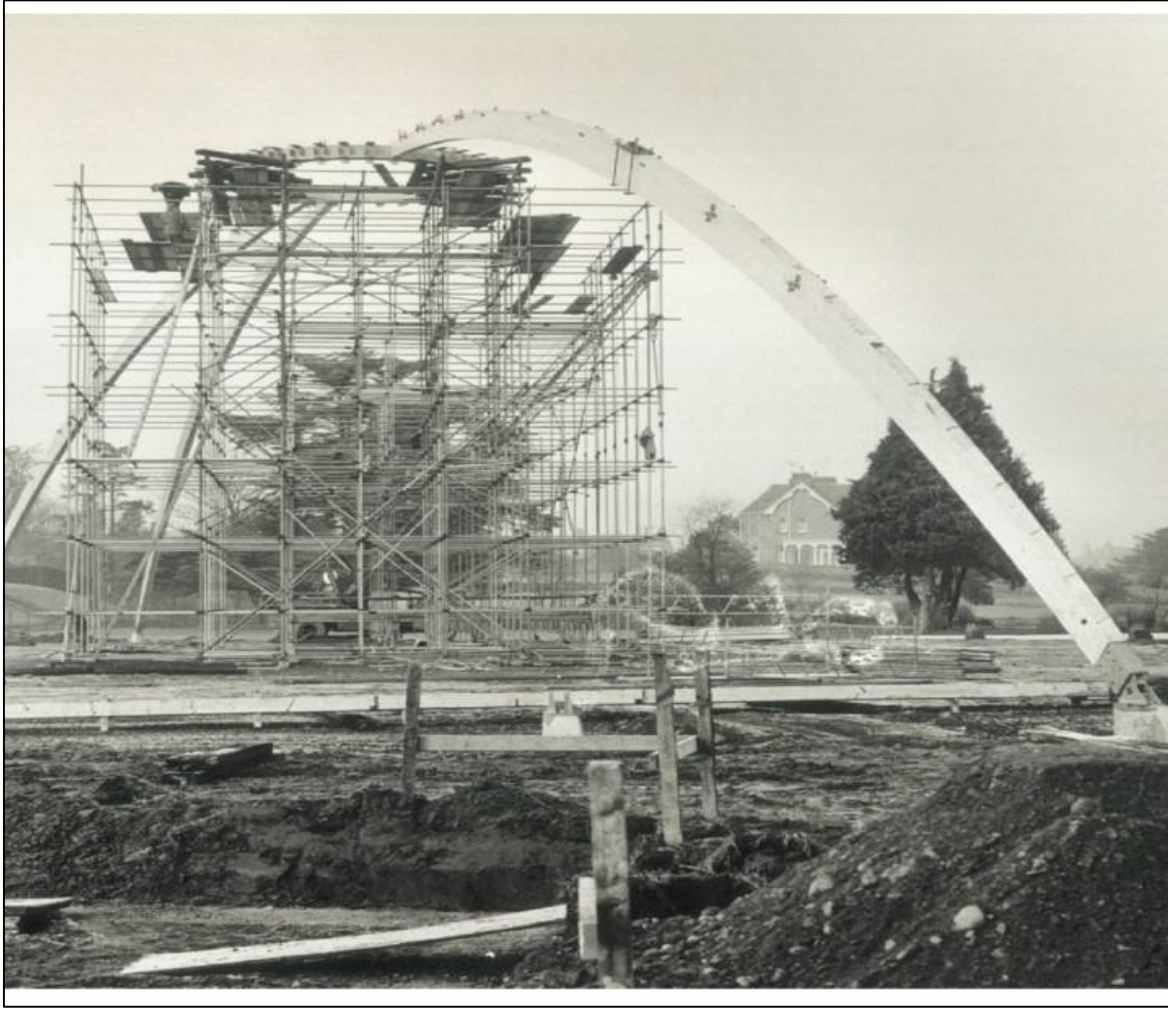
Nervürlü çelik kubbe formları, prefabrikasyon olanağı sayesinde popülerliğini koruyan en eski kubbe formlarındandır. Daha önce belirtildiği gibi, bir gerilme halkası ile rijitliği sağlanmış ve basınç halkasında birleşen rijit kirişler ve radyal makaslardan oluşan yapısal kubbe formu bir sistemdir. Nervürlü kubbenin eski örneklerinden bir tanesi olan Bell's Sports Centre, bu yapı formları için iyi bir örnek olup çapı 67 m olan alanda, 35 m uzunluğunda inşa edilen 36 adet yay formu kiriş ile meydana getirilmiştir (Şekil 2.15-17).



Şekil 2.15. Bell's Sports Centre



Şekil 2.16. Bell's Sports Centre içten görünüm



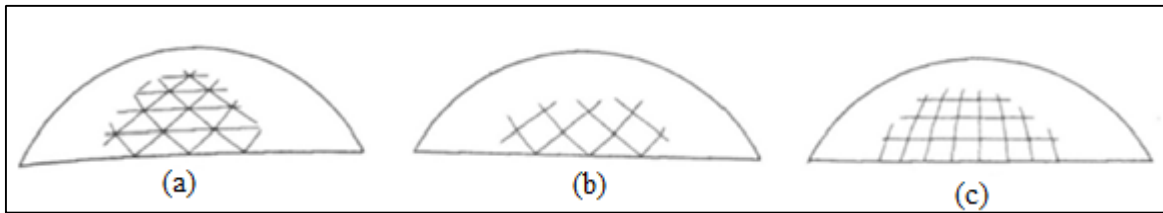
Şekil 2.17. İskele kurulumu, Bell's Sports Centre

Schwedler formu kubbe asimetrik yüklere karşı koyabilmek amacıyla Alman bir inşaat mühendisi olan Johann Wilhelm Schwedler tarafından 1863 yılında ortaya atılan yapıyı çapraz doğrultuda güçlendirme düşüncesi ile ilk defa ortaya çıkmıştır. Bu kubbe formu meridyen doğrultulu nervürler ile yatay doğrultudaki kirişlerin oluşturduğu trapez bölgenin, çapraz yapısal elemanlar ile üçgenlere ayrılması ile oluşmuştur. Temel olarak radyal ve nervürlü kubbe formları hakkında bilgi verilmiş olup bağlantılar ve birleşimler üzerine bir kısım açıklamalarda bulunulmasında fayda olduğu düşünülmektedir.

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılacak malzeme detayları ve birleşim şekilleri yapıların mimari ve mühendislik tasarımlarını belirlemektedir. Açıklık mesafesi ve yük aktarımının nasıl olması gerektiğine bağlı olarak, tek tabakalı uzay kafes sistemlerde tercih edilecek birleşim tipi ve birleşim şekilleri değişkenlik göstermektedir.

Uzay kafes sistemlerde kullanılan birleşimler, moment aktaran birleşimler ve mafsallı birleşimler olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Mafsallı birleşimlerde eğilme momenti değeri ya sıfır ya da sıfıra yakındır, birleşen elemanların görelî dönme hareketine izin veren bir birleşim tipidir. Moment aktaran birleşimler ise yine kendi içinde ikiye ayrılmış olup bunlar; elastik moment aktaran ve rijit moment aktaran birleşimler olmak üzere ikiye ayrılır. Rijit birleşimlerde; görelî dönme hareketinin birleşen elemanlar arasında tam olarak sınırlandırıldığı kabulü yapılmaktadır. Diğer bir ifade ile düğüm noktası, yeterli rijitlik ve dayanıma sahip olacak şekilde görelî dönme hareketinin sıfıra eşit olmasını sağlayacaktır. Birleşen elemanlar arasındaki dönme hareketinin sıfıra eşit olmadığı yani tam olarak sınırlandırılmadığı durumlar ise yarı rijit birleşimler için geçerlidir. Rijit ve yarı rijit birleşimli sistemlerde malzeme ve geometri açısından doğrusal olmayan davranış hesaba katılmalıdır (Kara, 2019).

Şekil 2.18 (a), ile gösterilen çaprazlar kullanılarak üçgenler ile tam olarak ayrılmış kubbe formları, her yönde daha yüksek rijitlik ve kararlılık özelliği gösterir. Kubbe formu yapılar çapraz elemanlar ile üçgenlere ayrılmamış ise, farklı doğrultularda birbirinden bağımsız olarak farklı rijitlik göstermekte ve bu durum yapıyı labil hale getirebilmektedir. Şekil 2.18 (b), ile gösterilen kubbe formunda birleşimler ve yapısal taşıyıcı elemanlar ancak eğilme momentine karşı mukavemet gösterebilmektedir. Şekil 2.18 (c), ile gösterilen kubbe formunda ise asimetrik yüklere karşı mukavemet göstermesi açısından ve kubbeyi kararlı ve dengeli hale getirebilmek amacıyla sürekli birleşimlere ihtiyaç duyulmaktadır (Özcan, 2019).

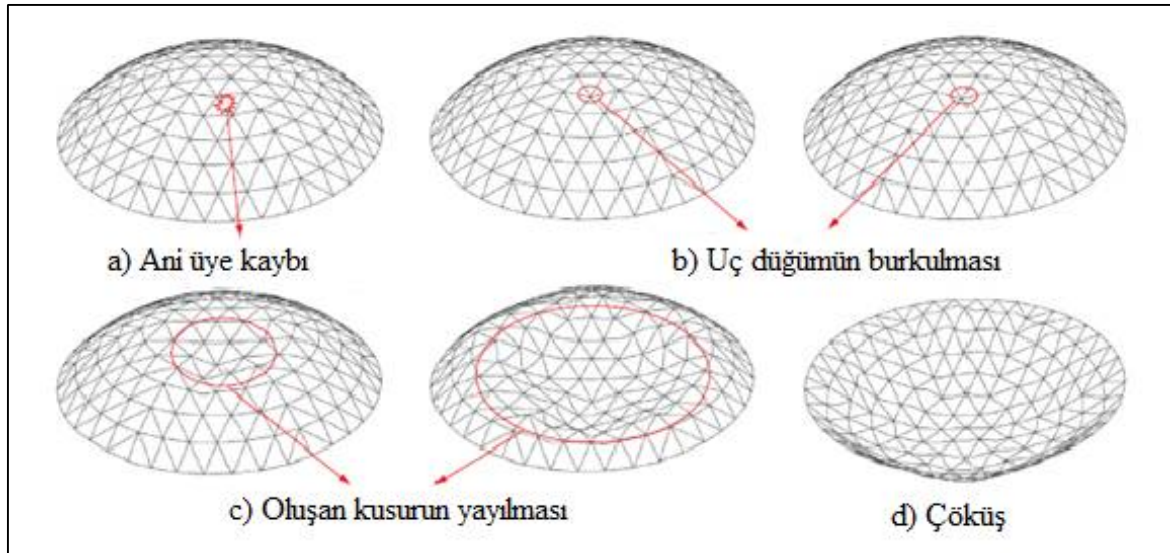


Şekil 2.18. Kubbe formları (a) üçgenlere ayrılmış, (b, c) üçgenlere ayrılmamış (Özcan, 2019)

Hosseini, Hajnasrollah ve Herischian (2012) tarafından yapılan diğer bir çalışma Schwedler, Radyal (Nervürlü) ve Diamatik kubbelerin sismik davranışını konu almıştır. Yapılan bu çalışmanın sayısal sonuçlarına dayanarak aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Yapılandırma olarak daha benzer olan Schwedler ve Nervürlü kubbelerin davranışları da daha benzerdir. İncelenen her üç kubbe türünde de kaynağa daha yakın olup depremlere maruz kalan kubbelerin etkilenmesi daha fazla olmuştur. Tasarlanan üç kubbe türü arasında Schwedler kubbeleri sismik açıdan en savunmasız olanlardır ve nervürlü kubbeler sismik açıdan daha dayanıklı kubbelerdir. En büyük gerilme oranı Schwedler kubbelerinde gözlenirken, eksenel kuvvet miktarının elemanın burkulma yükünü aştığı en büyük eleman sayısı diamatik kubbelerde gözlenmektedir. Bulgular nervürlü kubbelerin Schwedler ve diamatik kubbelere göre daha iyi sismik davranışa sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmada ayrıca yükseklik/açıklık oranı da incelenmiş ve daha yüksek H / D değerlerine sahip kubbelerin (örneğin 1/4 veya 1 / 5'ten fazla) yatay depremlere karşı daha savunmasız ve daha düşük H / D değerlerine sahip kubbelerin düşey depreme daha hassas olduğu belirtilmiştir.

Yan, Zhao, Rasmussen ve Zhang (2019) tarafından yapılan tek katmanlı kafesli kubbelerin aşamalı göçme analizi için kritik üyelerin tanımlanması adlı çalışmada, kubbedeki her bir eleman üzerinde analiz yapılmış ve kritik elemanlar, ilk arızası yapısal performansta en ciddi düşüşe neden olanlar olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Köşegen bir elemanın ani kaybına maruz kalan bir kubbenin çökmesi

Bu çalışmada aşamalı göçme mekanizmasına ve düğüm burkulma direncini etkileyen faktörlere ilişkin yerleşik anlayışa dayanarak, tek katmanlı kafesli kubbelerin aşamalı göçme direncini artırmak için birkaç yöntem önerilmektedir. En dikkat çekici bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Yapının davranışının, yapının düzen dışı kusurlarına büyük ölçüde duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Yapıların öz ağırlığı ile ilgili olarak, 0,2 H/D (yükseklik/açıklık) oranlı kubbe en optimum konfigürasyondur.
- Kritik üyelerin doğru bir şekilde tanımlanması, en tehlikeli çökme senaryolarının dikkate alınmasını sağlar ve ayrıca hesaplama maliyetini düşürmeye yardımcı olur.

Özcan (2019) tarafından yapılan çalışma yapı malzemeleri alanındaki gelişmeler sayesinde kubbe formu yapılarda yüksek dayanım gösteren ancak daha küçük kesitlere sahip yapı malzemelerinin kullanıldığını göstermektedir. Küçük kesitlerin bu yapılarda kullanılması ile yapı ağırlığı azaltılarak, kolonlara gelen yüklerin de bu sayede azaltıldığı belirtilmiştir. Fakat kesitlerin küçülmesinin bir dezavantajı olarak narinliğin arttığı ve bu yüzden tek tabakalı uzay kafes yapıların stabilite sorununun meydana geldiği aktarılmıştır. Çalışmanın devamında tek tabakalı nervürlü uzay kafes kubbe yapılarının stabil olma şartları ve montaj aşamasında yaşanabilecek olası olumsuz durumların etkilerine değinilmiştir.

Çalışma sonuçları nervürlü kubbede rijitliği sağlamak amacıyla daha büyük kesitlerin kullanım ihtiyacının oluşacağını göstermiştir. Çözüm olarak kesitlere belirli sınırlar getirilerek narinlik sorununun eleman özelinde aşıldığı ancak yapı bütününe ilgilendiren genel stabilite şartının tasarımcının öngörüsüne kaldığı belirtilmiştir.

2.5. Kubbe Formlu Yapıların Göçme Olayları

Yaygın olarak uygulanan uzun açıklıklı tek katmanlı yapılarının aşamalı göçmesi, yapı mühendisliğinde henüz genç bir araştırma konusudur. Daha önceki bölümlerde aşamalı göçmenin tanımı ve olası aşamalı göçme senaryolarından bahsedilmiş olup bu kısımda kubbe yapıların aşamalı göçme senaryoları üzerinde durulacaktır.

Farklı tanımları yapılabilen yapısal arıza; Feld ve Carper'a (1996) göre, tasarım eylemleri altında önceden tanımlanmış bir seviyeyi aşan bir bileşende gözlemlenen ve beklenen performans arasındaki fark olarak tanımlanabilir. Performans uyumsuzluğu; çatlama, akma, korozyon, sünme, yorulma, darbe yüklemesi veya termal şok nedeniyle kabul edilemez bir yük taşıma kapasitesi kaybı veya aşırı deformasyonlar olabilir. Büyük arıza ise, yapısal

sistemin ilgili kısmına bakılmaksızın, servis kolaylığı veya can güvenliği kaybına neden olan bir kaza olarak tanımlanabilir. Büyük terimi, göçmenin neden olduğu önemli etkileri belirtir; sınırlı sayıda birincil yapısal bileşen veya sadece bir kolon arızası bile çökmeye, yani yapısal bütünlük kaybına neden olabilir. Büyük bir arıza başlangıçta yapının küçük bir bölümünü etkileyebilir ve ardından komşu elemanlar boyunca diğer yapısal elemanlarda ilerleyerek çökmeye neden olabilir; Bu, fazlalığı düşük olan uzay kafeslerinin klasik bir çökme modudur. Tipik olarak, hem büyük kusurlar hem de yapı çökmeleri, izole edilmesi ve ölçülmesi zor olan nedenlerin bir kombinasyonu tarafından üretilir; bu bileşenler, iddiaları ve sorumlulukları belirlemek için, davalarda temel bir konudur.

Aşamalı göçme, bir veya birkaç anahtar yapısal bileşenin arızalanmasından kaynaklanan feci bir kazadır. Betonarme ve çelik çerçeve yapıların aşamalı göçme direnci üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır ve buna karşılık gelen başarılar, örneğin çökmeye dirençli mekanizma, analiz ve tasarım yöntemleri, şartnamelerde yansıtılmıştır. Çerçeve yapılarla karşılaştırıldığında, uzun açıklıklı uzaysal yapıların çökmeleri daha ciddi bir can ve mal kaybına yol açabilir ve aşamalı göçme direnci üzerine daha fazla araştırma yapılmalıdır. Genellikle, uzun açıklıklı uzaysal yapılar, kuvvet aktarım mekanizmasından dolayı çerçeve yapılarından tamamen farklıdır (Tian, He, Zhang ve Bai, 2021).

Tarihsel süreçte kubbesel yapı formlarının farklı sebeplerle göçmüş olduğu çok sayıda olay meydana gelmiştir. Bu göçmeler hem yapım aşamasında hem de tamamlanan yapıda meydana gelebilmektedir. Göçen yapılar incelendiğinde montaj aşamasında göçen yapılar ve bitmiş yapılar incelenmiştir. Çökmeler genellikle birbirini takip edecek şekilde meydana gelmiş olup konu olarak aşamalı göçme bağlamında incelenmiştir.

Yan, Zhao, Chen, Xu ve Lu (2018) etkili ve güvenli tasarımlar için, kubbe yapılarının statik ve dinamik kararlılığını, depreme dayanıklılığını ve optimum topolojik tasarımını araştırmak üzere kapsamlı çalışmalar yapmıştır. Bununla birlikte, tek katmanlı kafesli kubbelerin aşamalı olarak çökmesi, araştırmaya ihtiyaç duyan bir alan olmaya devam etmektedir.

Zhao, Yan ve Chen (2017) iki tek katmanlı kafesli Kiewitt kubbesi üzerinde aşamalı göçme testleri yapmışlar ve bir kubbenin çökmesinin yalnızca tek bir kritik elemanın kaybından kaynaklanabileceğini göstermişlerdir. Bu, tek katmanlı kafesli kubbeler için mevcut analiz ve tasarım yöntemlerinin daha fazla araştırılmasına olan ihtiyacı göstermektedir.

Kafesli kubbe, aşamalı göçme durumunda en iyi performansı gösterir. Bunun nedeni, bir kubbenin geometrisinin pratikte esnek olması ve küçük bir ayarlamanın, örneğin üst düğümün etrafındaki bazı üyelerin çıkarılması, en kritik elemanların dağılımını ve ilişkili çökme yüklerini tamamen değiştirebilmesidir.

Tek katmanlı kafesli kubbelerin aşamalı göçme direncini arttırmak, yani kritik elemanı ve uç düğümlerine bağlanan elemanları güçlendirmek, kubbenin yükselme açıklığı oranını arttırmak ve çift katmanlı kubbe formu kullanmak gibi birkaç yöntemden bahsedilmiştir (Yan ve diğerleri, 2018).

Yan ve diğerleri (2018) kafesli bir kubbede kritik öğeyi tanımlarken, aşamalı göçme bağlamında, çıkarılması en ciddi hasara neden olan eleman olarak belirtmişlerdir. Kritik üyelerin Kiewit kubbesi, Nervürlü kubbe, Schwedler kubbesi ve Lamella kubbesi dahil olmak üzere dört tipik tek katmanlı kafesli kubbeye dağılımı, yüzlerce bağımsız dinamik doğrusal olmayan analizden oluşan kapsamlı bir alternatif yol analiz şemasıyla incelenmiştir. Ayrıca, aşamalı göçme mekanizmasının yerleşik anlayışına ve düğüm burkulma direncini etkileyen faktörlere dayanılarak, tek katmanlı kafesli kubbelerin aşamalı göçme direncini artırmak için üç yöntem sunulmuştur.

İlki, en kritik üyeler belirlendikten sonra, kubbenin daha yüksek bir genel aşamalı göçme direncinin, bu üyelerin başlangıçta başarısız olmalarını önlemek için geliştirilmesiyle elde edilebilir. Bu yöntem "Gelişmiş Yerel Direnç" olarak adlandırılan yöntem yaklaşımıdır. İkincisi, yükselme açıklığı oranını artırmaktır. Üçüncüsü, kısmi çift katmanlı bir tasarımın benimsenmesidir. Tek katmanlı kafesli bir kubbenin aşamalı göçme direnci, potansiyel düğüm burkulmasını önlemek için kritik elemanların altına düzlem dışı kirişler eklenerek artırılabilir. Bu, tek katmanlı kafesli bir kubbeyi kısmi çift katmanlı kafesli kubbeye etkili bir şekilde dönüştürür.

Tian, Nie, Zhong ve Wei (2019) tarafından yapılan çalışma tek katmanlı kafesli kubbelerin aşamalı göçme testlerini, birden fazla yapısal elemanın arızalanmasından sonra farklı yapısal tiplerin dinamik tepkilerini, çökme mekanizmalarını ve çökme modlarını incelemek için gerçekleştirilmiştir.

İncelenen yapı örneğinde yerel çökme ilk önce yapıların yıkıcı kısmında meydana geldiği; daha sonra, göçen üyelerin sayısındaki artışla birlikte, çökme aralığının sürekli olarak genişlediği ve yapıların nihayetinde tam bir göçme sergilediği belirtilmiştir. Desteklerdeki bazı üyelerde çatlak veya boyunlanma görülmüştür.

İncelenen yapıda arızalı elemanın yakınındaki mafsalların gevşemesiyle, yerel yapının aşağı doğru hareket ettiği belirtilmiştir. Bu sebepler, yapının yerel olarak çökmesine neden olmuş ve çöküşün menziline sürekli olarak dışa doğru genişlediği görülmüştür. Radyal elemanların iç kuvvetlerinin aniden arttığı ve dengesizlik oluştuğu, böylece yapının devrilmesinin kaçınılmaz oluşuyla, yapı çökmüştür.

Tian ve diğerleri (2021) tek tip olmayan yüke maruz kalan test edilen kubbenin arıza modunun genel bir çökmeye maruz kaldığını göstermektedir. Bu çalışmada, muntazam olmayan yüke maruz kalan ölçekli tek katmanlı kafesli bir kubbenin aşamalı göçme testleri gerçekleştirilmiştir. Test edilen kubbenin göçme modu, dinamik tepkisi ve çökme mekanizması incelenmiştir. Çalışma sonrası elde edilen rapora göre şu sonuç çıkarılmıştır.

Kubbelere, yükün halka yönü boyunca üniform olmayan bir şekilde dağıtıldığı ve bu yükün radyal elemanlar etrafında üniform olmayan bir şekilde dağıtıldığı durumlarda çökmeye en yatkın olunan senaryodan bahsedilebilir. Ek olarak, tek tip olmayan yükler altında daha küçük bir yükselme-açıklık oranına sahip bir kubbe daha erken çöker.

Zhao ve diğerleri (2017) farklı üniform yükler altında tek katmanlı kafesli kubbelerin çökme dirençlerini karşılaştırdılar ve ilerleyen çökmenin nedenini analiz ettiler. Bu çalışmalarda iki tür yöntem sunulmuştur: Bunlar yerel güçlendirme ve küresel güçlendirme olarak isimlendirilmiştir. Ek olarak, uzun açıklıklı uzaysal yapıların çökmeye dirençli davranışını iyileştirmek için yeni düğümler ve elemanlar önerilmiştir.

Ekstra eleman takviyesi, stabilite arızasını önlemek için genel bir takviye yöntemidir. Sonuçlar, ekstra üye takviyesinin aşamalı göçmeye direnmek için güçlü bir teknik olduğunu doğrulamıştır (Tian ve diğerleri, 2021).

Zhao ve diğerleri (2017) tarafından tek katmanlı kafesli kubbelerin dinamik, aşamalı göçme direnci üzerine kapsamlı bir deneysel çalışma sunulmuştur. Çökme senaryolarında yapıların

doğru doğrusal olmayan davranışını incelemek ve FE sonuçlarını doğrulamak için kıyaslama verileri sağlamak için fiziksel testler vazgeçilmez olduğundan, kafesli kubbe yapılarının aşamalı göçmesi üzerine deneysel çalışmalara büyük ihtiyaç vardır. FE yöntemi ile 100 metreden fazla açıklığa sahip kafesli kubbelerin aşamalı göçme potansiyeli değerlendirilmiş ve tek katmanlı kafesli kubbelere göre çift katmanlı kafesli kubbeler daha iyi bir çökme direnci göstermişlerdir.

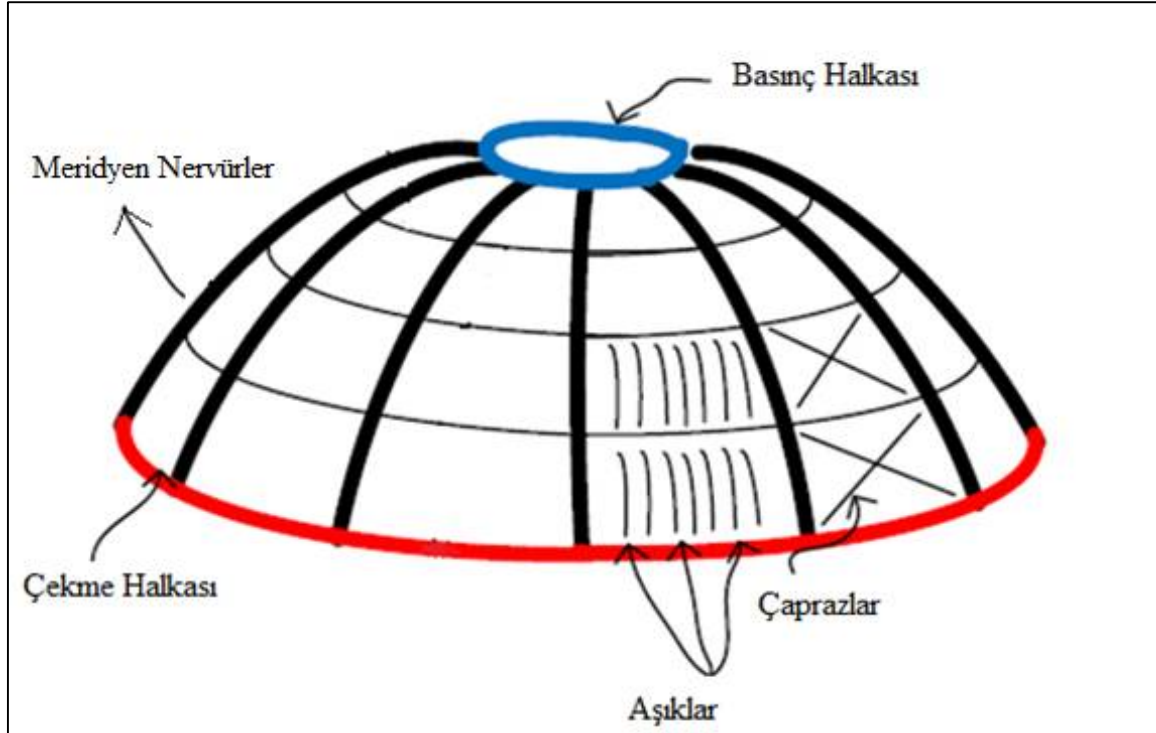
Bahsedilen çalışmaya göre daha küçük yükler altında test edilen kubbe kolayca dengeye kavuşurken, daha büyük yükler altında kubbe için hızlı bir çökme meydana geldi. Bu nedenle, normalde yüzlerce yapısal eleman ile tek katmanlı kafesli bir kubbe inşa edilmesine rağmen, tüm yapının aşamalı olarak çökmesine yalnızca tek bir kritik elemanın kaybı neden olabilir; dahası, tek katmanlı kafesli bir kubbenin yük direnci fazlalığı, aşamalı göçmeye direnmede çok önemlidir.

