

**RASTGELE DAĞITILMIŞ ELEMAN BAŞLANGIÇ
EĞRİLİK KUSURLARININ DÜZLEMSEL ÇİFT KATLI
UZAY KAFES SİSTEMLERİN YÜK TAŞIMA
KAPASİTELERİNE ETKİSİ
Mojibullah NOORİ**



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RASTGELE DAĞITILMIŞ ELEMAN BAŞLANGIÇ EĞRİLİK
KUSURLARININ DÜZLEMSEL ÇİFT KATLI UZAY KAFES SİSTEMLERİN
YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNE ETKİSİ**

Mojibullah NOORİ
ORCID: 0000-0003-2824

Doç. Dr. Hakan T. TÜRKER
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

Mojibullah NOORİ tarafından hazırlanan “RASTGELE DAĞITILMIŞ ELEMEN BAŞLANGIÇ EĞRİLİK KUSURLARININ DÜZLEMSEL ÇİFT KATLI UZAY KAFES SİSTEMLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNE ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hakan T. TÜRKER
(ORCID: 0000-0001-5820-0257)

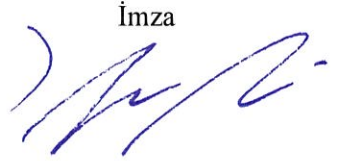
Başkan : Doç. Dr. Hakan T. TÜRKER
(ORCID: 0000-0001-5820-0257)
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Üye : Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ
(ORCID: 0000-0002-4035-4642)
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Üye : Dr. Öğ. Üye. Hasan Sesli
(ORCID: 0000-0003-3328-5922)
Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza


Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

..../.....


U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06/02/2020

Mojobullah NOORİ



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

RASTGELE DAĞITILMIŞ ELEMAN BAŞLANGIÇ EĞRİLİK KUSURLARININ DÜZLEMSEL ÇİFT KATLI UZAY KAFES SİSTEMLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNE ETKİSİ

Mojibullah NOORİ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan T. TÜRKER

Bu çalışmanın amacı, düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerde (DÇKUKS), yaygın geometrik kusurlardan biri olan başlangıç eğrilik kusurunun taşıyıcı sistemin yük taşıma kapasitesine etkisini incelemektir. Eğrilik kusurunu incelemek için, ideal (eğrilik kusuru olmayan) elemanlardan oluşan DÇKUKS'ler, tasarım yükleri altında boyutlandırılmıştır. Sonra bu modellerdeki elemanlara eğrilik verilerek, statik itme analizleri yapılarak yük taşıma kapasiteleri, performansları belirlenmiştir. DÇKUKS elemanlarındaki başlangıç eğrilik kusurlarının sağdan çarpık olasılık dağılımına sahip olduğu kabul edilerek gelişigüzel dağıtılmıştır. Yapı modellerinin performans analizleri için genel amaçlı sonlu elemanlar analiz programı olan Abaqus programı kullanılmıştır. Analizlerde doğrusal olmayan malzeme davranışı ve ikinci merteye etkileri dikkate alınmıştır. Eğrilik kusurunun yapı üzerindeki olasılıksal etkilerini irdelemek için yapı modelinin geometrik özellikleri değiştirilmeden elemanlara her defasında farklı büyüklükte kusur atanarak modeller çözülmüştür. Abaqus modellemesi için Mathematica'da bir program hazırlanmıştır. Bu program verilen geometrik özellikleri, yükleme durumunu, Başlangıç eğrilik kusurunu belirlenen olasılık eğrilik dağılımına (standart sapma, ortalama, eğri tipi, maksimum eğrilik vb.), eleman parça sayısı gibi verilen özellikleri dikkate alarak istenilen sayıda Abaqus input dosyası oluşturmaktadır. Her input dosyasında elemanların kusur büyüklükleri farklı oluşturulmaktadır. Başlangıç eğrilik kusurlarının, farklı mesnetlenme durumları ve modül sayılarında DÇKUKS nin performansına etkisi çalışılmıştır.

Düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerde, başlangıç eğrilik kusurlarının sistemlerin yük taşıma kapasitesine önemli ölçüde etkisinin olduğu görülmüştür. Bu etkinin kusur dağılımı ile değişkenlik gösterdiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uzay Kafes Sistemler, Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemler, Başlangıç Geometrik Kusurları, Eleman Eğrilik Kusuru, ABAQUS
2020, x + 101 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

EFFECTS OF RANDOMLY DISTRIBUTED MEMBER INITIAL GEOMETRIC IMPERFECTION ON LOAD BEARING CAPACITY OF FLAT DOUBLE-LAYER GRID SPACE STRUCTURES

Mojibullah NOORİ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan T. TÜRKER

The purpose of this study is to investigate the effects of member initial curvature imperfection, which is a well-known geometric imperfection type on load bearing capacity of the flat double layer grid space structures. To study the effects of initial geometric imperfection, the structure models consisting of ideal (non-curvilinear) elements were dimensioned under the design loads. Then, the load carrying capacities and performances of the models were determined by assigning initial curvature to the elements and applying push down static analysis. The member initial curvature imperfections were distributed randomly, assuming that they have a negative skewed probability distribution. The ABAQUS general-purpose finite element analysis program was used for performance analysis of structure models. Nonlinear material behavior and second order effects were taken into consideration in the analysis. A program has been prepared in Mathematica for Abaqus modeling. This program creates the desired number of Abaqus input files, taking into account the given geometric properties, loading conditions, initial curvature imperfection, the specified probability curvature distribution (standard deviation, average, curve type, maximum curvature, etc.), and the number of mesh's. In each input file, imperfection sizes of the elements are created randomly. The effects of initial curvature imperfection on the performance of double-layer grid space structures considering different support conditions and number of modules has been obtained.