Ancak yine de geçmişte olan yapı göçmesi sebebiyle meydana gelen felaket olaylarının benzerlerinin önlemek için, yerel başarısızlıktan sonra geniş açıklıklı uzay yapılarının çökme direnci üzerine çalışmalara acil bir talep vardır. Ani üye arızasına maruz kalan herhangi bir yapı için, kuvvet dağıtımını iyi bir şekilde yerleştirilmelidir, aksi takdirde aşamalı göçme meydana gelecektir.

Deneysel çalışmalar bu konu bağlamında çok zor ve maliyetli olduğundan büyük çoğunlukla yapısal analiz programları aracılığı ile yapılan modellemeler ile konuya ışık tutulmaya çalışılmaktadır. Ancak modelleme ve yükleme parametrelerinde çeşitli belirsizlik kaynakları olduğu için yapısal tepkinin doğru tahmin edilmesi çok sorunlu bir konudur. Bu belirsizliklerin yapıların performansını nasıl etkilediğine dair net bir anlayışa sahip olmak gerekir. Bir uzay çerçevesinin imalat işlemi sırasında önceden tanımlanmış yeterli derecede doğruluk elde etmek ve elemanları mükemmel bir şekilde üretmek, iyi imal edilmiş çelik konstrüksiyonda bile çok zordur.

En eski kubbe yapılarından biri olan, radyal nervürlü kubbenin (Şekil 2.20), yük taşıyan kısmı, radyal olarak düzenlenmiş ve uçlarından mafsallanmış (meridyen nervürleri) ve bunların arasında bir dizi kavisli elemandan oluşur. Çevresel olarak düzenlenmiş bir dizi düz veya hafif kavisli eleman (dairesel halkalar) mevcut olup kubbenin tepesine, tipik olarak çelikten yapılmış bir basınç (sıkıştırma) halkası yerleştirilmiştir. Meridyen nervürleri, beton

temellere (böylece nervürlerden itme kuvvetini alabilir) veya kubbenin altındaki tipik olarak önceden gerilmiş betondan yapılmış bir germe halkasına ya da kolonlara bağlanır. Diğer elemanlar, çapraz destek elemanları ve aşıklardan oluşur.



Şekil 2.20. Nervürlü kubbe yapısının önemli elemanları

Tipik bir radyal nervür kubbe yapısının önemli elemanları meridyen nervürleri, dairesel halkalar ve germe halkaları olarak belirtilebilir.

Düğüm, özellikle ahşap büyük kubbe yapılarında önemli bir rol oynar. Çelik yapılarda tipik olan basit kaynaklı veya geçmeli bağlantılar kullanılmaktadır. Uyarlanabilir ve yapının kolay bir şekilde kurulmasına izin veren bağlantılar oluşturmak gereklidir. Bu konu ile ilgili çalışmalardan biri Crocetti (2016) tarafından yapılmıştır. Çalışmada geniş açıklıklı ahşap yapıların tasarımı için bazı yapısal değerlendirmelerde bulunulmuştur. Burada malzeme olarak ahşap kullanılmış olmasına rağmen genel anlamda kubbe yapıların bağlantı noktalarına ve kurulumuna dikkat çekildiği için incelenmiştir. Şekil 2.21’de görülen yapı İtalya, Brindisi’deki Enel Dome adlı jeodezik bir kubbeyi göstermektedir. İlginçtir ki, bu ahşap yapının Şekil 2.22’de gösterilen kurulumu, kubbe alanının ortasında geçici bir destek kulesi inşa edilmesine gerek kalmadan meydana gelmiştir. Bu da diğer yandan radyal nervürlü kubbe yapıları için tipik olan geçici destek kulesinin doğru montaj yapıldığı

müddetçe bu yapılarda kullanılmadan inşanın tamamlanabildiğini gösteren bir durumdur. Yapının montaj bağlantılarında kullanılan bir detay ayrıca belirtilmiştir (Şekil 2.23).



Şekil 2.21. İtalya, Brindisi'deki jeodezik kubbe



Şekil 2.22. İtalya, Brindisi'deki jeodezik kubbenin montaj aşaması



Şekil 2.23. Kubbenin montaj bağlantısının yakın gösterimi

Mekansal yapılarda tipik olarak kullanılan bir başka bir bağlantı örneği, hem çelik hem de ahşap olmak üzere bir dizi uygulamada başarıyla kullanılan "Mero" düğüm konektörüdür. Şekil 2.24 ve Şekil 2.25, uzay kirişinin her bir düğümünde aynı konektörün kullanıldığı Almanya'daki bir ahşap köprü yapısının düğüm noktalarının bağlantı durumu ile birlikte bu özel konektörün şeklini göstermektedir.



Şekil 2.24. Düğüm noktası örneği, Almanya, Thalkirchner Köprüsü

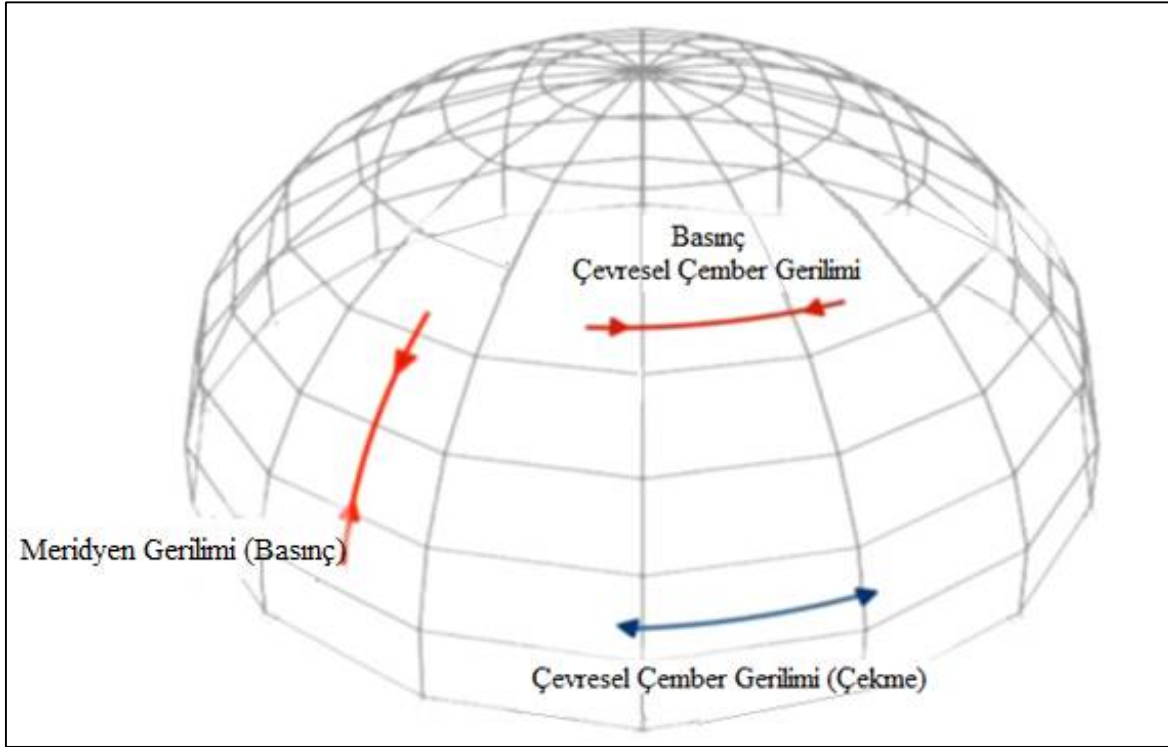


Şekil 2.25. Almanya, Thalkirchner Köprüsü, Mero Düğüm Konektörü detayı

Çubuklardan oluşan kubbelerde yapısal davranış, yapısal elemanların yerleşimine bağlıdır. Yapı tamamen üçgen hücrelere bölünmemiş ise kinematik kararlılık ve rijitlik, yapının yönlerine göre farklılık göstermektedir. Örneğin; dairesel gergi kubbeler, düzgün yayılı yüklere karşı rijit davranış gösterirken, düzensiz ve/veya noktasal büyük yüklere karşı, üçgen hücreleştirilmiş kubbeler avantaj sağlamaktadır (EN 1995-1-1).

Hung (2009) kubbe için kullanılacak yapısal malzemelerin karşılaştırılması üzerine çalışmıştır. Kubbelerin aşağıdan dışa doğru açılma ve genişleme eğilimi vardır. Bu nedenle, kubbenin genişlemesini önlemek için bir germe halkası gereklidir. Kubbenin tepesinde, köşegen elemanlar bir sıkıştırma halkasına bağlanır.

Kubbeler, verilen yükleri ve öz ağırlıkları çok fazla sehim ve dengesiz yer değiştirmeler olmadan taşıyabilir. Kubbe, kendi ağırlığı ile aksenal simetrik olarak yüklenir, bu nedenle basma kuvvetleri gözlemlenir ve bu kuvvetlerin büyüklüğü tepeden tabana doğru artar (Nayak, Jain ve Walke, 2020).



Şekil 2.26. Kubbe davranışı

Yük, aksenal sıkıştırma ile iletilir ve çember gerilimine halkalar tarafından karşı koyulur. Bu yapı, varsayımların basitleştirilmesi durumunda statik olarak belirleyici olarak da düşünülebilir. Şekil 2.26, kubbenin davranışını göstermektedir.

Wiltjer'e (2017) göre verimli bir tasarıma ulaşmak için, yalnızca gerilim, yalnızca sıkıştırma ve karma sistemler gibi farklı yapısal sistemler incelenmelidir. Bu sistemlerin her biri için farklı tipler mümkündür. Bu tiplere örnek olarak iki yönde kirişli bir sistem, üç veya daha fazla yönde bir sistem, radyal kirişli bir sistem ve diğerleri verilebilir. Event Dome adlı yapıyı inceleyen Wiltjer, çatının yeterince güçlü ve rijit olması gerektiğini belirtmiştir. Hangi yapısal sistemin kullanılacağına karar vermek için tüm bu yönleri hesaba katmanın önemli olduğunu belirtmiştir. Minimum maliyete sahip hem yapısal hem de mimari açıdan tatmin edici bir tasarım olmalıdır. Ayrıca, belirli tasarım değişikliklerinin etkilerini belirlemek için bir duyarlılık analizi yapılmalıdır. Böyle bir duyarlılık analizi, gelecekteki bir başka proje için belirli talepleri karşılamak açısından faydalı olabilir.

Soare ve Raduica (1985) 4 farklı kubbe tipini incelemiştir. Bunlar; nervürlü kubbe, basit çaprazlı Schwedler tipi kubbe, şaşırtmalı çaprazlı Schwedler tipi kubbe ve çift çaprazlı Schwedler tipi kubbelerdir. Bu doğrultuda; yarım kar yükünün kubbeye en elverişsiz yük

olduğu, Schwedler kubbelerin nervürlü olanlara göre daha avantajlı olduğu, farklı çaprazlı Schwedler kubbelerin arasında önemli bir fark olmadığı, kubbedeki çaprazlamanın dönen biçimde tasarlanmasının statik olarak en iyi davranışı gösterdiği görülmüştür.

Saraç (2005) tek tabakalı uzay kafes kubbe formlarının bir algoritma metodu ile tasarımını yapmıştır. Bu çalışmada sonuç olarak kubbe formları için en uygun yükseklik-açıklık oranının 0,20 ile 0,25 arasında değiştiğini ve bu aralıkta belirtilen değerlerden daha yüksek ve daha düşük oranlara sahip kubbe formlarının uygun kabul edilmeyen çözümlere yol açtığını gözlemlemiştir.

Tek tabakalı uzay kafes kubbe formlarının tasarımlarında diğer bir önemli etkinin ise yapı geometrisinin çaprazlar kullanılarak üçgenlere ayrılma durumu olduğunu, kubbe formlu yapıların rijit birleşim kullanılmadığında üçgenlere ayrılmasının zaruri olduğu ortaya konulmuştur. Bu sayede daha yüksek bir rijitlik ve denge durumunda daha kararlı bir yapının elde edilmesi sağlanacaktır. Aksi durumlarda mafsallı birleşimler ile inşa edilen kubbelerin denge sorunu ve dolayısı ile göçme yaşayabileceğini ifade etmiştir.

Hwang, Knippers ve Park (2009) kubbe türü yapı formlarında burkulma davranışının, birleşim noktalarının rijitliği ile ilişkili olduğunu ve H/D olarak tabir edilen yükseklik-açıklık oranından bağımsız olmadığını belirtmiştir.

Fiouz ve Karbaschi (2012) rüzgar basıncı sebebiyle meydana gelen deformasyonların kubbe yüksekliği ile doğru orantılı olarak değiştiğini ve özellikle sabit açıklık şartında kubbe yüksekliğinin artmasının H/D oranını artıracığı bu sebeple mesnetlerde karşılaşılan kesme kuvvetinin azaldığını ifade etmiştir.

Hosseini ve diğerleri (2012) optimum bir kubbe geometrisi hakkında çalışmış ve bu uygunluğu bulabilmek için zati yükler ve deprem yükleri etkisinde radyal ve Schwedler kubbe formlarının göçme performanslarını araştırmıştır. Yapılan çalışmada açıklık sabit tutularak, değişen yükseklikler ile analizler yapılmıştır. Bu çalışmanın gösterdiği sonuç radyal kubbelerin, Schwedler kubbelerine göre daha iyi bir sismik davranışının olduğudur.

Eldhose, Rajesh ve Ramadass (2015) yükseklik-açıklık oranları farklı olan, rijit bağlantılı Schwedler kubbelerin analizi üzerine çalışmalar yapılmış ve bu formdaki kubbe yapıların

yanal yükler karşısında çapraz elemanlar sayesinde diğer kubbe formlarına oranla daha iyi bir performansa sahip olduğunu gözlemlemiştir.

Chacko, Dipu ve Manju (2014) farklı yükseklik-açıklık oranlarına sahip radyal (nervürlü) kubbelerin sonlu elemanlar metodu aracılığı ile birkaç analizinin yapılması ile bu konuya katkı sağlamış ve sonuç olarak radyal kubbelerin dikey yükler karşısında gösterilen dayanım değerlerini yatay yükler karşısında gösteremediğini fark etmiştir. Bu yapılarda nervürler ile birlikte kullanılan çaprazlar sayesinde avantaj elde edileceği ve kubbe davranışı açısından daha kabul edilebilir sonuçlar vereceğini aktarmıştır.

Tezin bu bölümüne kadar giriş bölümü ile başlanarak çelik yapılar ve montaj hakkında bilgiler, literatür çalışması kapsamında çelik yapıların göçme durumları, bazı göçme vakalarının resimleri ile birlikte detayları, uzay kubbe yapılar ve bu yapıların göçme durumlarını açıklayan çalışmalar aktarılmıştır. Sonraki bölüm olan Bölüm 3'te ise tezde kullanılan materyal ve metotlardan bahsedilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Karmaşık mühendislik problemlerinin daha basit bir probleme indirgenerek çözümlenmesini sağlayan sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method) çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılan yaygın ve kullanışlı bir çözüm metodudur. Kısmi diferansiyel denklemlerin yaklaşık olarak çözülebildiği sayısal bir yaklaşımdır (Jacob ve Ted, 2007).

Sonlu elemanlar metodunda temel mantık olarak karmaşık bir modelin basit bir geometri haline dönüştürülerek çözüme götürülmesi amaçlanmaktadır. Bu çözüm sürecinde parçadan bütüne gitme olarak da belirtilebilecek olan tümevarım ilkesi ele alınmaktadır. Bu metotta çözüm bölgesi, çok sayıda, küçük, basit, birbirine bağlı olan, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır. Bu çok sayıda oluşacak olan bölgelerin her birinin denklemler ile ifadesi ve gerekli yükleme şartlarının sağlanması ayrıca olması gereken kısıtlamaların da kullanımı ile bir denklem kümesi elde edilir. Bu denklemlerin çözümünün yapılması ile sürekli ortamın yaklaşık bir davranışı elde edilmeye çalışılır. Sonlu elemanlar metodunun, problemin yaklaşık bir çözümünü verdiğini ve kısmi diferansiyel denklemlerin gerçek sonuçlarını elde etmeye yarayan sayısal bir yaklaşım olduğunu bilmek önem arz etmektedir. Bu kısmi diferansiyel denklemler, bir yapıyı ilgilendiren nicelikleri (gerilme türü, miktarı vb.) hesaplamak ve belirli bir yük altında incelenen yapı bileşeninin belirli bir davranışını yaklaşık olarak bulmak için çözülmesi gereken karmaşık denklemlerdir. Basitleştirilmiş haliyle, sonlu elemanlar metodu, belirli koşullar altında bir parçanın veya montaj elemanının nasıl davrandığını, davranabileceğini tahmin etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir (Sonlu Elemanlar Yöntemi).

Sonlu elemanlar yöntemi yakınsama ile çalışan bir yöntemdir. Bu sayısal yöntemde asıl amaç, karmaşık mühendislik problemlerinin matematiksel olarak modellenmesidir. Bu sayede ele alınan karmaşık yapının çözümsüz kalabilecek bazı fiziksel problemlerin nümerik olarak çözülmesi hedeflenmektedir. Nümerik çözümlerde genel yaklaşım; problemleri çok küçük elemanlara ayırma yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde yapılar, geometrisi belli olan üçgen, dikdörtgen, üç boyutlu elemanlar aracılığı ile küçük parçalara bölünür. Bu elemanlara mesh adı verilir. Analizin sağlıklı bir şekilde

yürütülebilmesi için oldukça önemli olan meshleme işleminde birçok sınır koşulu ve parametre ayarı yapılabilir. Deneme yanılma yöntemi ile en uygun mesh işlemi optimize edilmelidir. Bu konuda fayda sağlayacak olan yöntemler analizde kullanılmıştır. Kullanılan model fiziksel bir geometridir. Mesh ise bu fiziksel geometriyi belirlenen elemanlarla örmektir. Amaç fiziksel geometriyi matematiksel bir ifadeye dönüştürmektir. Bu yüzden fiziksel koşullar ne kadar iyi ifade edilirse analiz başarısı o kadar yüksek olacaktır. Mesh yoğunluğu arttıkça hassasiyet artmış olur. Mesh ağı örülerek geometrik model, nümerik bir modele çevrilmiş olmaktadır. Bundan sonrasında ise diğer analiz verileri girilerek çözüm işlemi gerçekleştirilir. Mesh eleman tipi, boyutları, dizilimi ve sıklığı gibi konular analiz sonuçlarına önemli derecede etki edebilecek unsurlardır. Mesh elemanları kuvveti ileten çizgiler ve bağlantı noktalarından oluşurlar. Bu bağlantı noktalarına ise düğüm adı verilir (Sonlu Elemanlar Uygulama Adımları).

Sonlu elemanlar metodu ile elde edilen analizler, kontrol edilen bazı dış etkilere göre değişiklik gösterebilir. Bu tasarımlar ile her zaman aynı yük koşulları altında çalışılacak sistemlerde görülecek yapı davranışlarını inceleyen statik yapı analizi, zamana bağlı olarak değişebilen dinamik analiz veya harmonik, sismik, burkulma gibi özel analizler de yapılabilir. Burada önemli olan nokta tasarlanacak olan yapının veya sistemin ihtiyaçlarının belirlenerek gerekli analiz türünün uygulanmasıdır. Ayrıca bu yöntemde ilk ve en sık kullanılan uygulama alanı gerilme analizidir.

Sonlu elemanlar yönteminin tarihi gelişimine bakıldığında ise, ilk çalışmanın 1940'lı yıllara dayandığı görülmektedir. Courant (1994), 1943 yılında burulma problemini araştırmak için yayınladığı "Variational Methods For The Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations" adlı makalesinde üçgen şeklindeki küçük elemanlar ile parçalı polinom interpolasyonu kullanarak çözüme gitmeye çalışmıştır. Bu yüzden sonlu elemanlar yöntemini geliştiren ilk kişi olarak kabul edilmektedir. Ayrıca 1950'de bir uçak firması olan Boeing tarafından uçak kanatlarının modellenmesi sırasında bu yönteme başvurulduğu görülmektedir. İlerleyen yıllarda sonlu elemanların kullanımı üzerine metot ve çözüm teknikleri daha ileri seviyedeki problemlere çözüm üretebilecek şekilde geliştirilmiş olup günümüzde çoğu mühendislik probleminin çözümü için kullanılmakta olan en iyi yöntemlerden birisi haline gelmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin, havacılık endüstrisi ile birlikte ivme kazanması ve hafif yapılara olan talep ve ihtiyacın da giderek artması ile kullanımına daha çok ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaçların giderilmesine önemli katkısı olan

teknolojik imkânların ve ilk sırada bilgisayarların işlev ve performanslarının her geçen gün artması bugünlerde pek çok ihtiyaca cevap verebilmektedir. Günümüzde inşaat, makine, hidrodinamik, elektrik, uçak, gibi çeşitli mühendislik alanları ile birlikte tıp dalında da ortopedi, kalp ve damar cerrahisi, estetik cerrahi bölümlerinde kullanılmaktadır (Ansys).

İnşaat mühendisliği alanında kullanılacak olan statik, dinamik, lineer veya non-lineer yapısal analizler önce sorunun anlaşılmasında daha sonra çözülmesinde kolaylık sağlamaktadır. Tez içeriğinde ana temayı oluşturan çelik yapı analizlerinde yapısal elemanlarda oluşan gerilmelerin belirlenmesi için lineer statik analiz yapmak gerekecektir. Lineer analiz, yapının uygulanan yüke verdiği tepki türüne göre isimlendirilmiş olup yapıda uygulanan yükün elastik sınırlar içerisinde kaldığı durumda gerçekleştirilen analiz türüdür. Uygulanan yük plastik deformasyon bölgesine geçerse bu kez lineer olmayan analizden bahsetmek gerekir. Lineer olmayan bölgede malzemede kalıcı şekil değişikliği meydana gelir. Sonlu elemanlarda kullanılacak olan bu tür analizlerin avantajı, genel olarak yeni sınır şartlarında tasarlanan ürünün görevini yerine getirip getirmediğini belirlemek olarak öne çıkar.

Sonlu elemanlar, tasarlanan ürünün imalatından önce sistemin verilen şartları karşılayıp karşılamadığının anlaşılabilmesi amacıyla kullanılır. Deneysel çalışmalar yapmadan önce birçok tasarım değişkeninin, parça ve servis özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Ayrıca ürün optimizasyonu çalışmalarında birçok avantaj sağlamaktadır.

Modelin hassasiyetini artırmak amacıyla elemanlara düğüm noktaları tanımlanır. Bir çizgisel elemanı tanımlamak için minimum iki düğüme ihtiyaç vardır. Bir düğüm noktası incelendiğinde serbestlik derecelerine göre gerekli olan matematiksel denklemler belirlenebilir. Herhangi bir yapısal elemanın düğüm noktaları ile olan etkileşiminin doğru bir şekilde anlaşılabilmesi için serbestlik derecesinin de tam olarak anlaşılması gerekir. Bu serbestlik derecesi sınır şartlarının tanımlanmasında kilit rol oynamaktadır. Bir diğer önemli konu ise sınır şartlarının tanımlanmasının doğru yapılması gerektiğidir. Bilinmeyen sayısının azaltılması ve çözümleme süresinin en aza indirgenebilmesi için sınır şartlarının doğru ve tam olarak tanımlanması gerekir. Sınır şartlarına en iyi örnek olarak mesnet noktaları, uygulanan yükleme şartları ve sıcaklıklar verilebilir. Sonraki aşama yapısal elemanların fiziksel özelliklerinin nasıl bir interpolasyon ile bir düğüm noktasından diğerine aktarıldığının belirlenmesidir. Burada mesh elemanları ön plana çıkacaktır. Çelik

konstrüksiyon bir kafes sistem için sonlu elemanlar modeli oluşturulmak istendiğinde tek boyutlu elemanlar kullanılacaktır. Her bir kiriş eleman için iki düğüm noktasına ihtiyaç duyulur. Hacimlerin sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ise üç boyutlu elemanlara ihtiyaç duyulacaktır (Sonlu Elemanlar Uygulama Adımları).

Sonlu elemanlar yönteminde işlem basamaklarının doğru tanımlanması modelin çözümünden daha büyük önem taşımaktadır. Analiz yapılırken önce neyin analizi yapılacağına karar verilmelidir ve analizi yapılacak olan parça veya yapı, detaylı bir incelemeden sonra analiz edilmelidir. Bu yüzden uygulanacak analiz türü ve modelin oluşturulması, malzeme özelliklerinin doğru tanımlanması, kuvvet, yük, mesnetlenme durumlarının doğru şekilde belirlenmesi ve sonra uygun mesh yapısı ile diğer sınır şartlarının tanımlanması önem arz etmektedir. Temel amaç olan tasarlanan ürünün servis koşullarında görevini yerine getirip getirmeyeceğinin anlaşılması olup daha kritik olarak ürünün hasara uğrayacak olup olmadığı araştırılmaktadır. Bu sebeple hasar analizi yapılırken akma ve kırılma kriterleri de dikkate alınır. Doğal olarak analizden elde edilmesi istenen sonuçların da sağlıklı bir şekilde belirlenmesi gerekir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilirken bu veriler baz alınır. Günümüzde sıklıkla kullanılan sonlu elemanlar analizleri için en yaygın analiz yazılımları Ansys, Abaküs, Algor, Sap 2000, Cosmos gibi programlar olup bu tez kapsamında analizler yapılırken Ansys Versiyon R19.1 kullanılmıştır.

3.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

- Karmaşık modeller üzerinde çalışıldığında diğer klasik yöntemlere göre daha hızlı ve daha güvenilir bilgi edinmeyi mümkün kılar.
- Sınır şartları daha kolay tanımlanabilir, bu sayede tasarımlarda optimum sonuçlara ulaşılabilir.
- Seçilecek olan en uygun malzemenin ve malzeme özelliklerinin belirlenmesini sağlar.
- Bulunan verilerin duyarlılığı kontrol edilebilir.
- Yapı geometrisinin düzensiz bir biçimde olması veya homojenlikten uzak olması sonlu elemanlar metodu açısından büyük ölçüde engel teşkil etmez.
- Farklı türlerdeki sınır şartlarının, mevcut probleme entegre edilebilmesine olanak sağlar.
- Belirli sınır şartları için tasarlanan bir ürünün istenilen performansı sağlayıp sağlamayacağını ve tasarlanan ürün performansının iyileştirilmesi için henüz

üretildikten önce neler ile karşılaşılabilceğinin görölmesine imkân vererek maddi kayıplardan ve zaman kaybından korur.

Nadir olarak karşılaşılan dezavantajları ise;

- Sonlu elemanlar metodu verilen teori kadar doğrudur. Verilerin programa tanımlanmasında hata payı bulunmaktadır.
- Malzemenin fiziksel verilerinin ve eleman verilerinin temininde ve programa tanıtılmasında yapılan hatalar sonucu olumsuz yönde etkileyecektir.
- Çözümleme sırasında ortaya çıkacak olan denklemlerin kısa sürede doğru olarak çözülebilmesi için yüksek analiz performansına sahip bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır.
- Bir diğler dezavantaj ise lisanslı yazılım maliyetlerinin nispeten yüksek olmasıdır (FEM Avantaj ve Dezavantajları).

3.3. Yapısal Analiz

Yapısal analiz, tasarım sürecinin önemli bir bölümüdür. Analiz yöntemleri iki ana başlık altında incelenir. Bunlar doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerdir. Doğrusal analizde gerilme durumları yapının tüm elemanları ve birleşimler için ayrı ayrı kontrol edilebilir. Yapılacak kontrollerde akma, kopma, burkulma, yorulma gibi konularda bilgi edinilebilir. Ayrıca yapı elemanlarının stabilite kaybının etkileri veya yapıdaki geometrik düzensizlikler incelenebilir. Yapı elemanlarında akma gerilmelerinin aşılması durumunda yapının davranışında meydana gelebilecek olan değişikliklerin oluşturduğu etkileri de kontrol edebilmek amacıyla tasarımcı doğrusal analiz ile birlikte doğrusal olmayan etkileri de dikkate almalıdır.

Yapı davranışı açısından kullanılmakta olan analizlerin çoğunda doğrusal analiz yöntemi yeterli olmaktadır. Ancak doğrusallıktan uzak şekil değıştirme durumları olan tasarımlarda bu analiz türü yetersiz olacak ve doğrusal olmayan analize ihtiyaç duyulacaktır. Tasarımcının daha sık karşılaştığı sorun yapıların stabilite kaybı sırasında doğrusallık potansiyeli gösterip göstermediğidir. Buna göre gerekli analiz türü daha sağlıklı seçilecektir.

Yapısal analizlerin tam olarak algılanabilmesi için malzemenin mekaniği ile ilgili bazı terimlerin bilinmesi gerekmektedir. Statikte ana amaç cisme etki eden dış kuvvetlerin tanımlanmasıdır. Cisimlerin davranışları zamandan bağımsız olarak incelenir. Çelik konstrüksiyon çatılar buna iyi bir örnektir (Ansys Yapısal Analiz).

Yapısal analizlerin yapılmasında diğer önemli bir bileşen kuvvet sistemleridir. Kuvveti bir cisme etki eden yük olarak tanımlarsak; şiddeti ve yönü belli olan vektörel bir büyüklükten bahsedildiği aşikârdır. Yapısal analizlerin diğer bir uygulama alanı da kafes sistemlerdir. Kafes sistemler, birbirine bağlı çubuk elemanların oluşturduğu sistem olarak tanımlanabilir. Uygulama alanları çelik konstrüksiyon çatı sistemleri, çelik konstrüksiyon köprü sistemleri, çelik konstrüksiyon bina tasarımları gibi yapılardır.

Bu tür yapılarda aksenal yüklerin belirlenmesi ya da mesnet noktalarına gelen tepki kuvvetlerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Herhangi bir F kuvveti karşısında herhangi bir çubukta istenen noktalarda oluşan aksenal gerilim veya zeminde bulunan mesnetlerdeki tepki kuvvetleri belirlenebilir. Uygulanan yük karşısında elde edilen maksimum gerilmenin, akma dayanımının üzerinde olup olmadığı kalıcı şekil değişimi hakkında net bilgi verirken ürünün servis şartlarında görevini yerine getirebilme olanağını da açıklamış olacaktır.

Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda bir diğer önemli kriter de emniyet katsayısıdır. Emniyet katsayısının malzeme türüne göre belli bir değer aralığında olup olmadığı da analiz sonucu hakkında değerli bilgiler verir. Çelik yapılar için emniyet katsayısının 3 ve üzerinde olması istenmektedir.

İstenen durum ile emniyet katsayısına göre analiz sonucunda elde edilen katsayı karşılaştırarak sonuçların değerlendirilmesi gerekmektedir. İstenen katsayı elde edildi ise, sistemin istenen sınır şartlarını güvenli olarak karşıladığı sonucu çıkarılabilir. Ancak istenen değerlere ulaşamadıysa, sistem üzerinde gerekli iyileştirme çalışmaları yapılarak bu değer elde edilmeye çalışılır.

Malzemenin hasara uğrayıp uğramayacağına ayrıca akma ve kırılma kriterleri ile de değerlendirilmesi gerekeceğinden, malzemeye uygulanan kuvvet karşısında akma veya kırılma olup olmadığı araştırılmalıdır. Akma gerilmesinden sonra kopma aşamasına kadar

olan aralıkta (süneklik) malzemenin, kesitin ya da sistemin yük taşıyabilme kapasitesi dikkate alınmalıdır. Başka bir ifade ile etkiyen yükler altında şekil değiştirebilme yeteneği olan süneklik, önemli bir parametredir. Bu özelliği bakımından çelik yapı sistemleri yapılardan beklenen süneklik özelliklerini karşıladıklarından tercih edilmesi gereken yapı grubu arasında yer almaktadır. Sünek malzemelerin akma kriteri olarak Von-Mises akma kriteri geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi yapılacak olan Ansys programında da “Equivalent Von-Mises stress” ile istenen sonuçlar görülebilmektedir. Bu kriterde malzemeye uygulanan çok eksenli gerilmeler eşdeğer bir tek gerilme ile değerlendirilir. Uygulanan yük sonucunda elde edilen maksimum eşdeğer gerilim, malzemenin akma gerilmesinden daha büyük bir değerde ise malzeme kalıcı olarak şekil değiştirmiş demektir. Ayrıca “Directional Deformasyon” seçeneği ile uygulanan yükleme sonucunda hangi eksenle ne ölçüde bir deformasyon olduğunun da belirlenmesi önem arz etmektedir. Son olarak aksel kuvvet sonuçları ile yapısal tekil bir elemana ne kadarlık bir yük düşeceği belirlenebilir. Bu tür analiz ve incelemelere olanak sağlayan yapısal analiz programı olan Ansys için daha geniş kapsamlı bilgilere değinmenin yerinde olacağı düşünülmektedir (Ovalı ve Esen, 2018).

3.4. Ansys

Sonlu elemanlar yöntemi için güçlü bir yazılım olan Ansys yazılımı, 1971 yılında ilk sürümü ile karşımıza çıkmaktadır. Ansys, özellikle mühendislik alanında önceden tasarlanan yapısal ürünlerin, hızlı üretimine geçilmeden önce sanal olarak prototiplerini oluşturmaya yarayan geniş kapsamlı bir simülasyon programıdır. Bu yazılımda asıl amaç, fiziksel modeli olabildiğince gerçeğe yakın, gerçeği ifade edecek şekilde bir nümerik modele çevirmektir. Bu konudaki başarı, analiz sonuçlarındaki tutarlılık ile doğru orantılı olacaktır.

Tasarlanacak olan ürünün ait olduğu sektör göz önüne alınarak birçok analiz türünü uygulamaya imkân verir. Bu çalışmada “Statik Structural Analysis” olarak adı geçen yapısal statik analiz ile modellenecek yapının farklı koşullar altındaki davranışları incelenebilecektir.

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan en önemli programlardan biri olan Ansys yazılımı, analizleri hızlandırmak için eleman tipleri, malzeme özellikleri, otomatik meshleme ve

grafikler ile ilgili çok çeşitli seçenekler sunar. Bu nedenle, yapısal bir sistem modellemesi bu yazılımın kullanımı ile daha kolay olmaktadır.

Ansys programı ile yapılacak olan modellemede sonlu elemanlar analizleri için gerekli olan aşamaları bilmek ve sırası ile uygulamak önemlidir. Yapı modellenirken 3 aşamada analiz yapılacaktır (ENGR, Sonlu Elemanlar Teorisi). Bu aşamalar planlama, modelleme ve çözüm, sonuç aşamalarıdır. Bunlar planlama aşamasında;

- Analiz çeşidinin belirlenmesi
- Problemin geometrik alanının tanımlanması
- Kullanılacak eleman tiplerinin belirlenmesi
- Malzeme özelliklerinin belirlenmesi
- Geometrik özelliklerin uzunluk, alan, gibi değişkenlerinin yani geometrinin oluşturulması
- Kullanılan elemanların bağlantılarının oluşturulması
- Sınır şartlarının ve yüklemelerin tanımlanması
- Uygun mesh modelinin oluşturulması, yani modelin elemanlara bölünmesi ile modelin nümerik karşılığının hazırlanması olarak belirtilir.

Modelin küçük elemanlara bölünmesinden kasıt, analizi yapılan sürekli modelin, belirli sayıda olan alt parçalara veya asıl tanımı ile sonlu elemanlara bölünmesidir. Daha fazla sayıda eleman daha iyi sonuçların elde edilmesi ancak daha uzun analiz süresi anlamına gelir. Modelin elemanlara bölünmesi özel seçimler ile yapılabileceği gibi program tarafından sağlanan otomatik seçim ile de yapılabilir.

Çözüm aşamasında reaksiyon kuvvetleri, eleman gerilmeleri, deformasyonlar gibi istenen çıktıların belirlenmesi sağlanır. Sonuç aşamasında ise çıktıların okunması, yorumlanması, eleman kuvvet ve momentlerinin izlenmesi, gerekirse modal analiz ile model davranışının incelenmesi adımları izlenir.

Düzenleme gereken veriler varsa tekrar ilk aşamaya dönülerek girdilerin değiştirilmesi ve problemin tekrar çözülmesi, istenen sonuçların elde edilip edilmediğinin yorumlanması ve raporlanması, gerekli görsellerin alınması gerekmektedir.

Analizin kesinlik derecesi planlama aşamasına oldukça bağlıdır. Daha iyi bir analiz için sağlıklı bir analiz planının izlenmesi gerekecektir. Ayrıca sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanması uzmanlık ve tecrübe gerektirip doğru yapılması en önemli husus olacaktır. Aksi halde iyi bir planlama, dikkatli bir modelleme, doğru sınır şartları ve yaklaşımlar oluşturulmuş olsa bile yanlış bir yorumlama ile bunların bir önemi kalmayacaktır.

Tez kapsamında yapılan analizde problemin matematiksel ifadesini doğru anlamak, ayrıca gerektiğinde kritik müdahaleleri yapabilmek ve elemanların nasıl hareket edeceğini anlamak üzere farklı veriler kullanarak sonuçların nasıl değiştiği incelenmiş olup yapılan varsayımların etkileri hakkında fikir sahibi olunmuştur. Sonuç sonrası gerilme değerlerini gösteren sayısal veriler ve renk skalaları kullanılarak olası senaryoların daha net anlaşılması sağlanmıştır.

4. VAKA ANALİZİ VE BULGULAR

4.1. Isparta Gökkubbe Fuar Merkezi'nin Yapı İncelemesi

Bu bölümde Isparta ili merkezinde Batıkent Mahallesi'nde Isparta Belediyesi tarafından ihale edilen ve inşa edilmesi planlanan Gökkubbe Ulusal Fuar ve Kongre Merkezi yapısının inşa sırasında göçmesi ele alınmıştır.

27 Kasım 2012 tarihinde yapımına başlanan Gökkubbe Kongre ve Fuar Merkezi 50 dönümlük bir alanda, 9 dönümü 100 metre çapında 9000 m² kapalı alana sahip geniş açıklıklı bir kubbe formda tasarlanmıştır. Sözleşme bedeli yaklaşık olarak 6 milyon lira olan yapının 3 Ağustos 2013 tarihinde bitirilmesi planlanıyordu. Ancak 28 Temmuz 2013 tarihinde yapının üst çatısını oluşturacak olan 200 ton ağırlığındaki çelik konstrüksiyon ilk etapta belirlenemeyen bir nedenle montajı devam ederken çökmüştür. Meydana gelen olayın çökme sebebinin montaj, proje, uygulama hatası, statik eksiklik gibi nedenlerden hangisi veya hangileri sebebi ile olduğu ilk etapta bilinmemekteydi. Sonraki incelemelerde toplam 200 ton ağırlığındaki çelik malzemenin çökmesine imalat montaj ve uygulama hatasının neden olduğu belirtilmiştir. Öğle saatlerinde meydana gelen olayda inşaatta çalışan işçilerin yapı çeliklerinin yamulduğunu fark edip olay yerinden uzaklaşmaları nedeniyle büyük bir faciadan dönülmüştür. Can kaybı yaşanmayan olayda 3 işçi yaralanmış ve ağır iş makineleri enkaz altında kalmıştır. Yapının göçmesi ile meydana gelen maddi kayıp yaklaşık olarak 2 milyon lira civarında olmuştur. Kazada iki iş makinesi zarar görürken 1 milyon lira değerindeki bir vinç kullanılamaz hale gelmiştir. Belediyenin ihale ettiği yapı belediye tarafından sigorta şirketince sigortalatıldığı için belediyenin herhangi bir zararının olmadığı belirtilmiştir (Gökkubbe İnşaatı).

Gerekli incelemeler yapılarak sonraki süreçte çöken yapı enkazı kaldırılmaya başlanmıştır. Akabinde yeni ihale yapılmış olup yapının tasarımı ve inşası üzerine bazı değişiklikler yapılarak fuar alanının yapımına tekrar başlanmıştır. Nihayetinde 2016 yılının 2. çeyreğinde yapı tamamlanabilmiştir. Bu bölümde asıl odak noktası yapının neden çökmüş olabileceği ile ilgili senaryoları değerlendirmek ve bu senaryoları yapısal analiz programı kullanarak sonlu elemanlar metodu ile incelemektir. Olası çökme senaryoları değerlendirilerek yapılmış olabilecek hataları belirtmek ve bu hataların tekrarlanmaması için önerilerde bulunmak

amaçlanmıştır. Bilirkişi raporlarının eksikliği veya bunların açık erişiminin olmaması bu çalışmada bazı noktalarda fikir yürütülmesini ve tahminlerde bulunulmasını mecburi hale getirmiştir. Analiz yapılırken referans alınan değerler aşağıda belirtilmiştir. Kullanılan malzeme özellikleri hakkında net bilgi edinilememiş olup diğer değerler projeye aittir.

4.2. Yapı Özellikleri

Yapının kullanım amacı olarak ticari pazar sağlanması, aynı zamanda pek çok işletmeyi fuar alanında bir araya getirmek ve bu sayede bu işletmeler arasında geleceğe yönelik bilgi paylaşımlarının yapılmasına ve iş ortaklıklarının kurulmasına olanak sağlanması ve iş turizmi açısından fayda sağlanması olarak bahsedilmiştir. Yapısal diğer özellikler;

- D: Çap: 100 m
- Kapalı alan: 9000 m²
- Rijit sıkıştırma (basınç) halkası çapı: 16 m
- Kolon Sayısı: 33
- Çatı kemerlerinin sayısı: 33
- İki kemer arasındaki kiriş sayısı: 40 (1 adet HEA 400 - 8 adet UPN 270 – 31 adet UPN 350) (verilen profil özellikleri tahmini olarak tanımlanmıştır).
- Kullanılan Profiller: HEA 400 - UPN 350 - UPN 280
- H:Kubbe üst noktasının yerden yüksekliği: 25 m
- Kubbe tepesinin kolonlara olan dik mesafesi: 19 m
- H/D oranı: 0,25

Properties of Outline Row 3: Structural Steel			
	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7.85E-06	kg mm ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
8	Young's Modulus	2E+05	MPa
9	Poisson's Ratio	0.3	
10	Bulk Modulus	1.6667E+05	MPa
11	Shear Modulus	76923	MPa
12	Strain-Life Parameters		
13	Display Curve Type	Strain-Life	
14	Strength Coefficient	920	MPa
15	Strength Exponent	-0.106	
16	Ductility Coefficient	0.213	
17	Ductility Exponent	-0.47	
18	Cyclic Strength Coefficient	1000	MPa
19	Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2	
20	S-N Curve	Tabular	
21	Interpolation	Log-Log	
22	Scale	1	
23	Offset	0	MPa
24	Tensile Yield Strength	250	MPa
25	Compressive Yield Strength	250	MPa
26	Tensile Ultimate Strength	460	MPa
27	Compressive Ultimate Strength	0	MPa
28	Isotropic Thermal Conductivity	0.0605	W mm ⁻¹ C ⁻¹
29	Specific Heat, C _p	4.34E+05	mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
30	Isotropic Relative Permeability	10000	
31	Isotropic Resistivity	0.00017	ohm mm

Şekil 4.1. Kullanılan çelik malzeme özellikleri

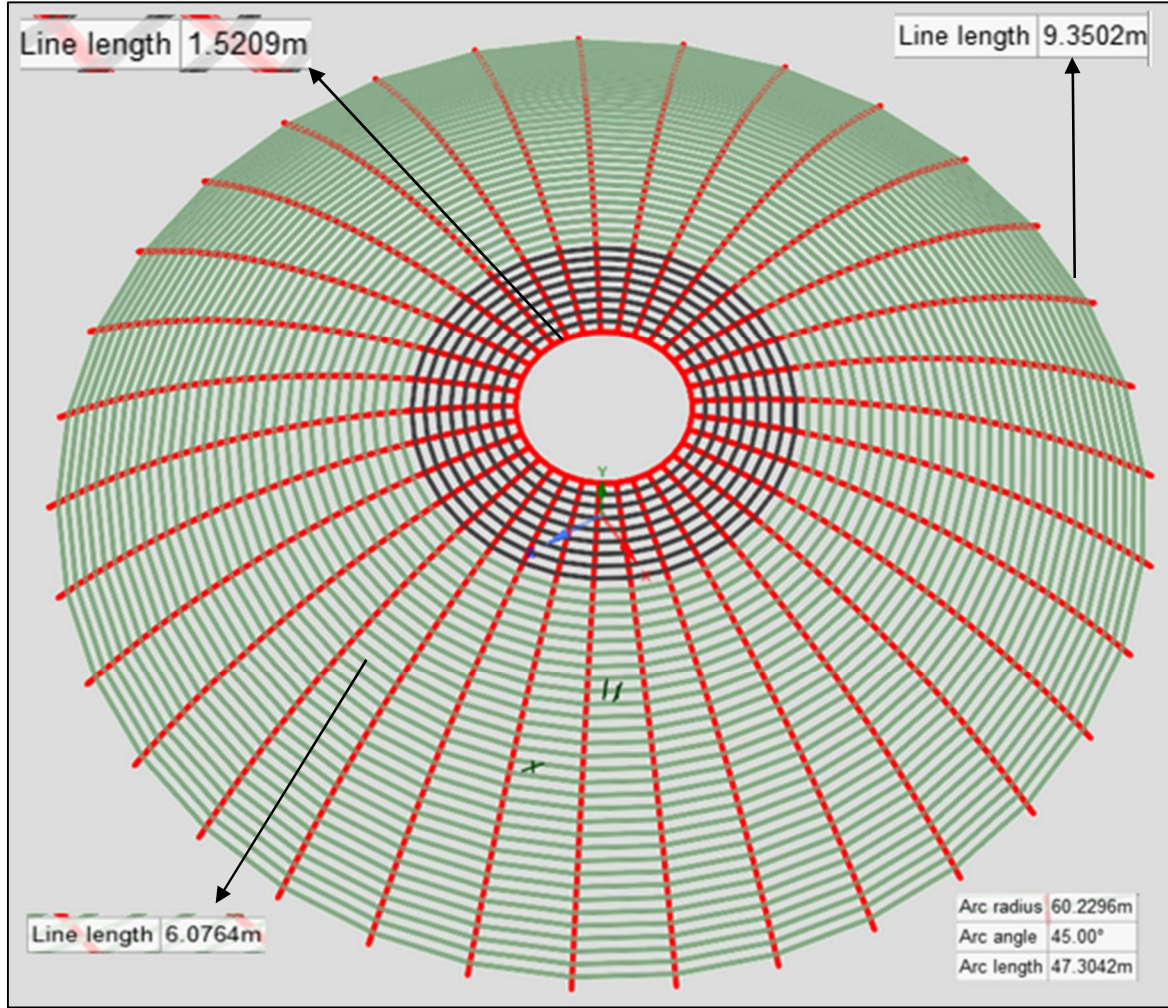
Kullanılan çelik malzemenin;

Karakteristik akma dayanımı: 250 MPa,

Karakteristik çekme dayanımı: 460 MPa ve

Elastisite Modülü: 200 000 MPa olarak dikkate alınmıştır.

Şekil 4.1 yazılımda bu değerlerin girilişini göstermektedir. Malzeme özelliği yine tahmini olarak alınmıştır.

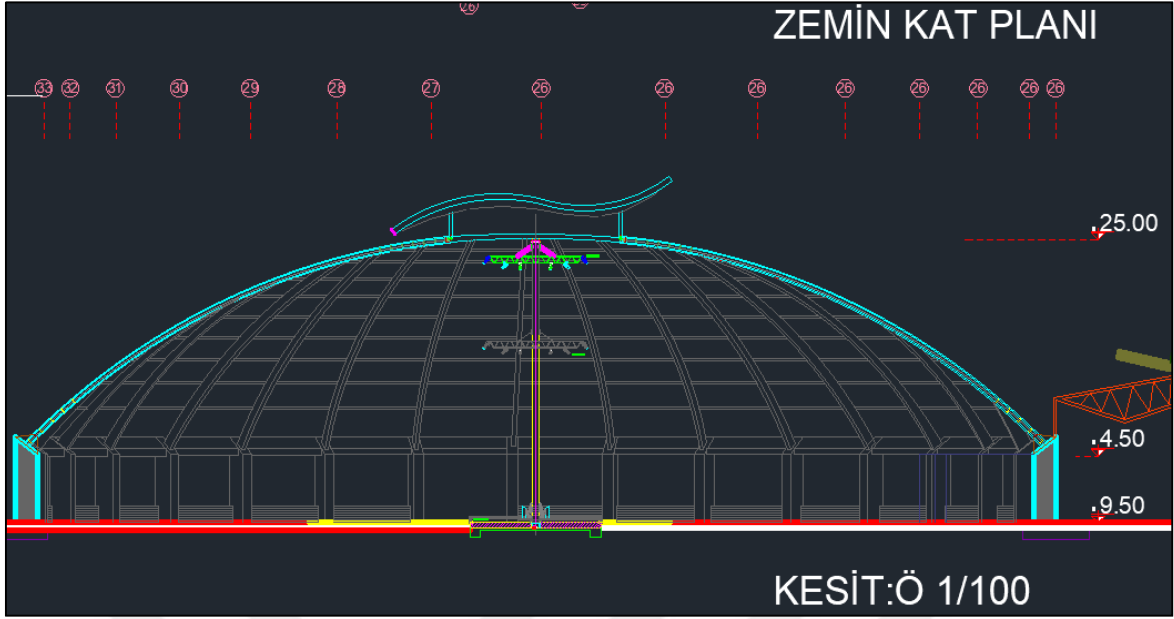


Şekil 4.2. Yapı kubbesinin modellenmesi

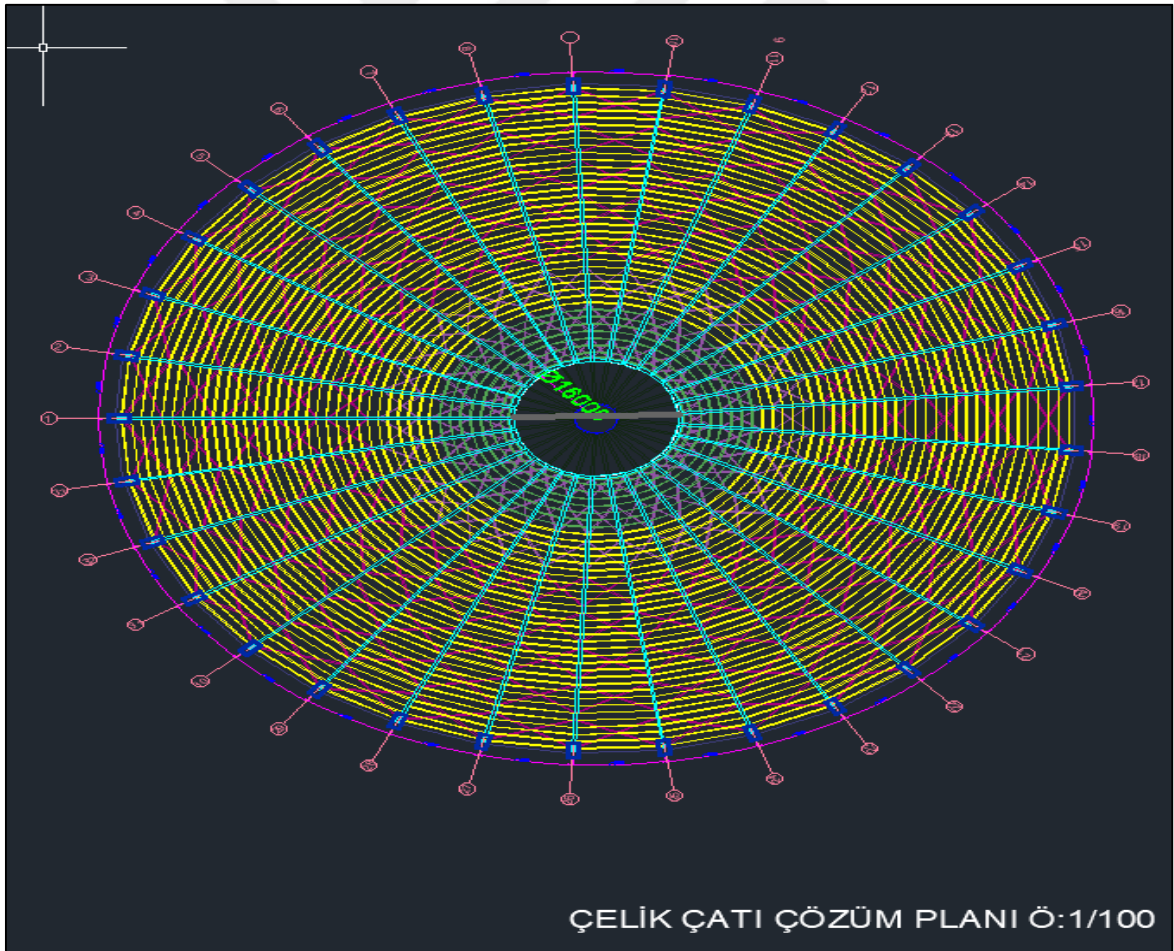
Şekil 4.2’de gösterilen modelde kırmızı renkli çatı makasları HEA 400 profiller, yeşil renk ile gösterilen kirişler UPN 350 ve siyah renk ile gösterilenler UPN 280 profillerden oluşturulmuştur. Diğer özellikleri yukarıda verilen modelin mesnetlendiği betonarme kolonlar rijit kabul edilmiş olup tasarıma ve incelemeye dahil edilmemiştir.

Aynı şekil ile çatı makaslarının açı değerleri, dış çemberlerinin yarıçap uzunlukları ve makas uzunlukları verilmiştir. Eş makaslardan oluşan yapıda her bir çatı makasının uzunluğu 47,3 m olarak tasarlanmıştır.

Son olarak yapıda kullanılan kirişlerin en kısa olanı (1,52m) en tepede rijit halkaya bağlanan kiriş olup en uzun kirişlerin (9,35m) de kolonların hemen üstünde yer alan kirişler olduğu, kubbe tepesine doğru gidildikçe kiriş boylarının kısaldığı görülmektedir. Kubbenin orta bölümlerinde kiriş uzunlukları ortalama olarak 5-6 m olup aynı yükseklikte olan kirişlerin uzunlukları eşittir.



Şekil 4.3. Yapının Autocad dosyasından plan görünümü



Şekil 4.4. Yapının son halinin Autocad dosyasından alınan çözüm planı

Tasarlanan yapının Autocad resimleri (Şekil 4.3, 4.4) EKAP (Elektronik Kamu Alımları Platformu) aracılığı ile elde edilen bir ihale dosyasından alınmıştır. Modellemelerde bu tasarımlarda 33 adet kolonun bulunduğu, çatı yüksekliği, makaslar arasındaki kirişlerin sayısı, tepedeki rijit halkanın çapı gibi özellikler görülmektedir. Bu tezde kullanılmış olan yapısal analizlerde bu değerler temel alınarak model tasarımı yapılmıştır. Ancak yapının göçmeye uğradığı durumda modelin bu aşamada olmadığı, bu resimlerin sonradan yapılan bazı değişiklikler ve eklemeler sayesinde sağlıklı bir şekilde tamamlanan yapıya ait olduğunun bilinmesinde fayda vardır.