The results show that the randomly distributed member initial curvature geometric imperfection has significant effects on the load bearing capacity and collapse behavior of the flat double layer grid space structures.

Key words: Space Structures, Flat Double Layer Grid Systems, Initial Imperfections, Element Curvature Imperfections, ABAQUS
2020, x + 101 pages.

TEŞEKKÜR

Elhamdulillah, bu tezin tamamlanmasını nasib eden Rabime hamd ediyorum. Yüksek lisans eğitimin süresinde, çalışmalarına bilgisi, tecrübesi ve desteğiyle yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Hakan T. TÜRKER, tez aşamasında yardımlarını esirgemeyen Mustafa TEMŞİ ve Nurten TOPALOğLU'na teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca uygun çalışma koşulları sağlayan İnşaat Mühendisliği Yapı Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Âdem DOğANGÜN'e, her zaman çalışmalarımı destekleyen Enis ARAS Abime, Waheed RASEKH, Sultan Husein BAYQRA, Mojib LATİFİ, Muslim NOORİ arkadaşlarıma ve Rafiullah NOORİ kardeşime teşekkürlerimi sunarım.

Sadece öğrenim sürecim boyunca değil tüm hayatım boyunca ilgilerini ve bana her zaman her türlü maddi ve manevi desteğine esirgemeyen ve her zaman yanımda olan değerli aileme özellikle annem ve babama teşekkür ederim.

Mojibullah NOORİ
27/01/2020

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Uzaysal Yapı Sistemler ve Tarihçesi.....	1
1.2. Uzaysal Yapı Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları.....	2
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	3
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	6
2.1. Uzaysal Yapı Sistemler.....	6
2.2. Uzaysal Yapı Sistemlerin Yapısal Geometrisine Göre Sınıflandırılması.....	8
2.3. Uzay Kafes Sistemler.....	11
2.4. Uzay Kafes Sistemlerin Çeşitleri.....	12
2.4.1. Paternlerine Göre Izgara Sistemlerin Sınıflandırılması.....	12
2.4.2. Tek, Çift ve Üç Katlı Uzay Kafes Sistemler.....	13
2.5. Çift Katlı Uzay Kafes Sistemler.....	14
2.5.1. Çubuk- Düğüm Sistemler.....	15
2.5.2. Modüler Sistemler.....	16
2.6. Eleman Kusurları.....	17
2.6.1. Artık Gerilmeler.....	18
2.6.2. Başlangıç Eğrilik Kusuru.....	18
2.6.3. Eleman Boy (Uzunluk/Kısalık) Kusuru.....	19
2.6.4. Çeliğin Mekanik Özellikleri.....	19
2.6.5. Düğüm Noktası Dönmesi.....	19
2.6.6. Yükleme Dış Merkezliliği.....	20
2.7. Kolonların Elastik Burkulmasının Teorik Analiz Metotları.....	20
2.7.1. Kusursuz Elemanın Elastik Burkulma Analizi.....	20
2.7.2. Kusurlu Elemanın Elastik Burkulma Analizi.....	21
2.8. Kolonların İnelastik Burkulma Analizi.....	23
2.9. Kaynak Araştırması.....	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1. Abaqus Programı.....	29
3.2. ABAQUS Programında Yapısal Modelleme.....	31
3.3. Abaqus'ta Çerçeve Modellerin Oluşturmasıyla İlgili Genel Konular.....	32
3.3.1. Enkesit Seçimi ve Özellikleri.....	32
3.3.2. Eleman Parça Sayısı (Mesh Sayısı).....	34
3.3.3. Eleman Tipleri ve Genel ABAQUS varsayımları.....	35
3.3.4. Malzeme Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi Modeli.....	36
3.3.5. Kuvvet Kontrolü ve Deplasman Kontrollü.....	37
3.3.6. Doğrusal Geometri ve Doğrusal Olmayan Geometri Analizleri.....	38
3.4. Burkulma Sonrası (Post-Buckling Analysis) Analizi için Abaqus Uygulaması.....	38
3.4.1. Genel Statik Analiz.....	39
3.4.2. Stabilizasyon ile Statik Analiz.....	39
3.4.3. Riks Statik Analizi.....	40

3.4.4. Yarı-Statik Analiz (Quasi – Static Analysis)	41
3.4.5. Kapalı (Implicit) Dinamik Analiz	41
3.4.6. Açık (Explicit) Dinamik Analiz	42
3.4.7. Abaqus'ta Burkulma Sonrası Analiz Metotlarının Değerlendirilmesi.....	42
3.5. Abaqus'ta Eleman Başlangıç Geometrik Kusurların Modellenmesi	44
3.5.1. Fiktif Yükün Uygulanması.....	45
3.5.2. “İmperfection” Komutunun Uygulanması	45
3.5.3. Doğrudan Kusurlu Geometri Modellenmesi	46
3.6. Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin Analitik Modellerinin Hazırlanması	47
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	60
4.1. Abaqus'ta Basit Bir Çubuk Elemanın Burkulma Analizi	60
4.1.1. Eleman Parça Sayısı (Mesh Sayısı).....	61
4.1.2. Merkezi Eksenel Basınç Yükü Altında Elastik Kolonların Analizi.....	63
4.1.3. Merkezi Eksenel Basınç Yükü Altında