4.3. Yapının Göçme Durumu

Yapının göçmeden önceki resimleri, göçmeden sonraki resimleri ve tamamlanmış durumdaki resimleri bu bölümde verilmektedir (Gökkubbe İnşaatı). Ayrıca yapı göçtüktan sonra yeniden inşa edildiğinde bazı değişikliklerin yapıldığı hem resimlerden anlaşılakta hem de yapılan açıklamalar ile sabittir. Bu bölümde, yapının neden göçmüş olabileceği, hangi önlemler alınırsa göçmenin engellenebileceği, yapının yeni durumunda ne gibi değişiklikler ile tamamlandığı veya yapısal formda değişiklik yapılmamış olsaydı ne gibi müdahaleler ile aynı projenin göçmesinin engellenebileceği gibi hususlara açıklık getirilmeye çalışılmıştır.

Ayrıca montaj gereklilikleri, işin yönetilmesi, standartlarda olması gerekenler üzerine geliştirilmesi mümkün bir kılavuz niteliğinde tavsiyelerde bulunulmuştur.



Şekil 4.5. Yapının sağlıklı bir şekilde tamamlandığı durumun inşa süreci resmi

Öncelikle yapının göçme sonrası yeniden inşası sırasında çekilen bir fotoğrafın incelenmesi durumunda, ilk yapı tasarımından farklı olarak Radyal kubbe türünden Schwedler kubbe türüne bir geçiş yapıldığı açıktır. Göçen yapıda kullanılmayan çapraz elemanlar yeni tasarımda görülebilmektedir (Şekil 4.5). Göçme sebebinin tam olarak bu durumla sınırlı olmadığı, doğru tekniklerle montaj ve inşası yapılan çok sayıda radyal kubbenin olduğu bilinmektedir. Bu tür kubbelerin bazı örnekleri literatür çalışmasında verilmiştir.



Şekil 4.6. Sonradan tamamlanan yapıda iskele farkı ve çaprazların görüntüsü

Göçmeden sonra yeniden inşa edilen yapının iskele kurulumuna ve rijitliğine dikkat çekilmek istenmiştir. Şekil 4.6, göçme senaryolarına ikinci bir bakış açısı kazandırmıştır. Göçmenin sebebinin rijit bir iskele kurulumunun sağlanıp sağlanmadığına bağlı olarak

gerçekleşebileceği de hem yapıdaki değişiklikler ile hem de yapılan analizler aracılığı ile açıklanabilir.



Şekil 4.7. İçten bir görünüm

Yapının geniş bir alana kurulduğunun ve bahsedilen rijit iskelenin yapı tamamlandıktan sonra kaldırıldığının bir resmi eklenmiştir (Şekil 4.7). Bu da akıllara şu soruyu getirmektedir. Acaba göçme, rijit iskelenin erken sökümü, hiç kurulmaması, ya da taşınması sebebi ile mi oluşmuştur? Ayrıca sadece bir yapısal elemanın labil hale gelmesi sebebi ile bağlı olduğu diğer yapı elemanlarının tetiklenmesi ve akabinde tüm yapının aşamalı olarak göçmesine sebebiyet verip vermediği incelenmeye ihtiyaç duymaktadır.



Şekil 4.8. Yapının tamamlanmış hali

Yapının kullanılmakta olan güncel durumunun bir görüntüsü ile (Şekil 4.8) geniş bir alanı kapladığı ve kullanım amacına uygun olarak hazır hale geldiği görülebilir.



Şekil 4.9. Yapım devam ederken çekilen bir resim

Şekil 4.9, uzaktan çekilmiş bir görüntü olup yapının çaprazlar eklenmeden önce, karşılıklı çift makasların birbirini desteklediği ve makasların arasında bağ kuran kirişlerin tepedeki rijit halkaya kadar tamamlandığı böylece yapının kararlı bir yapıda olabileceği

görülmektedir. Ancak yine de bu durumun sağlanmasının, sağlıklı bir iskele kurulumu ve doğru montaj prosedürünün izlenmesi şartıyla olabileceği açıktır.

Bölüm 4.3 kapsamında ele alınan yapıya ait Şekil 4.5-9 göçmeden sonra hataların giderilerek, yapı tasarımı iyileştirilerek ve kurulumda daha önce yapılan hataların tekrar yapılması engellenerek başarılı bir şekilde inşa edilmiş yapı görünümünü göstermektedir. Bu şekilde yapı hakkında genel bir bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır. Şekil 4.10'dan itibaren yapının göçme durumunu gösteren ve göçmenin nasıl meydana geldiği ile ilgili görsel ve açıklamalar verilmiştir. Yapının ilk etapta nasıl inşa edilmeye çalışıldığı ve izlenen yöntemler aktarılmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.10. Gökkuşbu'nin inşaatı sürerken çekilmiş bir resim

Şekil 4.10 ile göçen yapının, göçmeden önceki inşa süreci gösterilmiştir. Dikkat edilmesi gereken nokta yapıda daha önce gösterilmiş olan iskeleden daha farklı bir iskelenin kullanılmış olduğudur. Bu iskelenin yapıyı taşıyacak kadar rijit olmadığı düşünülmektedir. Ağır çatı makaslarından ve kirişlerden oluşturulmaya çalışılan yapının iskele tarafından taşınamamış ve çökme gerçekleşmiş olması muhtemeldir. Ayrıca kirişlerin montajının dağınık bir şekilde yapıldığı da açıktır. Bu da yapıda dengesiz yük oluşumuna sebebiyet vermiştir. Yapıda bir bölümün diğer bölümden daha fazla yük etkisinde olması ve yapının kendi ağırlığından oluşan bu yükün dengesiz dağılımı ve yapının bu yükü karşılayamaması sebebi ile yapının göçtüğü düşünülmektedir. Yapı makaslarında dönme meydana gelmiş,

kısmi burulmalar, boyunlanmalar ve kopmalar görülmüştür. İskelenin zayıf olması ve yapı kirişlerinin dağınık olması ilk göze çarpan detaylar olup bağlantı noktalarının zayıflığı ve yapıya etkimiş olması muhtemel bazı yüklerin veya dış kuvvetlerin de olma ihtimali söz konusudur. Ayrıca mesnetlenmelerin durumu da soru işareti olarak kalmaktadır. Son kurulumda çalışan personellerin veya iş makinelerinin göçmeye etkisi de düşünülmelidir.

Daha önce incelenen yapının sağlıklı kurulumunun yapıldığı durum ile kıyaslanmaya olanak sağlayan Şekil 4.11, çatı makaslarının yapının bazı bölümlerinde rijit iskelenin tepesine kadar kurulumunun yapıldığını ancak kirişlerin eksik bırakıldığını göstermektedir. Tamamlanmaktan geri bırakılan bu yapı elemanlarının şekildeki görüntüsü bir montaj prosedürüne uyulmadan kurulum yapılmaya çalışıldığının göstergesidir. Ayrıca kirişler arasında bırakılan boşlukların da belirli bir düzenle bırakılmadığı, rastgele bir kurulum yapıldığını göstererek montaj prosedürünün izlenmediği iddiasını destekler niteliktedir.



Şekil 4.11. Göçme meydana geldikten sonraki görüntü

Şekil 4.11’de, bazı kirişlerin makaslardan ayrıldığı ama tam olarak kopmadığı görülebilmekte bazı kirişlerin ise hiç ayrılmadığı açıktır. Doğal olarak çıkarılan sonuç mesnetlenmelerin ve bağlantı noktalarının tek bir standart olarak sağlanmadığıdır. Hâlbuki yapının sağlıklı bir kurulumunun yapılması en azından kirişlerin eş olarak hareket etmesini sağlayabilirdi. Ayrıca resimde dikkat çeken bir diğer nokta bir iş makinesinin enkaz altında kalmış olmasıdır. Bu da çökmeyi tetikleyen durumun iş makinesinin etkisi ile olup

olmadığını da tartışmaya açmaktadır. Son olarak HEA 400 çelik profilli bazı makasların burulduğu görülmektedir. Buna sebebiyet veren durumun ise sadece profillerin kendi ağırlıkları ile göçmesinin değil, herhangi bir dış etki veya yanal bir kuvvet etkisinin de olabileceği düşünülmektedir. Bahsedilen bu etkilerden biri, kuvvetli bir fırtınanın olma ihtimalidir. Ancak olayın meydana geldiği günün hava şartları yapı stabilitesi açısından olumlu olup göçmenin sebebi olmadığı açıktır. Bu yüzden diğer durumlara odaklanılacaktır (Hava Durumu Arşivi).



Şekil 4.12. Göçmüş yapının karşıdan görünümü

Şekil 4.12’de yapının göçmeden sonraki enkaz durumu gösterilmiştir. Tamamlanmamış bağlantıların olduğu ve diğer makaslara göre kısa kalan çelik makasların olduğu görülmektedir. Bu makaslar diğer uzun makaslara göre ayakta kalabilmişlerdir. Bu da yapıya başlanırken kolonlara ilk olarak montajlanan elemanların kararlı bir durumda olduğunu sonradan yapılan eklemelerin yapıyı labil hale getirdiğini düşündürmektedir. Şekil 4.12’de dikkat çeken bir diğer önemli nokta ise yapı iskelesinin tamamen göçmüş olduğunun görülmesidir. Yani yapıda asıl göçmenin önce iskele sonra diğer elemanlarda olması daha muhtemeldir. Ancak iskelenin göçmesinin sebepleri açık değildir. Bu durum, ağır yapı

elemanlarının iskele tarafından taşınmayıp iskeleyi göçtürmeye sebebiyet verebileceği gibi, iskelenin kendinden labil olması sebebiyle de göçmenin olabileceğini düşündürmüştür.



Şekil 4.13. Göçmenin bıraktığı enkazın resmedilmesi

Yapı enkazının yakından çekilen görüntüleri bu kazada can kaybının olmamasının büyük şans olduğunu ve çok daha büyük bir felaketin eşiğinden dönüldüğünü gözler önüne sermektedir (Şekil 4.13-16).



Şekil 4.14. Göçme sonrası bir diğer resim



Şekil 4.15. Enkazın başka bir açıdan çekilmiş yakın resmi



Şekil 4.16. Enkaz kaldırıldıktan sonraki saha görüntüsü

Şekil 4.16, meydana gelen enkazın basit bir göçme olmadığını ve tüm kurulumun en baştan yapılmak üzere, enkazın kaldırılmasından sonra söküldüğünü göstermektedir. Bu durum yüklenicinin ve tasarımcının ortak hareket ederek yapının tekrar kurulumunun sağlanması

üzerine yeni arayışlar içine girdiğini düşündürmektedir. Tüm bu durumlar maddi kayıpların ve kaybedilen zamanın boyutlarını gözler önüne sermektedir. Ancak tasarımın iyileştirilmesi ve montajın daha sağlıklı yapılabilmesi üzerine yapılmış olan değişiklikler olaydan bazı dersler çıkarıldığını göstermektedir. Sonraki çalışmalarda da bu yapıda meydana gelen göçmenin benzerlerinin başka yapılarda yaşanmaması adına yapılacak olan tüm çalışmalar önem arz etmektedir.

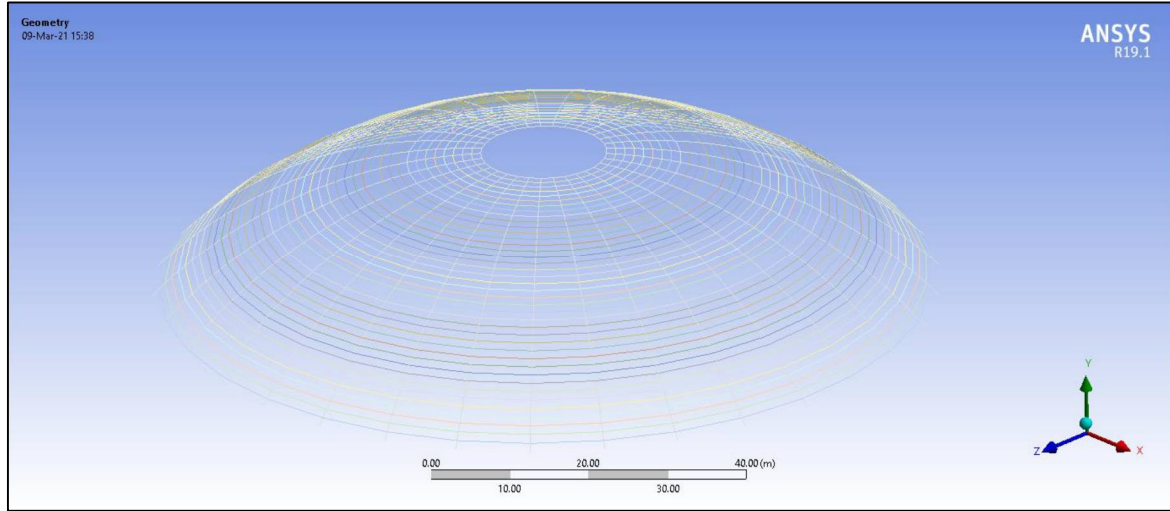
4.4. Yapının Modellenmesi ve Olası Göçme Senaryolarının Analizi

Daha önceki bölümlerde yapılmış olan yorumlar, sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasını sağlayan ve yapısal bir analiz programı olan Ansys versiyon R19.1 aracılığı ile analiz edilerek yapının olası senaryolar ile genel göçme durumunun analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bunun dışında her bir analiz için bazı referans değerler değiştirilerek gerekli kontrollerin yapılması sağlanmıştır. Yapılan bu analizler sırasıyla tanımlanmış ve her analiz için elde edilen sonuçlar elde edilen görsel analiz çıktıları vasıtası ile aktarılmıştır.

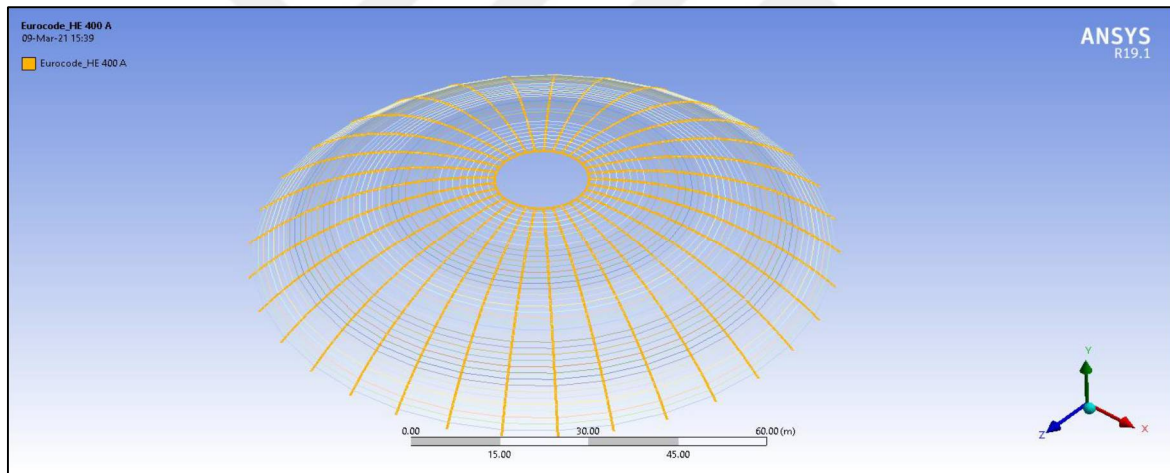
1. Analiz: Yapı sağlıklı bir şekilde tamamlanabilse idi kendi öz ağırlığı altında göçebilir miydi?
2. Analiz: Yapı rijit iskele kurulumu olmadan ya da rijit olduğu sanılan zayıf bir iskele kurularak mı inşa edildi? Bu şekilde bir kurulum yapıldı ise olası etkileri neler olabilirdi?
3. Analiz: Yapı kurulumu yapılırken uzun yay formu makasların karşılıklı olarak birbirini desteklemesi sağlanabildi mi? Yoksa çökme anında daha dağınık bir yapı mı mevcut idi?
4. Analiz: Yapı kurulumu yapılırken uzun yay formu makasların karşılıklı olarak birbirini desteklemesi sağlanabildi ise ancak rijit halka/iskele kurulumu yoksa yapı kendi ağırlığı altında bu şekilde göçecek miydi? Yoksa bağlantılar ve yapının öz stabilitesi yeterli rijitliği sağlayabilir miydi?
5. Analiz: Yapı dışarıdan etkiyen/etkitilen herhangi bir kuvvete maruz kaldı mı? Kuvvet etkisi varsa bu etkiler neler olabilir? Yapının göçmesi bu sebeple olmuş olabilir mi?

Son olarak yapı yeniden inşa edildiğinde ne gibi farklılıkların olduğu ve bu farklılıkların ne gibi sonuçlar verdiği üzerine yorumlamalar yapılmıştır. Yapının yeniden inşasının sağlıklı olduğu sebebi ile analizinin yapılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Ancak farklılıkların ve etkilerinin üzerinde durulmuştur.

4.4.1. Analiz 1



Şekil 4.17. Yapının sağlıklı bir şekilde tamamlandığı varsayılan model



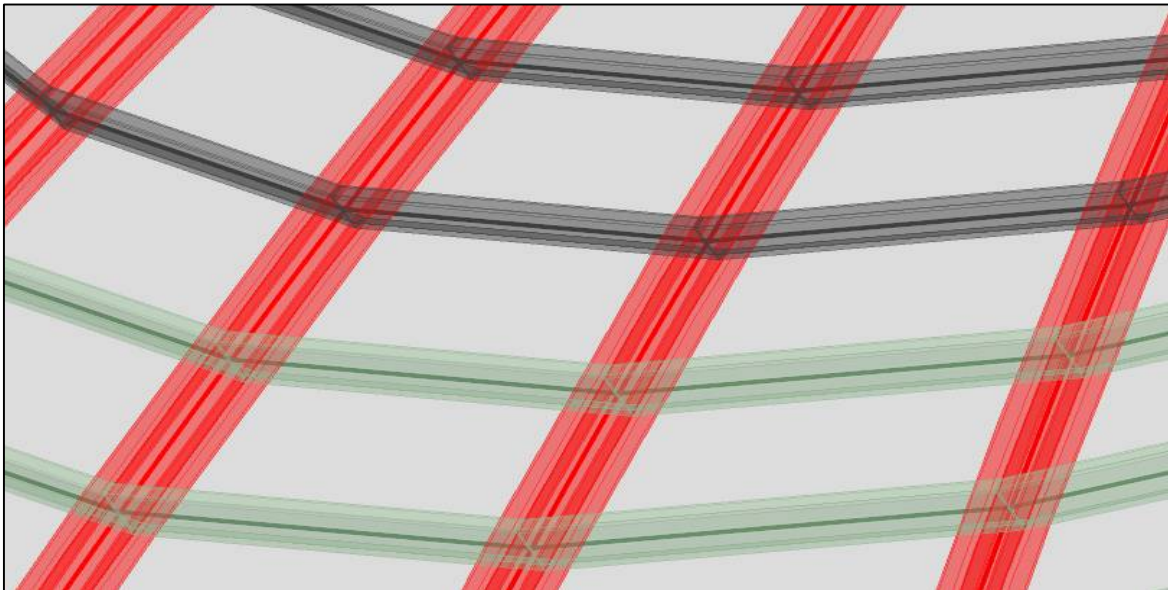
Şekil 4.18. Yapının rijit kabul edilen HEA 400 profilleri

Yapının herhangi bir olumsuzluk yaşanmadan tamamlanabilmesi durumunda tüm yapı modelinin görüntüsü ve meridyen nervürler ile sıkıştırma halkasında kullanılan HEA 400 çelik profillerin görselleri verilmiştir (Şekil 4.17-18).

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	0.1 m
Sizing	
Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	180741
<input type="checkbox"/> Elements	91014

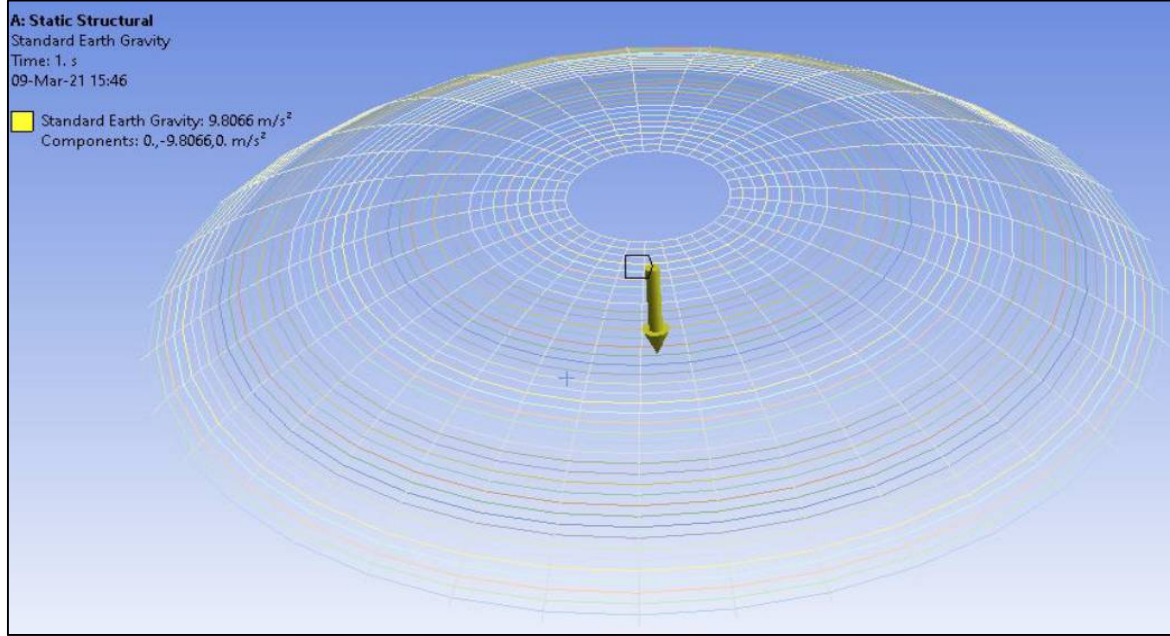
Şekil 4.19. Tüm yapı modelinin analizinde kullanılan eleman ve düğüm sayısı

Tüm yapının modellenmesi sırasında sonlu elemanlar metodu gereksinimlerinden olan mesh ağı deneme yanılma yöntemi ile en sağlıklı analiz sonucunu verecek şekilde ayarlanmıştır. Yapının daha küçük parçalara bölünerek analizinin yapıldığı durumlar da elde edilmiş ancak sonuç değerlerinin ihmal edilecek ölçüde değiştiği görülmüş bu yüzden optimum zaman ve çözüm aralığında en uygun meshleme seçilmiştir. Şekil 4.19 örnek olarak verilmiş olup diğer çözümlerde mesh ağı üzerine detaylı bilgilere değinilmesine ihtiyaç duyulmamıştır.



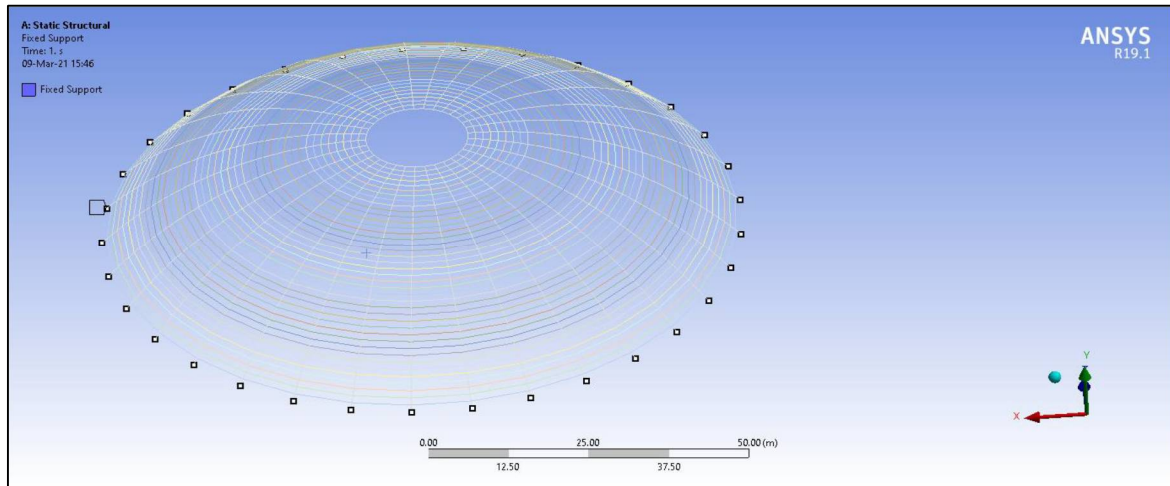
Şekil 4.20. Yapının 3D biçiminde modellenme aşamasında bir görünümü

Tasarlanan yapı modelinin 3 boyutlu bir görüntüsü Şekil 4.20’de verilmiş ve kullanılan farklı profiller, farklı renkler kullanılarak gösterilmiştir.



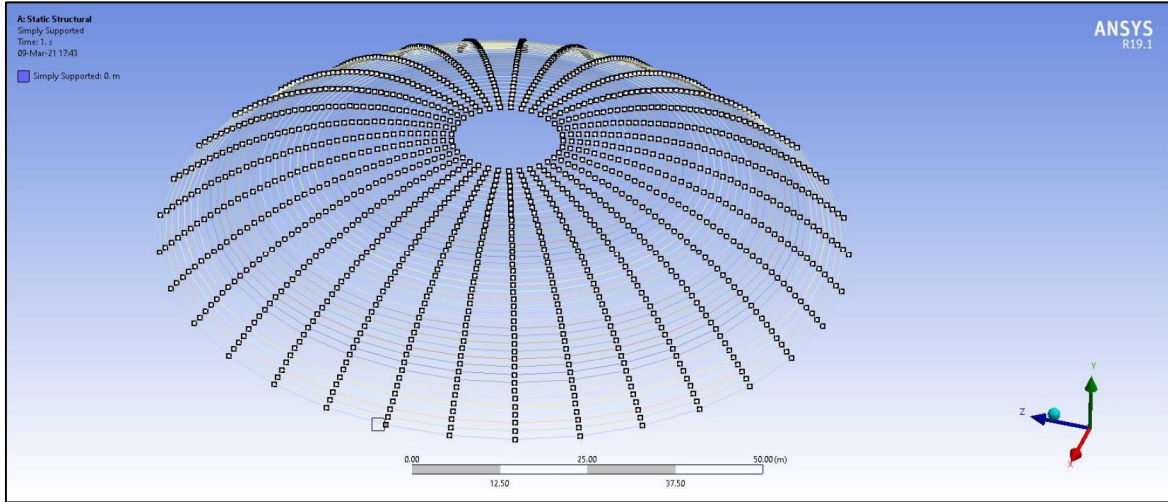
Şekil 4.21. Yer çekimi yönünde etkitilen yapının kendi öz ağırlığı

Yapının bütün olarak modellendiği durumlarda kendi ağırlığı altında göçüp göçmeyeceğini araştırmak için yer çekimi yönünde kendi ağırlığı analize dahil edilmiştir (Şekil 4.21).



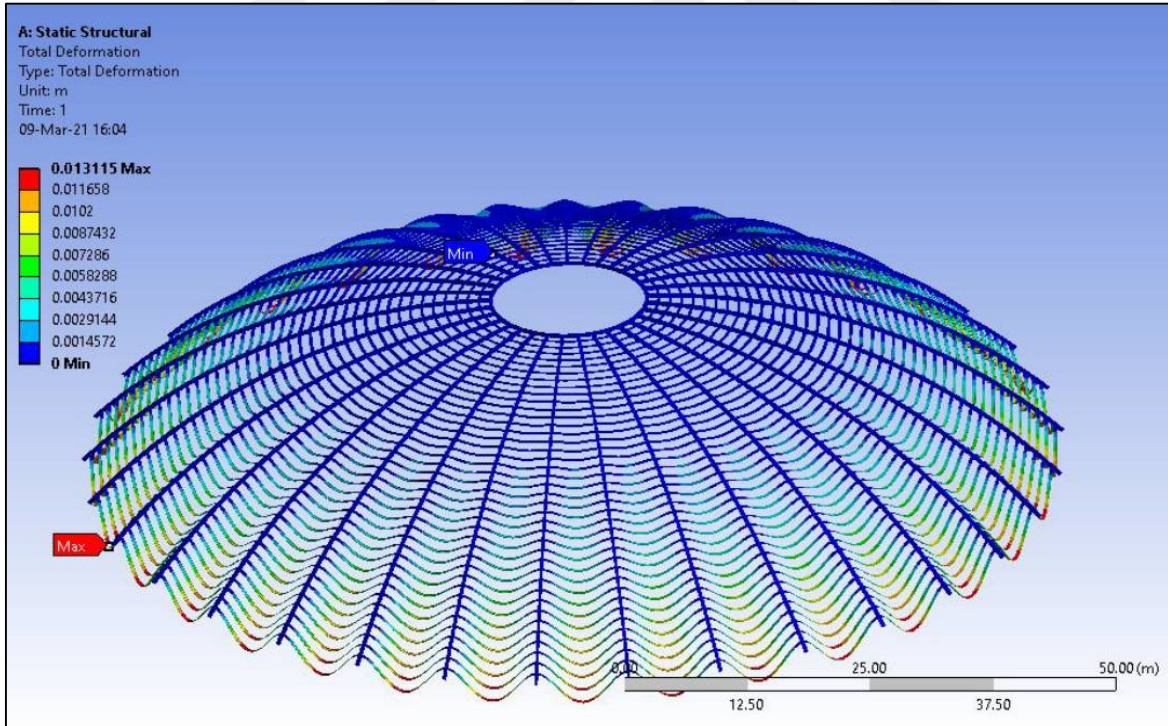
Şekil 4.22. İlk analizde kullanılan ankastre mesnetlerin konumlanması

Göçen yapı incelendiğinde yapıda kolonlardan çatı makaslarına yapılan birleşimlerin ankastre olduğu, kolonlarda herhangi bir göçmenin olmadığı görülmüş ve analizlerin buna göre yapılması sağlanmıştır (Şekil 4.22).

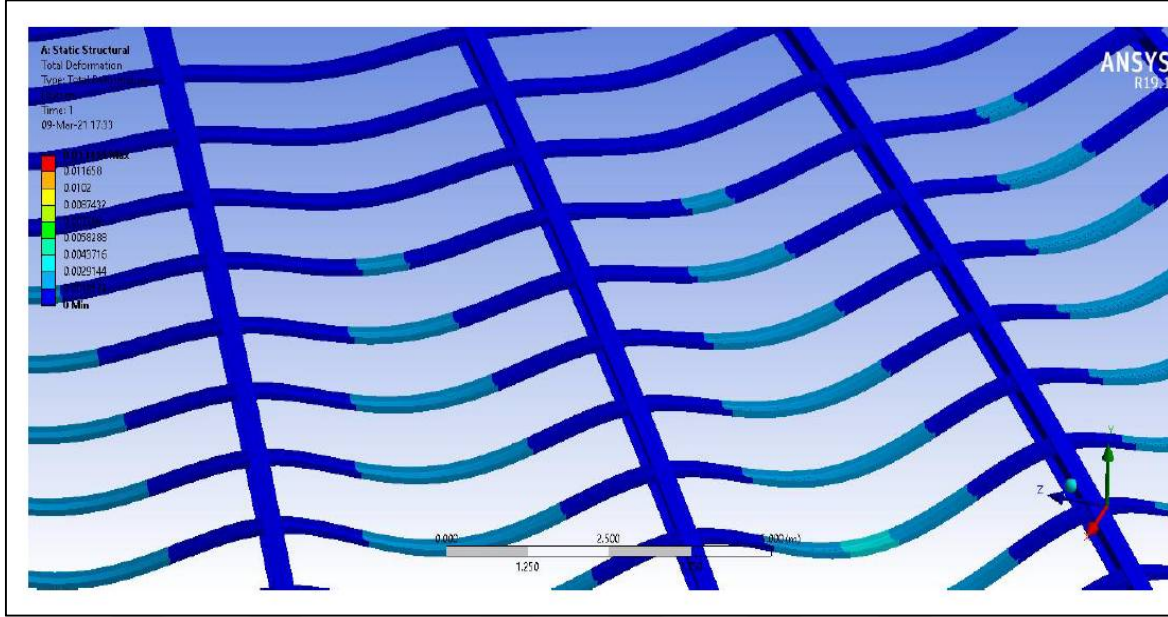


Şekil 4.23. Basit mesnetlenme durumları

Yapıda yay makaslardan kirişlere olan bağlantılar basit mesnetler aracılığı ile yapılmış olup, sağlıklı bir kurulumun sağlanması için bu tercih problem teşkil etmemektedir. Yapının bu şekilde kurulacağı varsayılarak analize devam edilmiştir (Şekil 4.23).



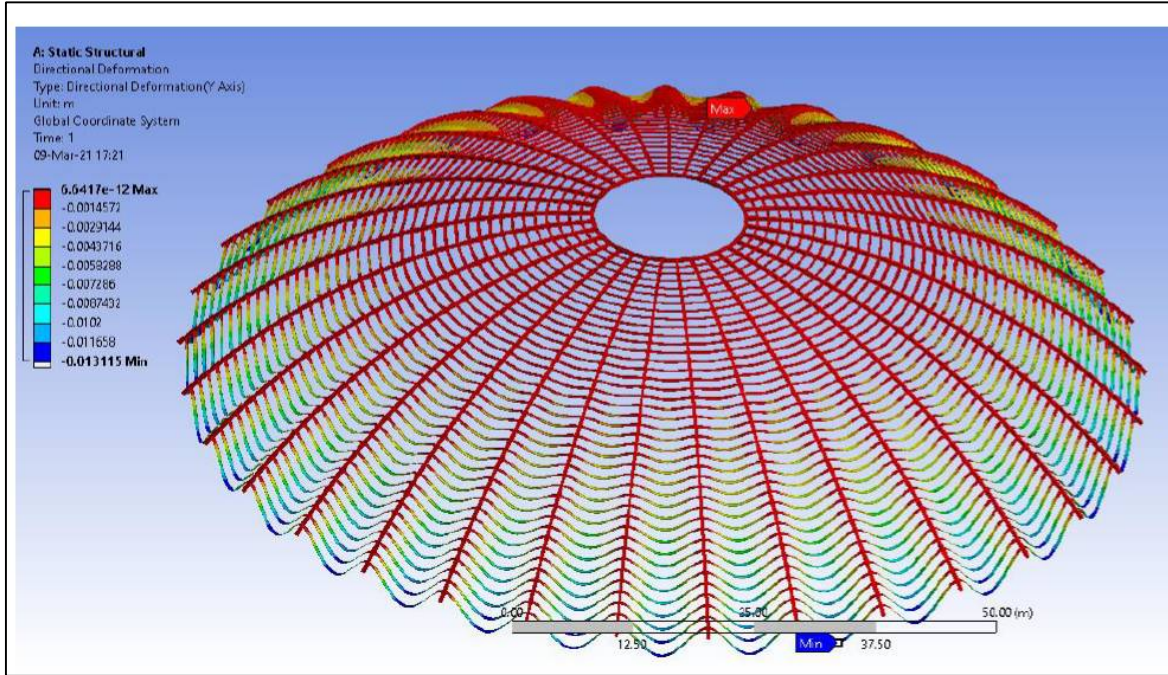
Şekil 4.24. Toplam deformasyon miktarı



Şekil 4.25. Yakınlaştırılmış gösterim ile sehim durumu

Yapının bütün olarak modellenip analizinin yapılması sonucunda sağlıklı ve güvenli bir şekilde kendi ağırlığı altında çökmeyeceği, aksine güçlü bir yapı meydana getireceği bu analiz sonucunda açıklık kazanmıştır. Daha net görülebilmesi açısından sehim davranışının sonuç çıktısının ölçek değerleri artırılmış ve sehimler gösterilmiştir. İhmal edilebilecek düzeyde olan bu sehim davranışının gözle görülmesi mümkün değildir. Analiz çıktısında görülebileceği üzere toplam deformasyon miktarının 1,4 mm ile 13 mm arasında değiştiği, 13 mm olarak gösterilen sehim değerinin de en uzun kirişlerde meydana gelen değer olduğu açıktır. En uzun kirişler yaklaşık 9,35 m olarak modellenmiş ve kolonların hemen üstünde yer edinmiş olup analizde tek parça olarak kullanılmıştır (Şekil 4.24-25).

Bulgular sonucunda yapının montaj aşamasında göçmemesi ve yapı montajının sağlıklı bir şekilde tamamlanabilmesi durumunda kubbenin rijit bir davranış sergileyeceği görülmektedir. Bu durumun, yapı tasarımında değişikliğe gerek olmadığını ancak buna rağmen radyal kubbe formundan daha rijit bir tasarım olan Schwedler tipi kubbe tasarımına neden geçildiğini ve yapının kurulum ve inşa şeklinin neden değiştirildiğini düşündürmektedir. Yeni tasarlanan yapıda iskele kurulumu ve stabilitesi, mesnetlenme ve bağlantı durumları, montaj hataları, insan kusurları, olumsuz dış etkiler gibi inşa süreci aşamalarının da dikkate alınarak olumsuzlukların en aza indirgenmesi açısından böyle bir tasarıma geçildiği söylenebilir.

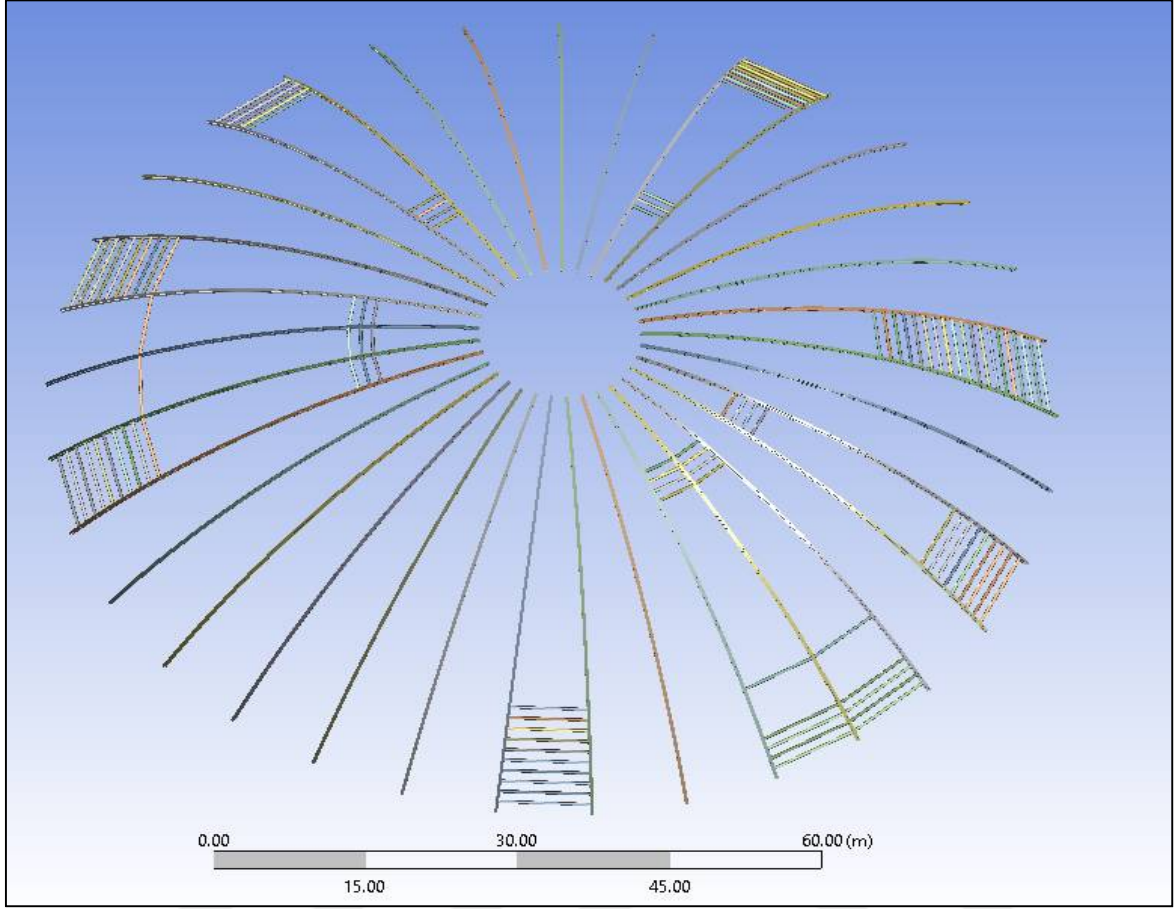


Şekil 4.26. Y ekseninde meydana gelen deformasyon değerleri

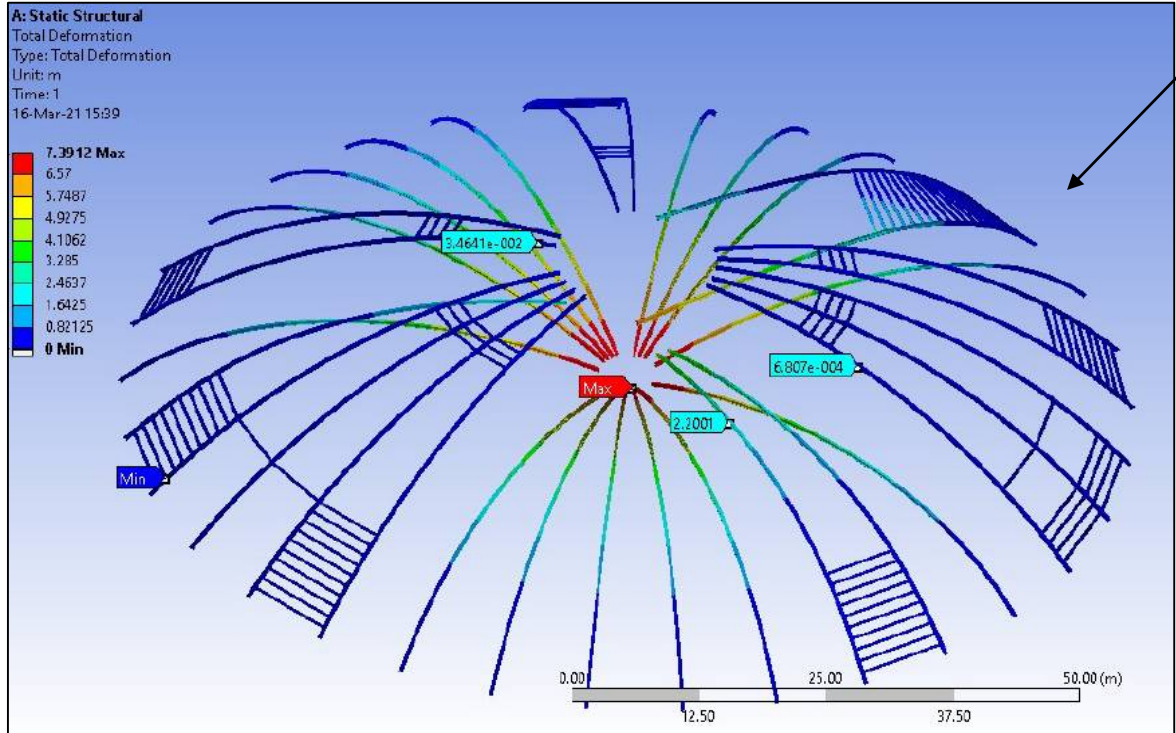
Uygulanan yükleme sonucunda hangi ekseninde ne ölçüde bir deformasyon olduğunun da belirlenmesi önem arz etmektedir. Tez açısından Y yönündeki bu deformasyon değerleri ilgilenebilir değerler olarak kabul edilmiş ve X,Z yönlerinde bu sonuçların alınmasına gerek duyulmamıştır. Yine toplam deformasyonda olduğu gibi bu değerler de tolere edilebilecek diğer bir ifade ile gayet normal değerlerdir. Y yönündeki maksimum deformasyonun yaklaşık değeri 1,3 mm civarındadır (Şekil 4.26).

4.4.2. Analiz 2

Daha önceki bölümlerde verilen görüntüler referans alınarak yapının göçmeye sebep olan kurulumunun analiz edilmesi amaçlanmıştır. Dağınık bir kurulumun açık olduğu yapının bu halinin tek bir kritere bakılarak analizi sağlıklı olmayacaktır (Şekil 4.27). Bu yüzden mesnetlenme durumları da değiştirilerek analiz yapılmıştır. Göçmenin olduğu durumda yay formlu makaslardan ayrılan bazı kirişlerin mesnetlenmelerinin zayıf olduğu varsayılarak, ya da bazı bağlantı noktalarının tam olarak sıkıldığı bazılarının gevşek bırakıldığı düşünülerek birden fazla analiz yapılmıştır. Ayrıca bu şekilde kurulumun yapıldığı durumda hem rijit bir tepe halkası iskele görevi üstlenecek şekilde kullanılarak hem de bu rijitliğin olmadığı iki ayrı durumun analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekiller aracılığı ile yorumlanmıştır.

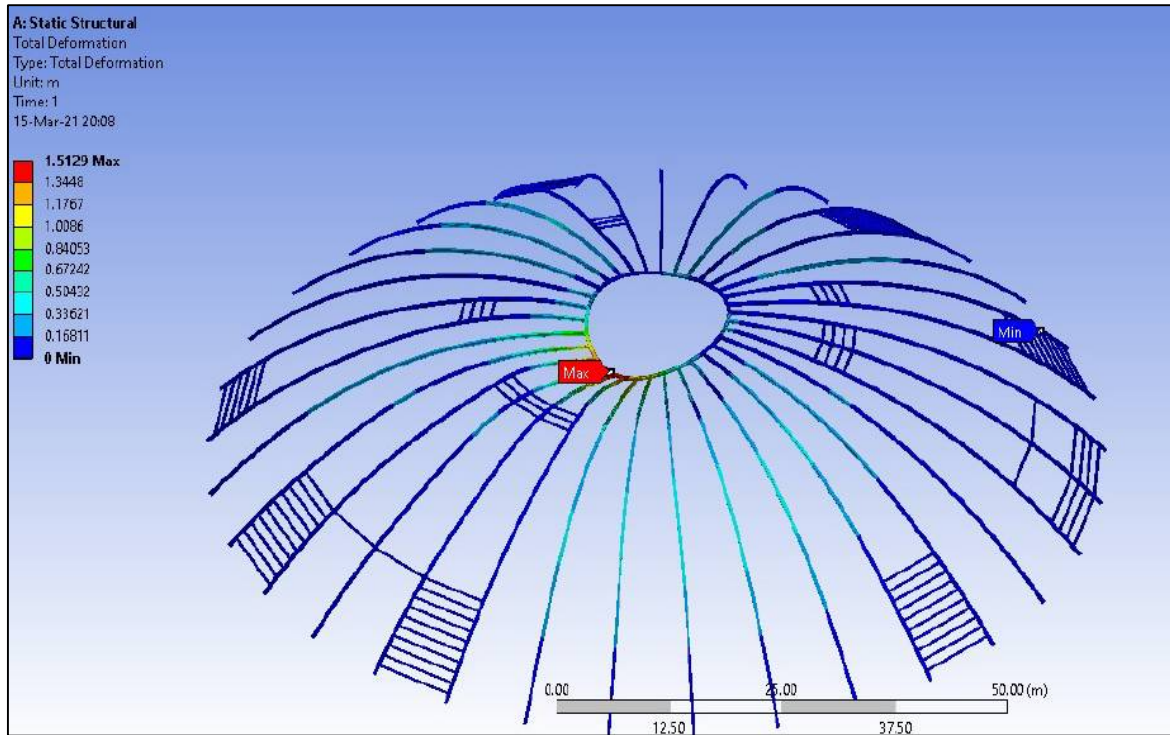


Şekil 4.27. Yapının kurulum aşamasında izlenen yöntem



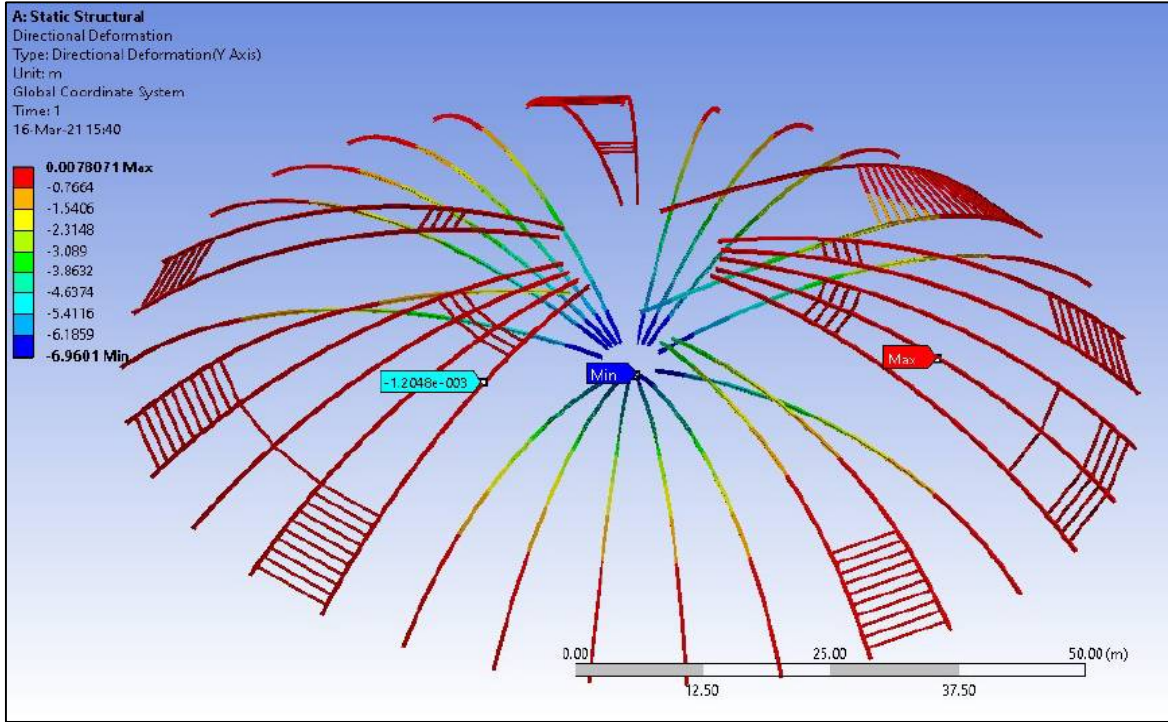
Şekil 4.28. Toplam deformasyon

Şekil 4.28’de görülen durum rijit bir iskelenin olmaması ya da kurulan iskelenin dış etkiler sebebi ile labil hale gelmesi halinde yapının kendi ağırlığı altında göçebileceğidir. Bu göçme sonucu gerçek olayda meydana gelen yapı göçmesine oldukça yakındır. 7 metreden fazla deformasyon meydana gelmiş olup sonlu elemanlar yönteminin çalışma mekanizmasına göre bu değer daha da yüksek olabilmektedir. Ayrıca yapının görsel üzerinde görülebilen sağ arka tarafında mesnetlenme durumlarının eş olmaması sebebi ile kısmi burulmaların meydana geldiği görülebilmektedir. Bu analiz yapıya herhangi bir dış kuvvet verilmeden gerçekleştirilmiş olup dışarıdan bir etkinin de tesir etmiş olma durumunun göçmenin şiddetini arttırdığı söylenebilir.



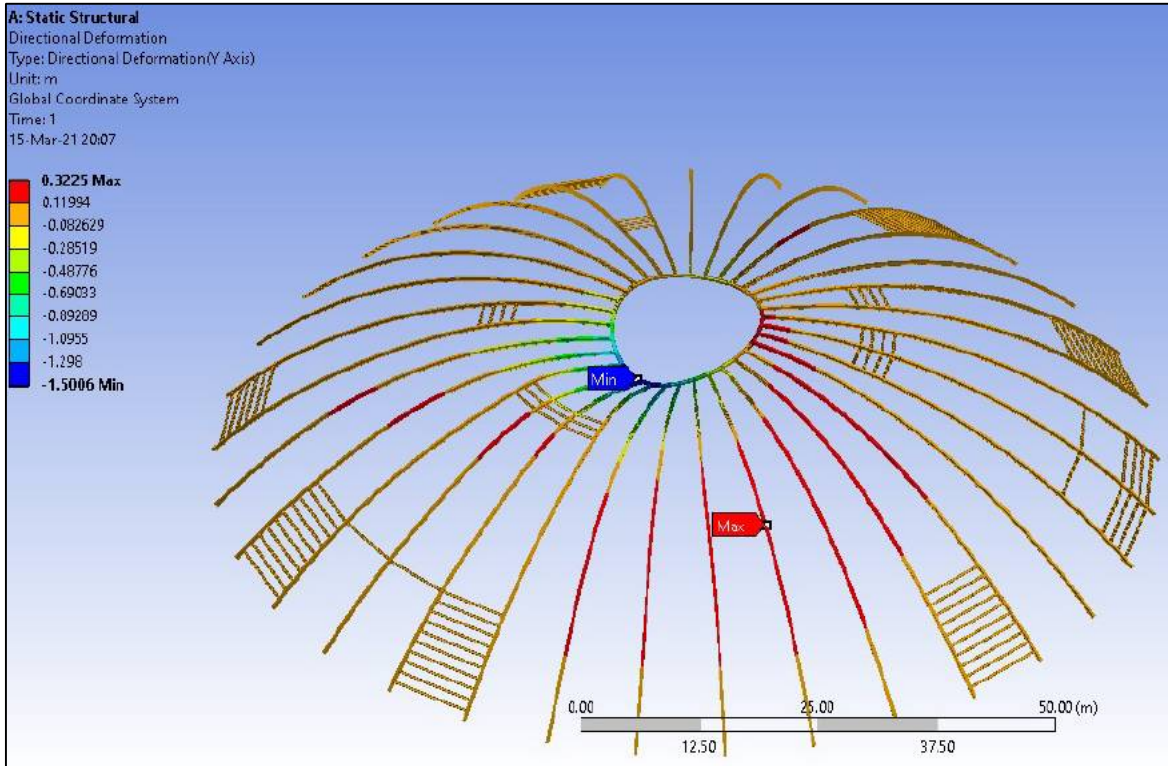
Şekil 4.29. Rijit bir iskele ile kurulumun yapılması sonucu toplam deformasyon

Şekil 4.29 ile böyle bir kurulumun yapılmasının sağlıklı olmayacağı ve göçmenin sadece iskeleye bağlı olmadığı açık olmakla birlikte rijit bir iskele kurulumu sağlanmış olsaydı dahi dışarıdan etkitilen bir kuvvet sebebi ile yapının göçebileceği söylenebilirdi. Ancak yine de rijit iskelenin olması halinde görüldüğü üzere göçme olsa bile bu kadar yıkıcı bir etki yaratmayacaktı. Yaklaşık 1,5 metrelik maksimum bir deformasyon meydana gelecek ve buna rağmen tüm yapının göçmesi engellenebilecekti.



Şekil 4.30. Y yönünde oluşan deformasyon değeri

Y yönünde oluşan deformasyonların rijit bir iskele olmadan yaklaşık 7 metreye ulaştığı görülebilmektedir (Şekil 4.30).



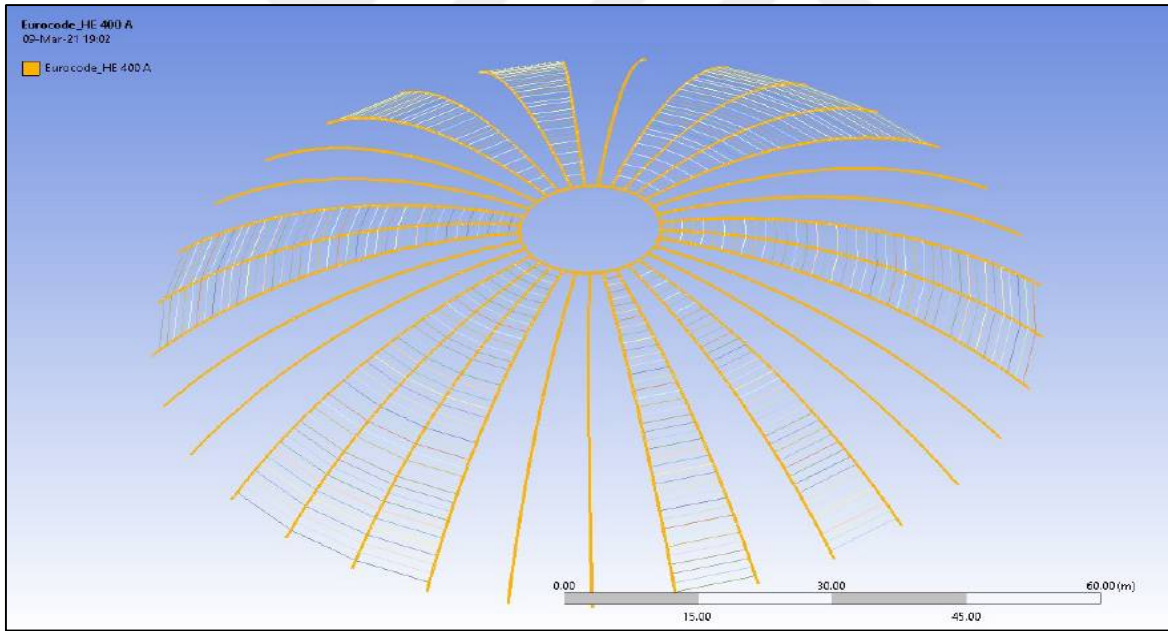
Şekil 4.31. Rijit iskeleli yapının Y yönünde deformasyonu

Ancak iskele kurulumun yeterli rijitlikte sağlanması bu değeri 1,5 metre civarına çekebilmektedir. Yine de bu durum sağlıklı bir kurulum olarak kabul edilmeyip daha iyi sonuçlar için daha sağlıklı yapı kurulumunu ve analizleri gerektirecektir (Şekil 4.31).

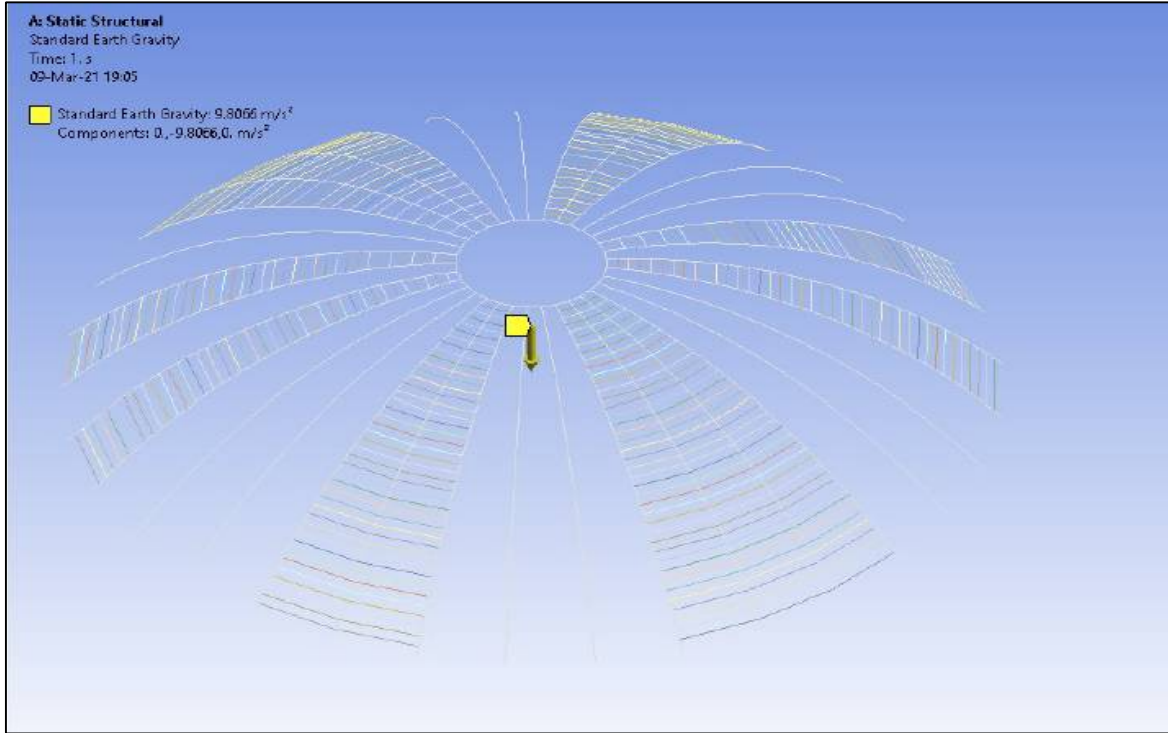
4.4.3. Analiz 3

Şekil 4.32 ile gösterilen formda kurulumu sağlanacak olan yapıda kubbe makasları arasında bulunan kirişler rijit halkaya kadar tamamlanmıştır. Ayrıca makasların simetrik olarak birbirini desteklediği ve daha güçlü bir yapı oluşturmak için mesnetlenmelerinin de eksiksiz yapıldığı varsayılmıştır.

Böyle bir konum ile oluşturulan yapının kendi ağırlığı altında göçmeye uğrayıp uğramayacağı araştırılmıştır.

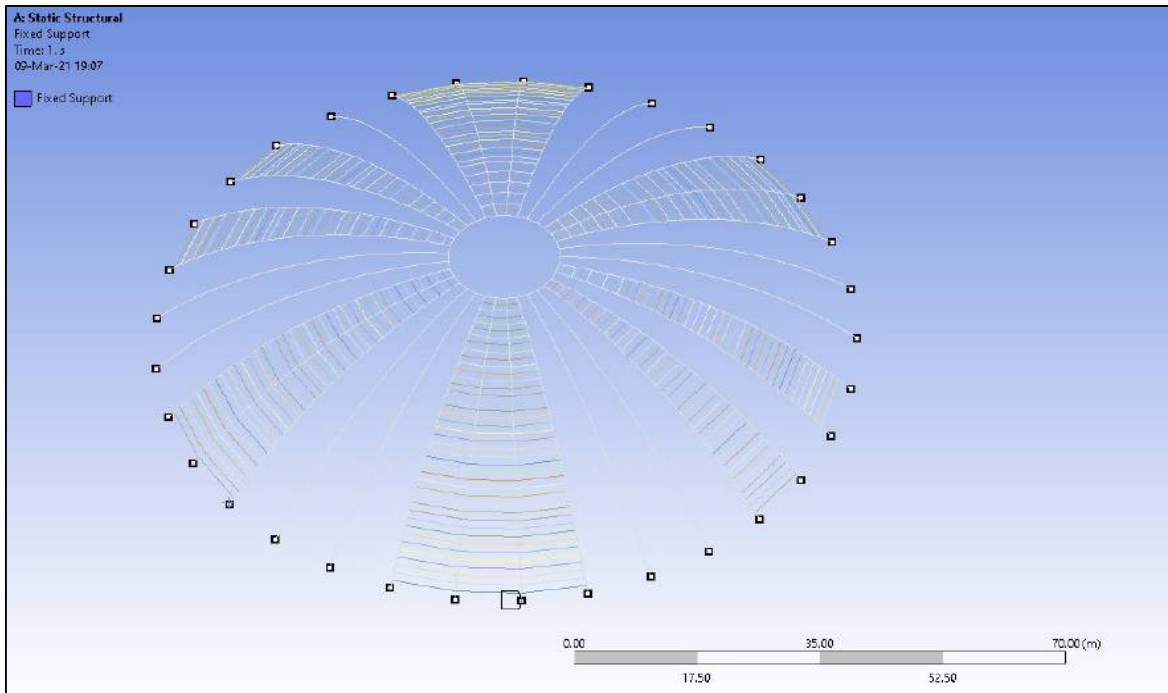


Şekil 4.32. Yapının denge mekanizması gözetilerek kurulumu

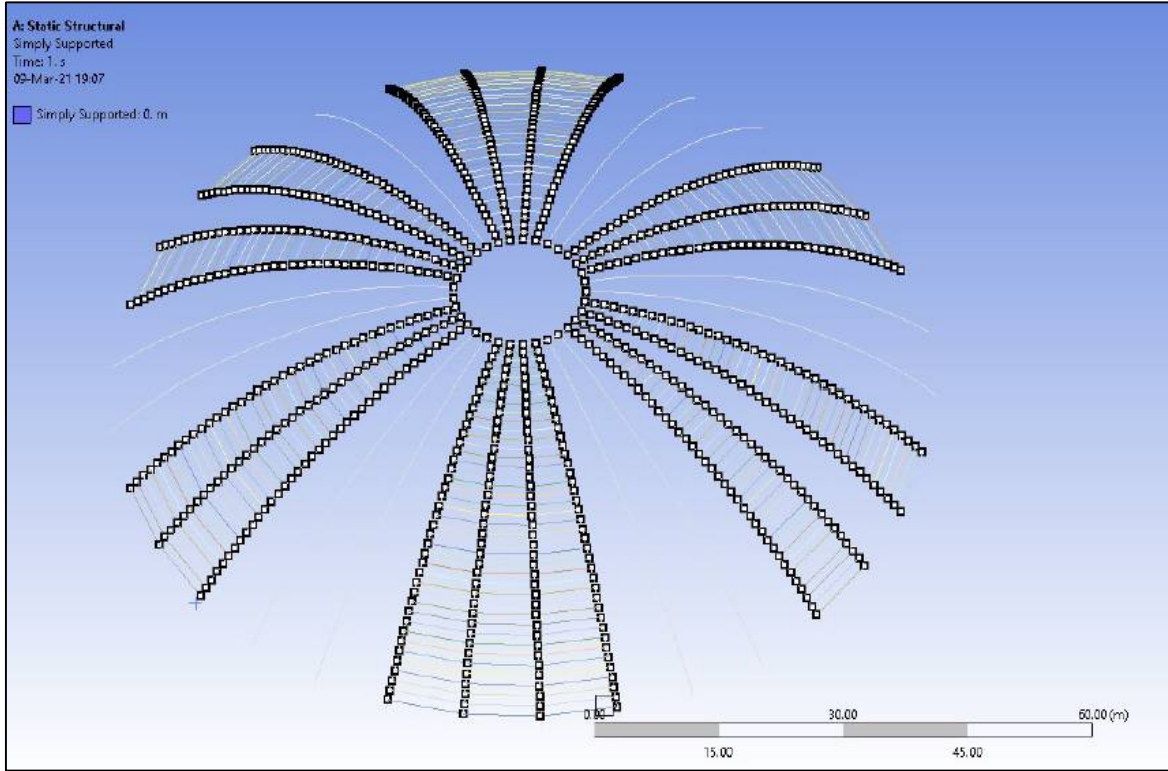


Şekil 4.33. Yapının kendi öz ağırlığı altında incelenmesi

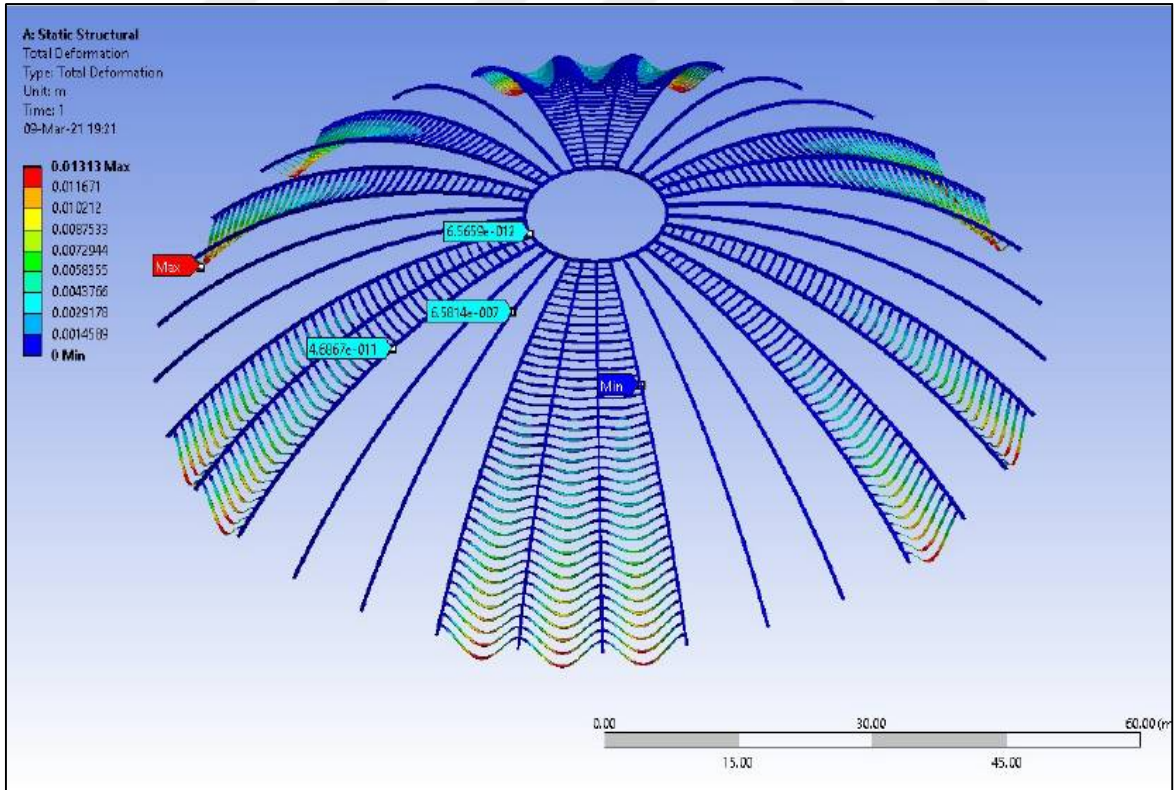
Yapıya daha önceki analizlerde olduğu gibi yerçekimi kuvveti tanımlanarak yapının öz ağırlığının etkisi incelenmiştir. Bunun dışında herhangi bir dış kuvvet etkililmemiştir (Şekil 4.33).



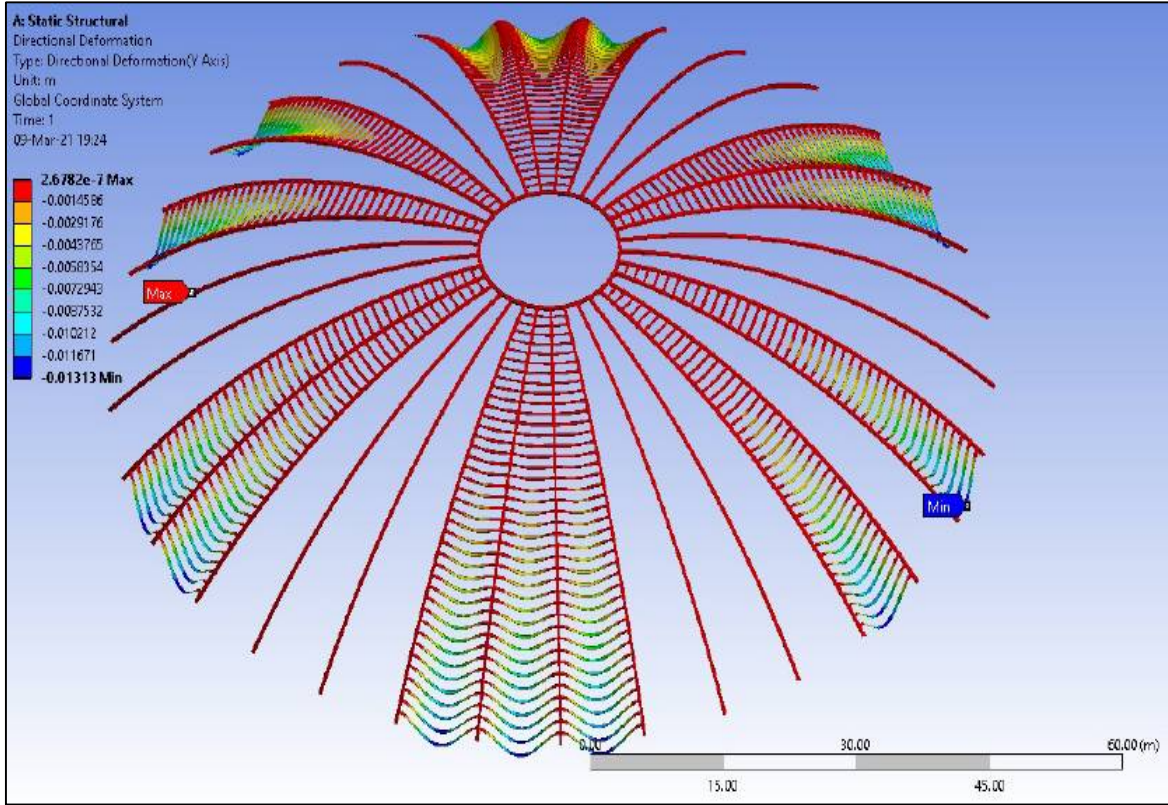
Şekil 4.34. Kolonlar ile bağlantının sağlandığı ankastre mesnet gösterimleri



Şekil 4.35. Kirişlerin makaslara bağlandığı basit mesnetler



Şekil 4.36. Analiz sonucunda elde edilen toplam deformasyon



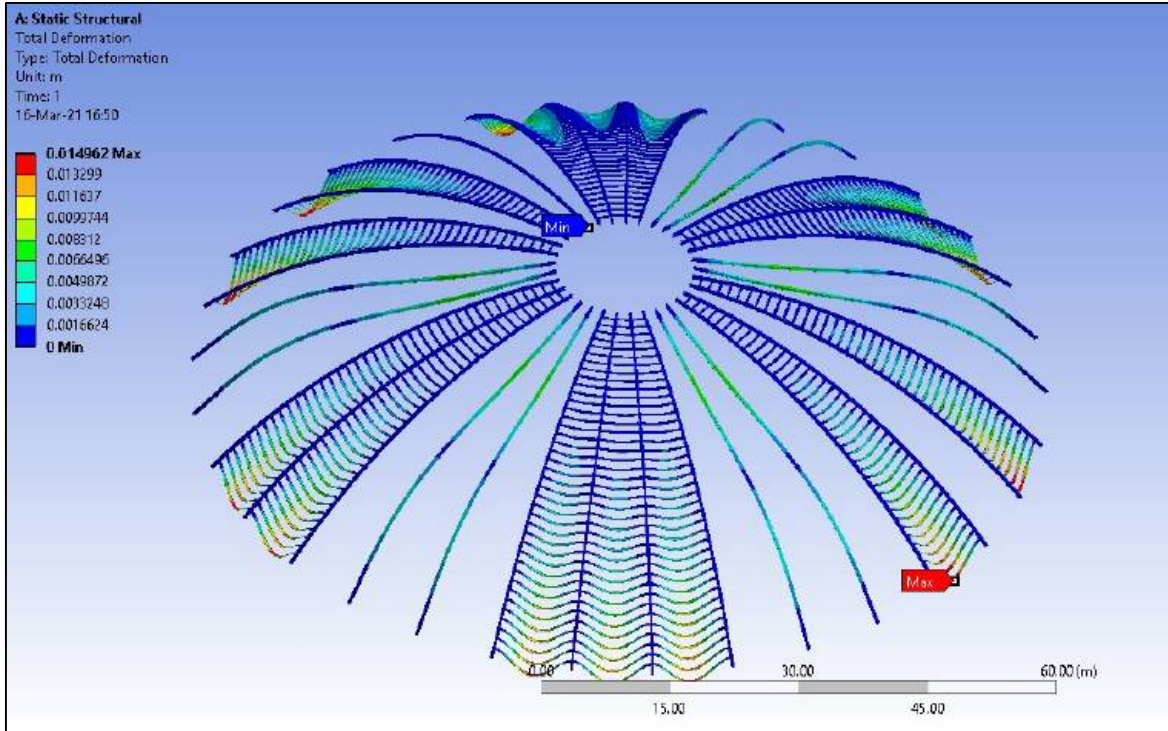
Şekil 4.37. Y yönünde deformasyon değeri

Kubbe formunun 3. analizdeki gibi tasarlandığı durumlarda dikkat çeken bazı bulgulara erişilmiştir. Yapının mesnetlenme durumlarının ve montaj sürecinin Şekil 4.34-37 ile gösterilen durumlardaki gibi olması halinde yapının göçmeyeceği görülmüştür. Ayrıca bütün yapının tamamlanmış olduğu ilk analiz sonucunda olduğu gibi en yüksek deformasyon değerinin sadece 13 mm'lik bir sehim değerine karşılık geldiği görülmektedir. Bu sehim değerinin yine beklendiği üzere tek parça halinde kullanılan yaklaşık 9,3 metrelik uzunluğa sahip olan en alttaki kirişlerde olduğu görülmektedir.

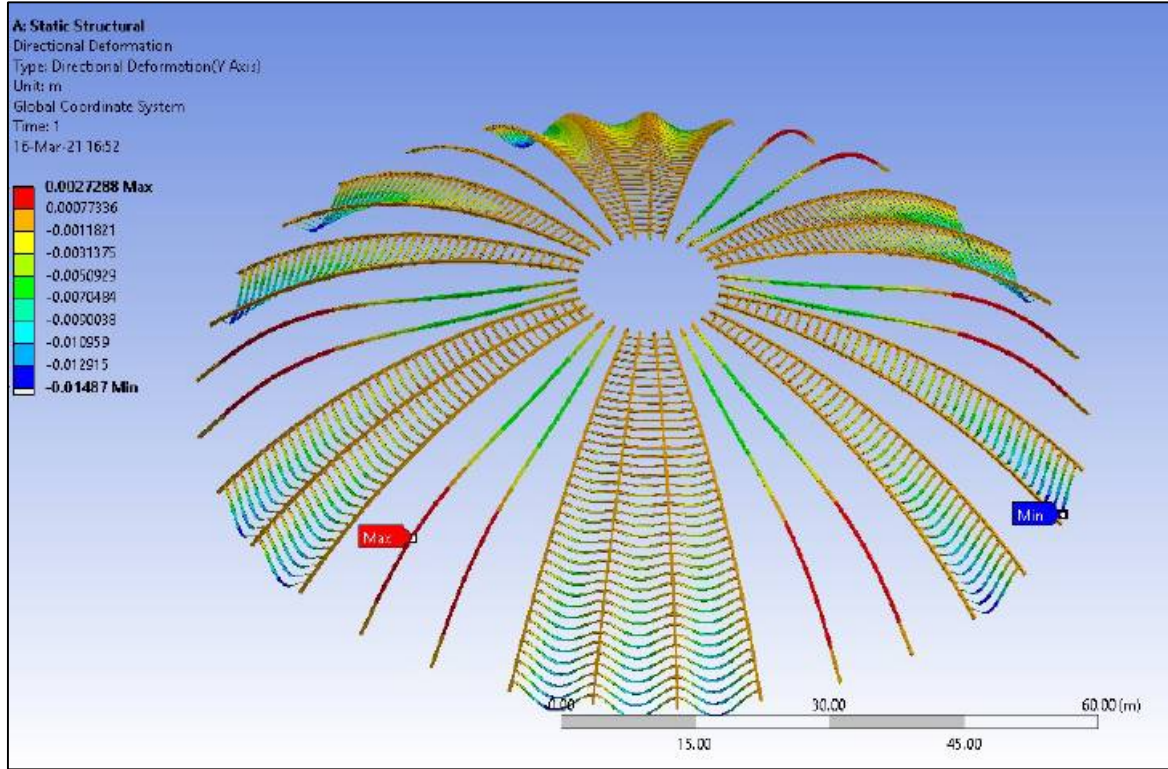
Bulgular yapı kurulumunun bu şekilde yapılmasının kubbe formunda tasarım değişikliğine gerek bırakmayacak olup sadece izlenen montaj prosedürünün değişmesi ile göçmenin engellenebileceğini göstermektedir. Analiz çıktısı olarak alınan Y yönündeki deformasyon değeri de bu bulguları destekler niteliktedir. Bu analiz yapılırken mesnetlenmelerin doğru şekilde yapıldığı, herhangi bir dış etkinin olmadığı, iskelenin rijit olduğu varsayılmış ayrıca çalışma personellerinin veya iş makinelerinin sebebiyet verebileceği olumsuz durumlar yok sayılmıştır. Amaçlanan durum tamamen sağlıklı bir kurulum ve montajın yapıya olan etkisidir.

4.4.4. Analiz 4

4. Analiz ile amaçlanan durum yapı kurulumu yapılırken uzun yay formu makasların karşılıklı olarak birbirini desteklemesi ancak yeterince rijit olmayan halka/iskele kurulumunun veya yetersiz stabilitenin olduğu yapı formunun incelenmesidir. Bu analizde de dışarıdan herhangi bir etkinin olmadığı varsayılmış ve montaj prosedürüne uyulması şartı ile elde edilen bulgular belirtilmiştir. Analizde rijit halka göz ardı edilerek iskelenin labil olduğu ya da yetersiz rijitlikte olduğu varsayılmıştır. Bu durumda yapının kendi ağırlığı altında göçmesi ve bağlantılar ile yapının öz stabilitesinin göçmenin engelleneceği stabiliteyi sağlayıp sağlamadığı araştırılmıştır. Sonuç olarak görülmektedir ki, yapı kurulumunun sağladığı avantaj ile göçme büyük oranda engellenecektir. Yani, iskele labil olsa dahi kurulum bu aşamaya kadar getirilebilse idi kolonlardan alınan destek ve makasların simetrik olarak kurulması sayesinde yapı göçmesinin engelleneceği görülmüştür. Oluşan deformasyon değerinin bütün olarak tasarlanan yapı modelinden çok az miktarda fazla olduğu ancak göçme modundan büyük ölçüde uzak olduğu sonucu bu analiz ile elde edilmiştir. Ayrıca kirişlerin olmadığı kubbe makaslarında deformasyon değerinin daha fazla olduğu ve kirişlerin stabiliteye katkısının önemli ölçüde olduğu görülmüştür (Şekil 4.38-39).



Şekil 4.38. Rijitliğin yetersiz olduğu durumun deformasyonu



Şekil 4.39. Analiz sonucunda Y ekseninde meydana gelen deformasyon değeri

4.4.5. Analiz 5

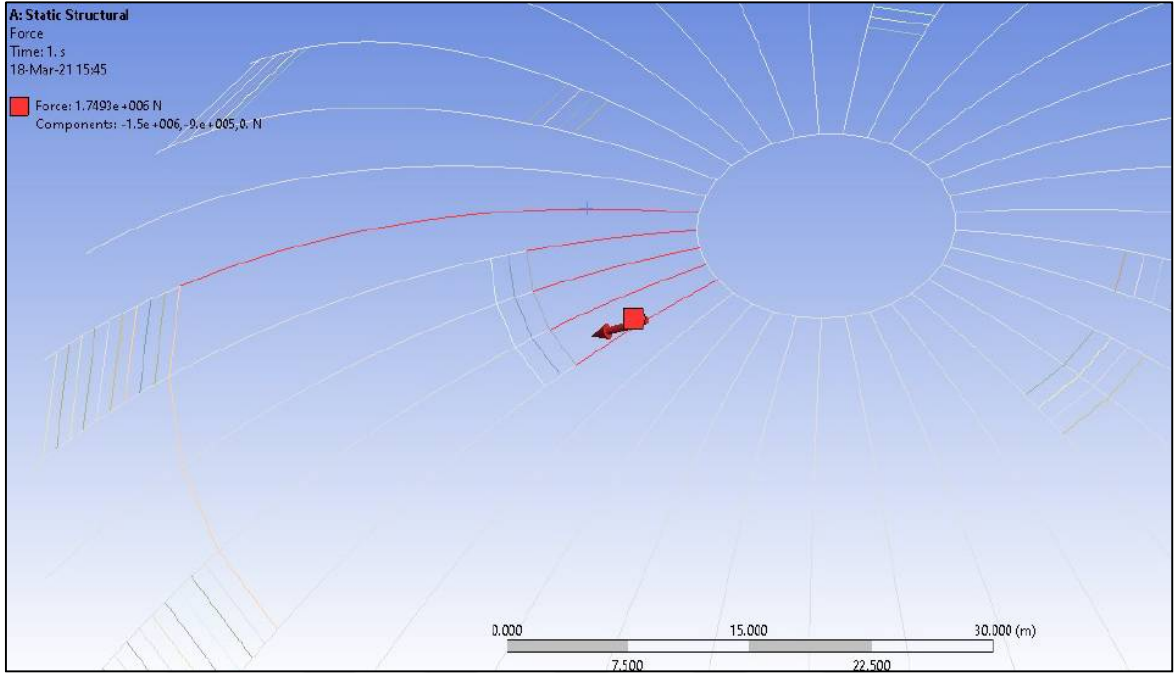
Daha önce belirtilen analizlerde yapının kendi ağırlığı altında göçme durumları incelenmiş olup 4 farklı analiz yapılmıştır. Bu analizlerden ilki yapının bütün halinde tamamlandığı durum, ikincisi göçmenin öz ağırlık altında meydana geldiği durum, 3 ve 4. analizler ise yapının dengeli bir kurulumunun izlendiği hem rijit iskelelenin olduğu hem de yetersiz rijitlikte iskele kurulumu ile meydana getirilen yapı formlarından oluşmaktaydı. Bu analizlerin her biri için dışarıdan herhangi bir kuvvet etkisinin olmadığı varsayıldı. 5. Analiz olan aşağıdaki analiz sonuçları ise yapının göçtüğü formun tekrar kullanılıp farklı olarak tekil bir yük etkisi altında incelenmesini ve herhangi bir sebeple oluşabilecek bir deplasman durumunun göçmeye olan etkisini konu almaktadır. Tekil bir yük veya kısmi bir deplasman etkisinin göçmeye müsait olan yapının göçmesini tetikleyip tetiklemediği araştırılmaya çalışılmaktadır. Ayrıca etkitilen tekil yük aşamalı bir göçmeye mi sebep olacak yoksa eleman bazında bir deformasyon mu oluşturacak buna bakılmıştır. Son olarak bu yüklerin veya kuvvetlerin hangi sebeple meydana gelmiş olabileceği, yapıyı yıkıma götürebilecek büyüklükleri üzerine analizlerde çeşitli değişiklikler yapılarak sonuca gidilmeye çalışılmıştır.

Analizlere geçmeden önce bahsedilen tekil kuvvet etkisinin şantiye şartlarında hangi sebeplerle oluşabileceğinin tahminleri yapılarak göçme öncesi duruma ışık tutulmaya çalışılmıştır. Bu kuvvet etkisi çeşitli sebeplerle olabilir. Bunlar çalışanlar tarafından ya da doğa tarafından meydana gelen dış etkilerden meydana gelmiş olabilir.

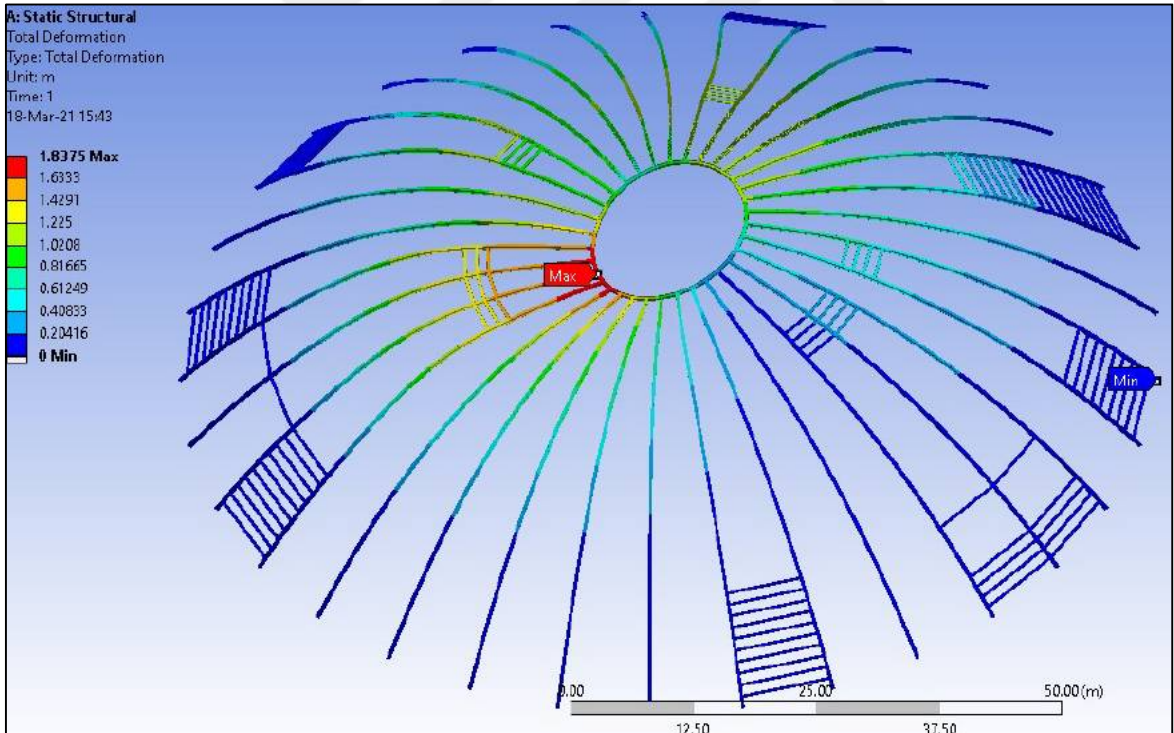
Öncelikle kuvvetli bir rüzgar etkisi ya da fırtına sebebi ile oluşan dış etkiler veya deprem etkisi değerlendirecek olursa yapının göçtüğü gün bölgede herhangi bir olumsuz hava şartının olmadığı ve depremin meydana gelmediği görülmektedir. Bu durumda ikinci bir senaryo olarak enkaz altında görülen vinçlerin etkisi düşünülmektedir. Bu vinçlerden herhangi birinin, kubbe kirişlerinden veya makaslarından birine veya birkaçına birden çarpmış olabileceği veya montaj için kaldırılan yapısal elemanlardan birinin, montajı yapılmakta olan diğer yapısal elemanlara çarpmış olabileceği düşünülmektedir. Diğer bir varsayım olarak vinç ya da herhangi bir iş makinesinin rijit olduğu sanılan iskeleye çarpmış olabilmesi dikkate alınmıştır. Son olarak da montaj yapılırken hizalama amacıyla kirişlerin çekilmesi, gerdirilmesi gibi sebeplerle yapıya ek bir kuvvet etkiltilmiş olabileceği çıkarımları yapılmıştır.

Bu varsayımlardan sonra analizin yapılacağı durumda etkililen yük miktarının ve yönünün belirlenmesi gerekmektedir. Bu analizde yapının ağırlığı program tarafından yaklaşık 400 ton civarında hesaplanmıştır. Yapının meydana geldiği göçme olayında haberlere yansıyan yapı ağırlığı yaklaşık 200 ton olarak belirtilse de bu ağırlığın yapının tamamlanmadan önceki yani göçme anındaki ağırlığı olduğu düşünülmektedir. İkinci durum ise yapı ağırlığındaki farklılıkların sebebi olarak analizde kullanılan çelik malzeme kesitleri ile yapıda kullanılan kesitlerin farklılığı olabilir.

5. Analiz olan bu durumda yapıya etkililen yük değerleri bileşke bir kuvvet olarak X yönünde $-1\ 500\ 000\ \text{N}$ ve Y yönünde $-900\ 000\ \text{N}$ kuvvet olacak şekilde etkiltilmiştir (Şekil 4.40). Bu kuvvetlerin etkisi altında yapı yaklaşık olarak 1,83 m civarında bir deformasyon göstermiş olup yapı ağırlığına kıyasla bu değerler normal karşılanabilir (Şekil 4.41). Buradan çıkarılan sonuç ise gerçek anlamda rijit bir iskelenin kurulabilmesi ile incelenen yapının kurulum aşamasında meydana gelen göçmesinin engellenebileceğidir.



Şekil 4.40. Tekil kuvvet etkisi

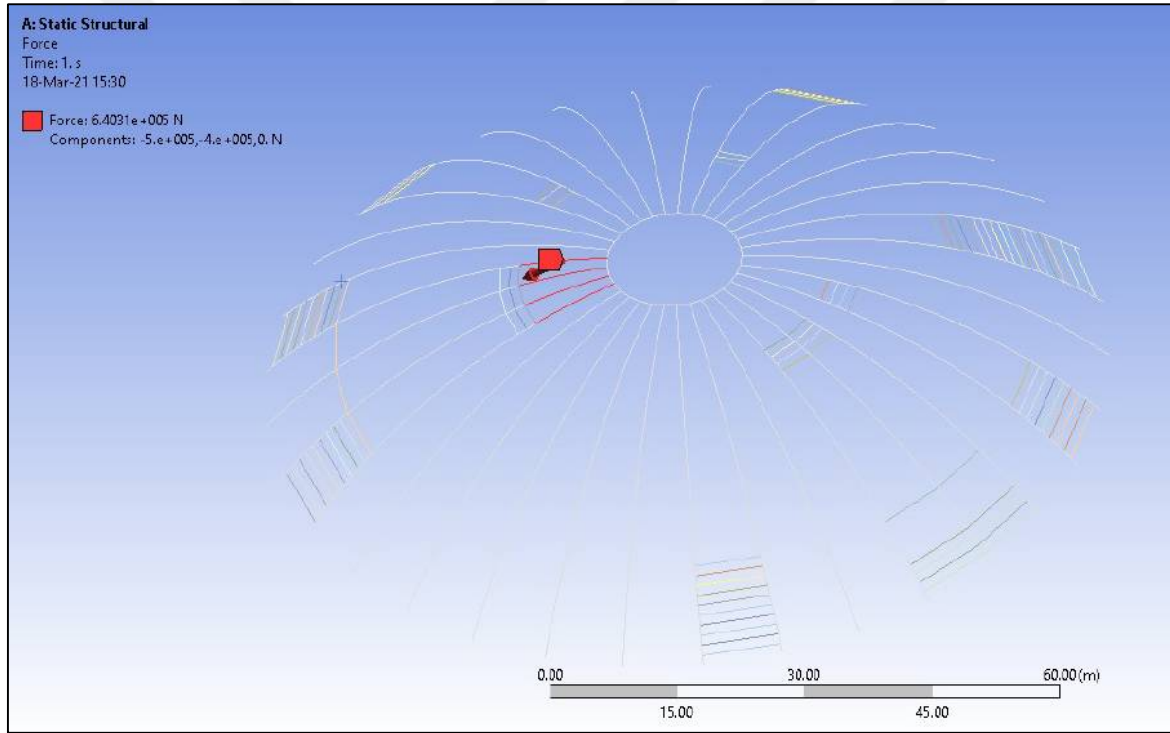


Şekil 4.41 Rijit iskeleli yapıda tekil kuvvet etkisi ile oluşan deformasyon durumu

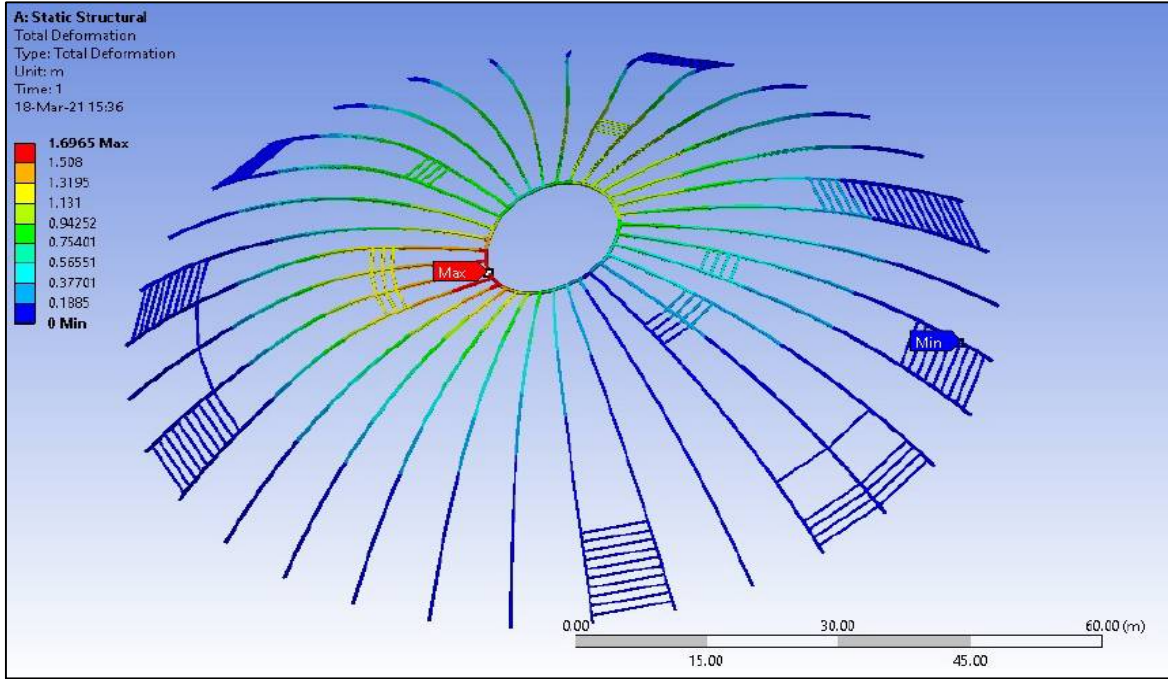
Yük değerleri azaltılarak yeni bir değerlendirme yapılmış ve daha düşük bir deformasyon değeri elde edilmiştir. Yükün etkilendiği noktalarda bazı farklılıklar da yapılmış olup bu analizden çıkarılan sonuç rakamsal olarak değişse de göçmenin meydana geliş sebebinin bu

durum olmadığı açık olarak görülmektedir (Şekil 4.42-43). Dışarıdan büyük bir yük etkisi dahi tüm yapıyı değil belli kısımları deforme edecek şekilde etki edecektir.

Ancak ele alınan yapıda bütün olarak bir göçme meydana gelmiş olup bu göçmenin önce rijit olduğu düşünülen iskeleye en yakın ve temas halinde olan yapısal bölümden başlamış olduğu ve tüm yapının bu tetikleme sebebi ile aşamalı olarak kısa sürede göçtüğü çıkarımına ulaşılmıştır. Burada aşamalı göçme terimi tetikleme amacını taşımakta olup yapının kubbe formu olması sebebi ile diğer çelik bina sistemlerden farklı olarak aşamalı bir göçmeden bahsedilmektedir. Son olarak yapının göçmesine sebebiyet verdiği düşünülen iskelenin hangi sebeple rijitliğini kaybettiği ise bilinmemektedir.

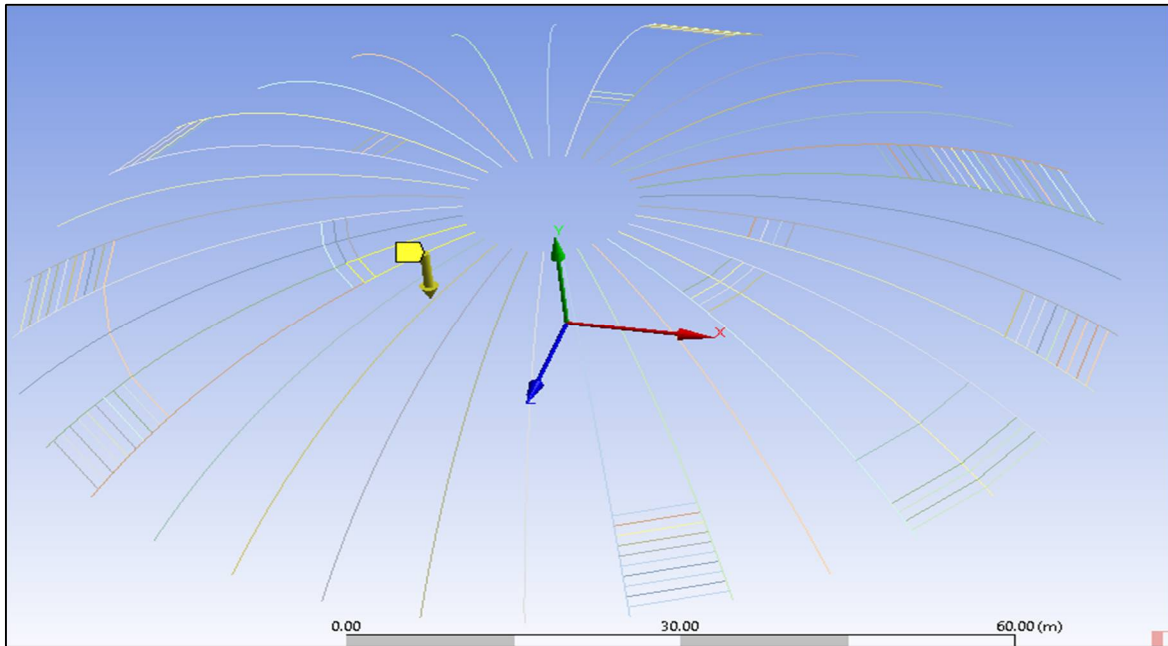


Şekil 4.42. Daha düşük değerde farklı bir tekil bir kuvvet etkisi



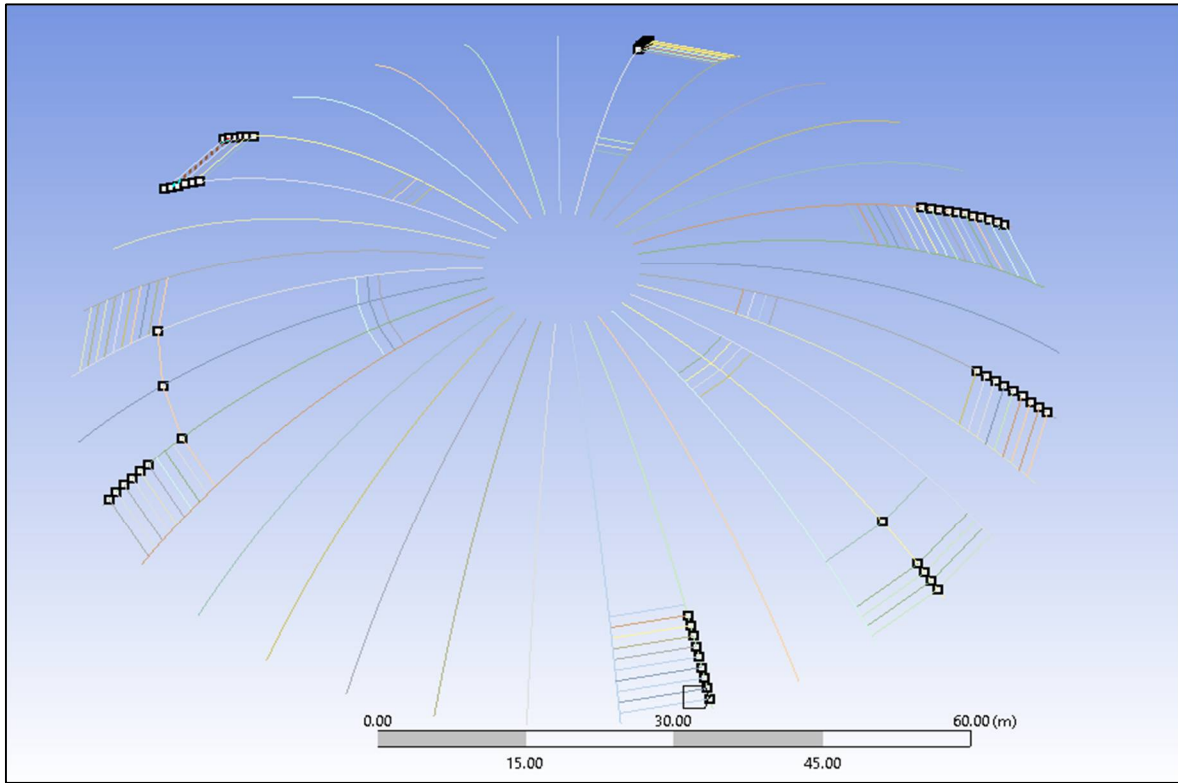
Şekil 4.43. Düşük tekil kuvvet etkisi ile oluşan deformasyon durumu

Yapıda tekil kuvvet etkisi incelendikten sonra deplasman etkisine bakılmıştır. Herhangi bir sebep ile yapının bir bölümünün deplasmana maruz kalması ile tüm yapının aşamalı olarak göçmüş olabileceği ihtimali üzerinde durulmuştur. Yapıya etkitilen 4m'lik deplasman değeri tahmini olarak seçilmiş olup yapının bu 4m'lik kısmi bir göçmenin tüm yapıya olan etkileri araştırılmıştır (Şekil 4.44).

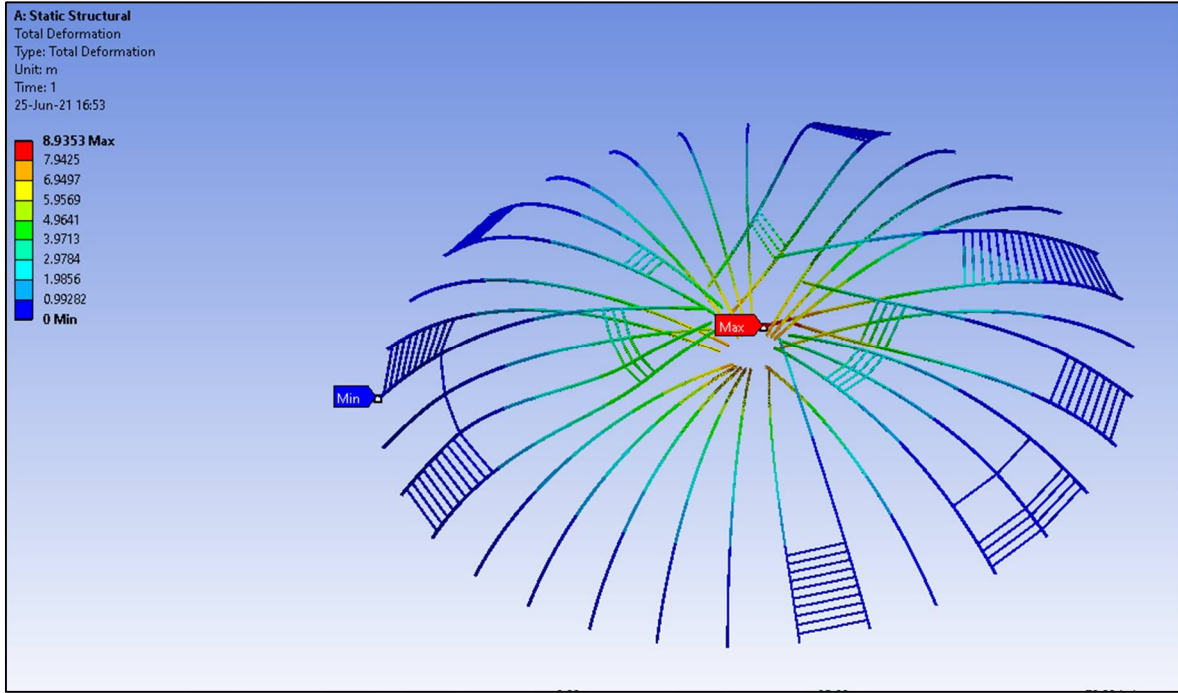


Şekil 4.44. Deplasman etkisi

Göçmenin olduğu durumda yay formlu makaslardan ayrılan bazı kirişlerin olduğu bilinmektedir. Bu kirişlerin mesnetlenmelerinin zayıf olduğu varsayılarak, ya da bazı bağlantıların tam olarak yapıldığı bazılarının da eksik bırakıldığı düşünülerek analiz yapılmıştır (Şekil 4.45). Böyle bir durumda deplasman etkilenen elemanların diğer yapısal bölgelerdeki elemanlara olan olumsuz etkisi incelenmiş ve göçmenin tetiklenerek büyüdüğü çıkarımı yapılmıştır.



Şekil 4.45. Mesnet bağlantılarının yetersizliği



Şekil 4.46. Deplasman etkisi ile yapının göçme durumu

Bu göçme sonucu gerçek olayda meydana gelen yapı göçmesine oldukça yakındır. 8 metreden fazla göçme meydana gelmiş olup sonlu elemanlar yönteminin çalışma mekanizmasına göre bu değer daha da yüksek olabilmektedir (Şekil 4.46). Bulgular mesnet bağlantılarının yetersizliğini, iskelenin yapı yüklerini karşılayabilecek şekilde kurulmadığını ve en önemlisi belirli bir montaj prosedürünün olmadığını ya da montaj prosedürü varsa bile buna uyulmadığını doğrular niteliktedir. Analizlerden elde edilen bulgular aracılığı ile bu vaka çalışmasından çıkarılan sonuçlar ve sonraki çalışmalarda çelik bir yapının montaj aşamasında dikkat edilmesi ve kaçınılması gerekenler sonuç ve öneriler bölümünde belirtilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yapılan detaylı literatür araştırmaları konuya nasıl yaklaşılacağı hakkında genel bir fikir oluşturmuş ardından Ansys yazılımı sayesinde bu fikirlerin bilimsel yaklaşımlarının sağlandığı analizler yapılmıştır. Bu analizler ışığında gerçek göçme durumuna en yakın şekilde elde edilen sonuçlar bu bölümde belirtilmiştir. Ele alınan yapının bütün olarak modellenip sonlu elemanlar analizinin yapılması ile hangi durumlarda sağlıklı ve güvenli bir şekilde kendi ağırlığı altında çökmeyeceği ve güçlü bir yapı örneği göstereceği açıklık kazanmıştır. Aynı zamanda göçmenin kaçınılmaz olduğu durumlar da netleştirilmiştir.

Yapının, rijit bir iskele kurulumu olmadan ya da kurulan iskelenin dış etkiler sebebi ile labil hale gelmesi durumlarında inşa süreci devam ederken kendi ağırlığı altında göçebileceği öngörülmüştür. Ancak bu göçmenin sadece iskele ile ilgili olmadığı aynı zamanda yapının kurulum aşamasından itibaren yanlış bir montaj sırasının izlendiği açıklığa kavuşmuştur. Çünkü rijit bir iskele kurulumu sağlanmış olsaydı bile dışarıdan etkiyen herhangi bir kuvvet sebebi ile yapı göçebilirdi. Ancak yine de rijit iskelenin sağlanmış olması durumunda bu kadar yıkıcı bir etki oluşmayacaktı.

Ele alınan kubbe formunda mevcut yay formulu makasların birbirini karşılıklı olarak desteklediği ve kirişlerin yapı tepesindeki rijit halkaya kadar tamamlanması durumunda yapının göçmeyeceği fark edilmiştir.

Sonuç olarak görülmektedir ki, düzgün planlanmış bir yapı kurulumunun sağladığı avantaj ile göçme büyük oranda engellenecektir. Yani, kurulum son aşamaya kadar dengeli bir montaj işlemi izlenerek yapılırsa kolonlardan alınan destek ve makasların simetrik olarak kurulması sayesinde yapı göçmesi engellenecektir. Ayrıca doğru kurulum ile tasarlanan yapıda iskele sonradan labil hale gelse dahi oluşan deformasyon değerinin bütün olarak tasarlanan yapı modelinden çok az miktarda fazla olduğu ancak göçme modundan büyük ölçüde uzak olduğu görülmüştür. Ayrıca kirişlerin olmadığı kubbe makaslarında deformasyon değeri daha fazla olup kirişlerin de stabiliteye katkısının önemli ölçüde olduğu görülmüştür.

İncelenen yapının göçmeden sonra yeniden tasarlandığı ve nervürlü kubbe formundan Schwedler kubbe formuna geçildiği, ayrıca kurulumun yapılırken dengeli bir tasarımın izlenerek iki yay formulu makas arasındaki kirişlerin montajının rijit halkaya kadar tamamlandığı daha sonra ise diğer kirişlerin montajına geçildiğinin çok muhtemel olduğu görülmektedir. Bir diğer değişim ise sonradan kurulan iskelenin göçme anındaki iskeleden çok daha rijit olmasıdır. Yani hem kubbe formu, hem iskele hem de montaj prosedürü değişmiştir. Bu da analizlerden çıkarılan sonuçlar ile örtüşerek, yetersiz destek, labil iskele ve yanlış montaj prosedürünün bir arada olduğunu ve bunlardan herhangi birinin eksikliğinin yapıyı göçmeye götürebileceğini doğrular niteliktedir. Yine de belirtmekte fayda olduğu düşünülen durum şudur ki; bu 3 durumdan göçmeye katkısının en az olduğu durum kubbe formunun değiştirilmesidir. Yapının tasarım formu değişmeden diğer iki durumun (rijit iskele ve montaj prosedürü) doğru şekilde yapılması halinde göçmenin engellenebileceği analizler aracılığı ile açıklığa kavuşturulmuştur. Tasarımdaki bu iyileştirilme, yapının, bina üreticisi tarafından belirlenen planlara ve yönergelere sıkı sıkıya uyacak şekilde inşa edilmesi ile amacına ulaşacaktır. Aksi halde tasarım değişikliği tek başına yeterli değildir.

Günümüz inşaat ortamında bulunan olası tüm tehlikelerin göz önüne alınması mümkün olmamakla birlikte bu olay için temel bir anlayış oluşturulmaya çalışılmıştır. Yine de göçmeyi tetiklediği düşünülen iskelenin hangi sebeple rijitliğini kaybettiğinin açıklığa kavuşturulması gereklidir. Bu tür durumların daha açık bir şekilde verilerinin elde edilebilmesi için bilirkişi incelemelerinin yaygınlaşması, bunlara erişimin kolaylaştırılması ve bu incelemelerin fazla zaman kaybı olmadan yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada analizi yapılan ve literatürde yer alan diğer vakaların incelenmesi yapım aşamasında özellikle şu hususlara dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır:

- Yapım ve montaj işleri deneyimli ve ehil kişiler tarafından kontrol edilmeli ve gözetilmelidir.
- Tedarikçiler ve alt-yükleniciler kontrol edilmelidir.
- Tasarımcının neyin yapılmasını istediği ile neyin yapılmakta olduğu karşılaştırılmalıdır.
- Montaj, ayrıntılı bir montaj kılavuzu ile sağlanmalı ve montaj ilerledikçe ona atıfta bulunulmalıdır.
- Tüm alt-yüklenicilerin verilen toleranslara uygun iş yaptığından emin olunmalıdır.

- Bu tip yapıların inşası sırasında, yapısal stabilite için gerekli tasarım özellikleri yerine getirilene kadar geçici stabilite sağlanmalıdır.

Yapım aşamasında çelik yapılardaki pek çok göçme vakalarının yaşandığı gözlenmektedir. Çelik yapıların yapımı ile ilgili standart olan EN1090-2'de tasarım ve montaj aşamaları ile ilgili olarak pek çok kural ve dikkat edilmesi gereken husus bulunmaktadır. Ancak bu kuralları uygulayacak kişilerin de yeterlilikleri konusunda gereklilikler standartta yer almalıdır. Kontrol personelinin çelik yapıların genel teknolojileri konusunda da ehil olmaları gerekmektedir. Yapısal göçme olaylarında bilginin gizlenmesi yerine tasarım ve yapımda ilerlemeler için öğrenme fırsatı olarak bu vakalar düşünülmelidir. Özellikle yüksek endüstriyel yapılar için kritik montaj aşamasında bu tür olayların önlenmesine ilişkin çok az veri mevcuttur. Daha fazla araştırma yürütmek ve bu tür yapıların arızalarının belgelenmesi yardımcı olacaktır.

Bu tür, boyut, karmaşıklık ve önemde bir yapı için ayrıntılı bir montaj sırası planı tasarlanmalı ve uygulanmalıdır. Plan, inşaatın her aşamasında yapının sağlamlığını dikkate alınmalıdır. Gereken yerlerde geçici elemanlar ve desteklerin sağlanması gerekir. Bu gereklilik, montaj destekleri için tüm sorumluluğu ve dolayısıyla inşaat koşulları altında çelik yapının stabilitesini montaj yüklenicisine yükler.

Düzenli olarak şantiye sahasını takip edecek ve her gün sonunda kurulumu rapor edecek bir yetkili görevlendirilmiş olsa idi ve gerekli notlar alınsaydı, desteklerin, iskelenin, bağlantıların kurulumundaki hatalar fark edilecek montaj ekibinin dikkatine sunulacaktı. Bu uyarı, kurucuların bu eksikliği gidermek için herhangi bir önlem almasını sağlayabilirdi. Bunlar yapılmadığı için, yapının, montaj dengesizliği nedeniyle çökmesinin önüne geçilememiştir. Bu konu üzerine düşünülmesi ve gerekli derslerin çıkarılması sağlanmalıdır. Bu tür durumların kısa süre içinde çözülmesi, bilirkişilerin konuya dahil edilmesi ve çökmenin gerçekleriyle karşılaşıldığında, metal yapı taşıyonlarının, çökmenin nedeni hakkında görüşlerinin alınması, gerekli desteklerin olup olmadığının öğrenilmesi önemlidir. Ek olarak, bu özel yapının montaj ekibi tarafından daha önce bir benzerinin inşa edilip edilmediği araştırılmalıdır. En azından bundan sonra inşa edilecek yapılar için çalışanlar seçilmeden önce bu durumun araştırılmasında fayda olacaktır. Son cümle olarak neredeyse her yapının tasarımı ve inşası farklı olduğundan, son zamanlarda çökmüş yapı örnekleri, standartların tek başına yeterli olmadığını kanıtlamaktadır.

KAYNAKLAR

- AISC 360, "Specification for Structural Steel Buildings," American Institute of Steel Construction, *Chicago, IL, USA*, 2016.
- Alpsten, G. (2017, February). Causes of structural failures with steel structures. In *IABSE Symposium Report* (Vol. 107, No. 1, pp. 1-9). International Association for Bridge and Structural Engineering.
- ASCE 2013. Minimum design loads for buildings and other structures. *American Society of Civil Engineers*.
- Augenti, N., & Parisi, F. (2013). Buckling analysis of a long-span roof structure collapsed during construction. *Journal of performance of constructed facilities*, 27(1), 77-88.
- Ayub M., Guttema T. B., "Investigation of the July 27, 2011 Systems-engineered Metal Building Collapse in San Marcos, TX," U.S. Department of Labor, OSHA, *Directorate of Construction*, January 2012.
- Bell, B. J., & Linzell, D. G. (2007). Erection procedure effects on deformations and stresses in a large-radius, horizontally curved, I-girder bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 12(4), 467-476.
- Beri, P. (1993). Cyclonic damage to structural steel skeleton during erection. *Journal of performance of constructed facilities*, 7(2), 101-108.
- Biezma, M. V., & Schanack, F. (2007). Collapse of steel bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 21(5), 398-405.
- Brencich, A. (2010). Collapse of an industrial steel shed: A case study for basic errors in computational structural engineering and control procedures. *Engineering Failure Analysis*, 17(1), 213-225.
- Chacko, P., Dipu, V. S., & Manju, P. M. (2014). Finite element analysis of ribbed dome. *International Journal of Engineering Research and Applications* (IJERA), 25, 32.
- Chavel, B. W., & Earls, C. J. (2006). Construction of a horizontally curved steel I-girder bridge. Part I: Erection sequence. *Journal of Bridge Engineering*, 11(1), 81-90.
- Chen, J., Peng, W., Ma, R., & He, M. (2012). Strengthening of horizontal bracing on progressive collapse resistance of multistory steel moment frame. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(5), 720-724.
- Choi, Y. S., Lim, I., Kim, T., Cho, H., & Kang, K. I. (2016). Case study of the core structure succeeding method for tall building construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(12), 05016017.
- Courant, R. (1994). Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Lecture notes in pure and applied mathematics*, 1-1
- Crocetti, R. (2016, March). Large-span timber structures. In *Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering* (pp. 1-23).

- Çoşkun, H., & Sancar, S. (2019). Çelik Yapıların Montaj Sürecindeki Göçme Vakalarının İncelenmesi. *8th International Steel Structures Symposium*, 108-116, Ankara.
- ÇYY-2016, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, *Resmi Gazete*, 2016.
- Del Coz Díaz, J. J., Nieto, P. G., Martínez-Luengas, A. L., & Sierra, J. S. (2010). A study of the collapse of a WWII communications antenna using numerical simulations based on design of experiments by FEM. *Engineering Structures*, 32(7), 1792-1800.
- Eldhose, M., Rajesh, A. K., & Ramadass, S. (2015). Finite element analysis and parametric study of schwedler dome using ABAQUS software. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 28(7), 333-338.
- Ellifritt, D. S. (1981). What makes a building a system. In *16th Metal Building Systems Industry Exposition*, New Orleans, La., MBMA, Cleveland, Ohio.
- EN 1090-2, "Execution of Steel Structures and Aluminium Structures, Part 2: Technical Requirements for the Execution of Steel Structures," *European Committee for Standardization*, 2008
- EN 1995-1-1, Eurocode 5, Design regulations for timber structures.
- Feld, J., & Carper, K. L. (1996). Construction failure (Vol. 78). *John Wiley & Sons*.
- Fiouz, A., & Karbaschi, M. E. (2012). Effect of wind loading on spherical single layer space truss steel domes. *International Journal of Physical Sciences*, 7(16), 2493-2505.
- Galambos, T. V. (2016). Structural members and frames. *Courier Dover Publications*.
- Green, P. S., & Holtermann, T. (2008). Bridging of Open-Web Steel Joists and Joist Girders. In *Structures Congress 2008: Crossing Borders* (pp. 1-12).
- GSA, U. (2003). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. *Washington, DC*,
- Hastings, J. S., Zhao, Q., & Burdette, E. G. (2010). Steel girder stability during bridge erection: AASHTO LRFD check on L/b ratios. *Journal of Bridge Engineering*, 15(6), 759-762.
- Hodge, P. T. and Galambos, T. V., "A theoretical study of the lateral performance of steel joists when restrained by bridging and standing seam deck," In *Partial Fulfillment of a Master's of Science in Civil Engineering at the University of Minnesota*, MN, 1986
- Hosseini, M., Hajnasrollah, S., & Herischian, M. (2012). A Comparative Study on the Seismic Behavior of Ribbed, Schwedler, and Diamatic Space Domes by Using Dynamic Analyses. *Proceedings of the 15WCEE, Lisbon*, 24-28.
- Hung, C. W. (2009). *A comparative study of structural material for dome construction* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Hwang, K., Knippers, J., & Park, S. W. (2009, December). Influence of various types of node connectors on the buckling loads of grid shells. In *Symposium of the International*

Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings. Editorial Universitat Politècnica de València.

Izadifard, R. A. (2016). An Efficient Method to Prevent Progressive Collapse of Steel and RC Buildings. *World*, 5(3), 15-20.

İnternet: Ansys. URL: <https://www.ansys.com/company-information/the-ansys-story> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Ansys. URL: <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/may2017/feature-technical-structural-analysis.page> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: ENGR, Sonlu Elemanlar Teorisi URL: https://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA_Theory.pdf Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Ansys Yapısal Analiz URL: <https://marsisinovasyon.com/en-profesyonel-ansys-yapisal-analiz/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Burkulması Önlenmiş Çelik Çaprazlar. URL: <https://www.sanalsantiye.com/sismik-yapi-elemanlarinda-yeni-bir-alternatif-burkulmasi-onlenmis-celik-caprazlar/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Çelik Konstrüksiyon Tarihsel Gelişimi. URL: <https://insapedia.com/celigin-yapilara-uygulanmasindaki-tarihsel-gelisim/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Çelik Konstrüksiyon. URL: <https://insapedia.com/tag/celik-konstruksuyon> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Çelik Yapı İmalatı. URL: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/%C3%87elik%20Yap%C4%B1%20%C4%B0malat%C4%B1.pdf Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Çelik Yapı Şantiye Uygulamaları. URL: <http://imoistanbul.org/imoarsiv/seminer-notlari-ekim-2017/sezai-guvensoy.pdf> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021

İnternet: Çelik Yapılarda Ekonomi. URL: https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/384da616c9ccad4_ek.pdf?tipi=79&turu=X&sube=15 Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Fabrika Kazası, Eskişehir. URL: <https://www.haberler.com/fabrikada-is-kazasi-1-olu-3-yarali-11376757-haberi/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: FEM Avantaj ve Dezavantajları. URL: <http://www.muhandishesabi.com/2018/11/17/sonlu-elemanlar-yontemi-tarihcesi-ve-amaci/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: FEM Avantaj ve Dezavantajları URL:

- <http://www.pretechnologies.com/services/finite-element-analysis/advantages> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Gökkubbe İnşaatı. URL: <https://beyazgazete.com/haber/2013/7/29/gokkubbe-insaati-devam-edecek-1893658.html> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Gökkubbe İnşaatı. URL: <http://www.ajans32.com/gokkubbe-boyle-yikildi...-video-16795h.htm> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Gökkubbe İnşaatı. URL: <http://www.ajans32.com/gokkubbe-insaati-coktu...-16792h.htm> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Gökkubbe İnşaatında Çökme. URL: <https://www.iha.com.tr/haber-ismartada-gokkubbe-insaatinde-cokme-289405/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Hava Durumu Arşivi. URL: <http://www.ajans32.com/ismarta-icin-bir-haftalik-hava-durumu-16542h.htm> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Hava Durumu Arşivi. URL: <https://www.havadurumu.com.tr/havadurumu-arsiv/ismarta-hava-durumu> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Hollanda Güvenlik Kurulu URL: <https://www.bbc.com/news/world-europe-14063640> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Kayseri Kongre Binası.
URL: <https://www.gazeteduvar.com.tr/gundem/2018/11/02/kayseride-kongre-binasinin-catisi-coktu/>
- İnternet: OSHA Çelik Montajı, 2006. URL: <https://www.osha.gov/steel-erection> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: OSHA, 2001. URL: <https://www.osha.gov/laws-regs/federalregister/2001-04-30> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: SEAA, Amerika Çelik Montajcılar Birliği. URL: <https://www.seaa.net/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: SJI TD No:9. URL: <https://steeljoist.org/product/td9-handling-and-erection-of-steel-joists-and-joist-girders/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: SJI, 2015. URL: <https://steeljoist.org/professional-resources/standards-and-specifications/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Sonlu Elemanlar Uygulama Adımları. URL: <https://insapedia.com/sonlu-elemanlar-yontemi-nedir-sinir-sartlari-uygulama-adimlari/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Sonlu Elemanlar Uygulama Adımları. URL: <https://www.pveng.com/home/fea-stress-analysis/a-step-by-step-introduction-to-fea/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.
- İnternet: Sonlu Elemanlar Yöntemi URL: <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/sonlu-elemanlar-metodu-nedir-nerelerde-kullanilir/11661#ad-image-0> Son

Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Sonlu Elemanlar Yöntemi URL: <https://www.ceyrekmuhendis.com/sonlu-elemanlar-analizi-nedir/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Sonlu Elemanlar Yöntemi URL: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-fea-finite-element-analysis/> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

İnternet: Yapısal Güvenlik. URL: <https://www.labc.co.uk/news/structural-safety-industry-advice-issued-following-steel-frame-building-collapse> Son Erişim Tarihi: 07.06.2021.

Jacob, F., & Ted, B. (2007). A first course in finite elements. *Wiley*.

Jáuregui, D. V. (2014). Evaluation of a Steel Girder Bridge Collapse during Deck Removal. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(4), 04014007.

Jiang, J., Li, G. Q., & Usmani, A. (2014). Progressive collapse resistance of braced steel frames exposed to fire. In *Sustainable Development of Critical Infrastructure* (pp. 472-479).

Jiang, X., & Chen, Y. (2012). Progressive collapse analysis and safety assessment method for steel truss roof. *Journal of performance of constructed facilities*, 26(3), 230-240.

Kara, T. 2019. Tek Tabakalı Kubbelerin Taşıyıcı Sistemlerinin Yönetmelikler Açısından Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Khalil, A. A. (2012). Enhanced modeling of steel structures for progressive collapse analysis using the applied element method. *Journal of performance of constructed facilities*, 26(6), 766-779.

Khandelwal, K., & El-Tawil, S. (2005). Progressive collapse of moment resisting steel frame buildings. In *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond* (pp. 1-11).

Kong, D. Y., Yang, Y., Yang, B., & Zhou, X. H. (2020). Experimental study on progressive collapse of 3D steel frames under concentrated and uniformly distributed loading conditions. *Journal of Structural Engineering*, 146(4), 04020017.

Kuzulu, M. 2015. Jeodezik Kubbe Formlu Bir Taşıyıcı Sistemin AISC 360-10 Yönetmeliği Kullanılarak Mafsallı ve Ankastre Düğüm Noktası Tiplerine Göre Karşılaştırmalı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Lan, T. T. (1999). Space frame structures. *Structural engineering handbook*, 13(4).

Li, L. L., Li, G. Q., Jiang, B., & Lu, Y. (2018). Analysis of robustness of steel frames against progressive collapse. *Journal of Constructional Steel Research*, 143, 264-278.

Liu, G., Peng, Y., Zhou, P., Tong, Y., & Pang, S. (2010). Research on erection methods of steel stiffening truss girder for Baling River bridge. *Journal of Highway and*

Transportation Research and Development (English Edition), 4(2), 50-56.

- Lopez, A., Puente, I., & Serna, M. A. (2007). Direct evaluation of the buckling loads of semi-rigidly jointed single-layer latticed domes under symmetric loading. *Engineering structures*, 29(1), 101-109.
- Makowski, Z. S. (Ed.). (1984). Analysis, design, and construction of braced domes. *Nichols Publishing Company*.
- Martin, R., & Delatte, N. J. (2001). Another look at hartford civic center coliseum collapse. *Journal of Performance of Constructed facilities*, 15(1), 31-36.
- Menon G., Braile T. R., "September 1, 2015 Collapse of a Steel Building During Erection at Bryant University, Smithfield, RI," U.S. Department of Labor, OSHA, *Directorate of Construction*, February 2016.
- Mirtaheri, M., Emami, F., Zoghi, M. A., & Salkhordeh, M. (2019). Mitigation of progressive collapse in steel structures using a new passive connection. *Structural Engineering and Mechanics*, 70(4), 381-394.
- Narayanan, Subramanian. Space Structures: Principles and Practice *Multi-Science Publishing: 2006*,
- Nastar, N., & Liu, R. (Eds.). (2019, August). Failure Case Studies: Steel Structures. *American Society of Civil Engineers*.
- Nayak, C. B., & Vedant, C. S. (2017). Numerical assessment of probability of detecting defects in civil structures. *NICMAR J. Constr. Manag.*, 32(1), 28-35.
- Nayak, C. B., Jain, M. A., & Walke, S. B. (2020). Parametric study of dome with and without opening. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101, 463-475.
- Ovalı, İ., & Esen, C. (2018). Ansys Workbench (Vol. 3). *İnkılap Kitabevi Yayın San. Tic. A.Ş., Kodlab Yayın Dağıtım ve Eğitim Hizmetleri*.
- Özcan, M. 2019. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Çapraz Eleman Kullanımının Tasarıma Etkisinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya.
- Rahnavard, R., Fard, F. F. Z., Hosseini, A., & Suleiman, M. (2018). Nonlinear analysis on progressive collapse of tall steel composite buildings. *Case studies in construction materials*, 8, 359-379.
- Ramaswamy, G. S., & Eekhout, M. (2002). Analysis, design and construction of steel space frames. *Thomas Telford*.
- Saraç, Y. 2005. Optimum design of pin-jointed 3-D dome structures using global optimization techniques, Master's thesis, *Middle East Technical University, The Graduate School of Natural And Applied Sciences*, Ankara.
- Soare, M. V., & Răduică, N. (1985). A comparison of the structural efficiency of some braced domes. *International Journal of Space Structures*, 1(3), 137-142.

- Song, B. I., & Sezen, H. (2013). Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building. *Engineering structures*, 56, 664-672.
- Song, B. I., Giriunas, K. A., & Sezen, H. (2014). Progressive collapse testing and analysis of a steel frame building. *Journal of constructional steel research*, 94, 76-83.
- Sophianopoulos, D., Argyriou, A., & Papanikolaou, C. (2011, September). Second Order Plastic Analysis and Design of a Steel Schwedler Dome by means of Special Software. *In Proceedings of the 7th National Conference on Steel Structures* (Ermopoulos I, Mistakidis E, Karamanos S eds.), Volos, Greece (Vol. 1, pp. 482-489).
- Sputo, T., & Ellifritt, D. S. (1991). Collapse of metal building system during erection. *Journal of performance of constructed facilities*, 5(4), 251-257.
- Tian, L. M., He, J. X., Zhang, C. B., & Bai, R. (2021). Progressive collapse resistance of single-layer latticed domes subjected to non-uniform snow loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 176, 106433.
- Tian, L. M., Nie, X. N., Zhong, W. H., & Wei, J. P. (2019). Comparison of the progressive collapse resistances of different single-layer latticed domes. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105697.
- Urfalı, F.K. 2012. Güncel Çelik Yapı Sistemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Vazna, R. V., & Zarrin, M. (2020). Sensitivity analysis of double layer Diamatic dome space structure collapse behavior. *Engineering Structures*, 212, 110511.
- Venkateswarlu, B., & Arumugam, M. (1983). Discussion of "Procedure for Predicting Wind Damage to Buildings" by Kishor C. Mehta, James R. McDonald, and Douglas A. Smith (November, 1981). *Journal of Structural Engineering*, 109(4), 1063-1063.
- Wiltjer, L. (2017). Design and optimisation of a structurally separated roof structure for event venues.
- Yan, S., Zhao, X., Chen, Y., Xu, Z., & Lu, Y. (2018). A new type of truss joint for prevention of progressive collapse. *Engineering Structures*, 167, 203-213.
- Yan, S., Zhao, X., Rasmussen, K. J., & Zhang, H. (2019). Identification of critical members for progressive collapse analysis of single-layer latticed domes. *Engineering Structures*, 188, 111-120.
- Zallen, R. M. (2003). Problems with Industry Standard for Erecting Open Web Steel Joists. *In Forensic Engineering* (2003) (pp. 477-484).
- Zhao, Q., Yu, B., Burdette, E. G., & Hastings, J. S. (2009). Monitoring steel girder stability for safer bridge erection. *Journal of performance of constructed facilities*, 23(6), 391-398.
- Zhao, X., Yan, S., & Chen, Y. (2017). Comparison of progressive collapse resistance of single-layer latticed domes under different loadings. *Journal of Constructional Steel Research*, 129, 204-214.

DİZİN

A

AISC · xiii, 1, 5, 110, 114
 alternatif yük · 32, 33
 Analiz · viii, xi, 36, 65, 66, 67,
 69, 72, 85, 86, 90, 91, 95, 97,
 98, 99, 100, 101, 112
 asimetrik · 45, 47, 48
 aşamalı göçme · 18, 31, 32, 33,
 34, 35, 38, 45, 49, 50, 51, 52,
 53, 54, 103
 Autocad · x, 75, 76

B

basınç · 2, 3, 10, 11, 20, 36, 43,
 45, 54, 72
 Bilirkişi · 72
 bulgular · 48, 49, 99, 106
 Burkulma · 10
 burulma · 10, 20, 21, 40, 63

C

cıvata · 7, 11
 cıvatalı · 8, 16

Ç

çapraz · 6, 10, 11, 12, 15, 16, 21,
 22, 23, 27, 43, 45, 47, 48, 55,
 61, 77
 çatı · iv, 12, 18, 24, 25, 26, 27,
 28, 30, 34, 35, 36, 37, 38, 40,
 67, 74, 76, 80, 81, 88
 çekme · 2, 3, 11, 29, 40, 43, 73
 çelik · iv, x, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9,
 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18,
 19, 21, 22, 23, 24, 28, 29, 30,
 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 44,
 45, 51, 54, 57, 61, 64, 67, 68,
 71, 73, 82, 86, 101, 103, 106,
 109
 ÇYY · xiii, 1, 110

D

deformasyon · xi, 10, 19, 34, 64,
 68, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 97,
 98, 99, 100, 101, 102, 104,
 107
 Deplasman · xi, 104, 106

destekleme · 10, 20, 26
 düğüm · x, 26, 29, 39, 48, 49, 52,
 57, 63, 64, 87

E

ekonomik · 3, 6, 7, 23, 31, 39, 40
 Elastisite · 73
 eleman · x, 3, 8, 10, 21, 25, 32,
 33, 34, 36, 43, 45, 49, 50, 52,
 53, 54, 62, 63, 65, 66, 69, 87,
 100
 Enkaz · x, 84

F

fazlalık · 31, 33

G

Gökkubbe · viii, x, 30, 71, 76, 80,
 113
 güvenli montaj · 17

H

H / D · 49
 halka · 44, 45, 53, 85, 99
 hizalamak · 11

İ

imalat · 5, 6, 7, 9, 11, 13, 39, 41,
 54, 71
 inşa · x, 2, 3, 4, 5, 13, 14, 18, 21,
 36, 37, 39, 40, 45, 54, 55, 60,
 71, 76, 77, 80, 85, 90, 107,
 108, 109
 iş programı · 6
 işçilik · 5, 24

K

Köprüleme · 14
 kritik · 10, 21, 34, 35, 49, 51, 52,
 54, 65, 70, 109
 kubbe · iv, ix, 2, 6, 18, 38, 39, 40,
 41, 42, 43, 45, 47, 48, 49, 50,
 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59,
 60, 61, 71, 74, 77, 90, 95, 98,
 99, 101, 103, 107, 108

kurulum · xi, 7, 8, 9, 11, 12, 81,
 85, 90, 92, 95, 98, 99, 101,
 107

L

labil · 48, 78, 82, 93, 99, 107, 108

M

makaslar · 35, 76, 82
 malzeme · x, 2, 3, 4, 6, 8, 13, 31,
 37, 39, 40, 47, 48, 55, 65, 67,
 68, 69, 72, 73, 101
 mesh · 63, 65, 69, 87
 Mesnet · xi, 105
 montaj · iv, ix, 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9,
 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18,
 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28,
 30, 36, 38, 39, 41, 50, 51, 55,
 56, 57, 61, 62, 71, 76, 77, 80,
 81, 90, 98, 99, 101, 106, 107,
 108, 109
 Montaj prosedürü · 7, 9, 18, 22,
 80, 81, 98, 99, 106, 108, 117,

N

narinlik · 50
 nümerik · 62, 68, 69
 Nümerik · 62

P

plan · iv, v, x, 10, 11, 75
 proje · 36, 59, 71

R

Radyal · ix, 41, 42, 43, 44, 48,
 53, 77
 rijit iskele · 85, 108
 rüzgar · iv, 16, 18, 19, 21, 36, 37,
 38, 60, 101

S

Schwedler · ix, 41, 43, 45, 47, 48,
 49, 52, 77, 90, 108, 111, 116
 serbestlik · 64
 siklonik · 19, 20

sismik · 48, 49, 60, 63, 112
 sonlu elemanlar · 2, 21, 61, 62,
 63, 65, 67, 69, 71, 85, 87, 93,
 106, 107
 stabilite · iv, 1, 10, 15, 28, 29, 36,
 37, 43, 45, 50, 53, 66, 67, 109
 standartlar · iv, 1, 6

Ş

şartnameler · iv, 1, 6

T

Tek katmanlı · 52
 tekil kuvvet · xi, 101, 102, 104

U

Uzay · ix, 39, 40, 41, 48, 115

V

vaka · 19, 22, 36, 37, 38, 106
 vinç kapasitesi · 13

Y

yapı · iv, x, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,
 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19,
 20, 21, 25, 26, 27, 28, 30, 31,
 32, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41,
 43, 44, 45, 50, 51, 53, 54, 55,

59, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 68,
 71, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 85,
 86, 87, 88, 90, 93, 95, 98, 99,
 100, 101, 106, 107, 109
 yapım · iv, 1, 2, 3, 4, 18, 20, 21,
 22, 23, 25, 27, 28, 31, 38, 51,
 108
 yasal · 1, 31

Z

zayıf · 26, 34, 81, 85, 91, 105



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

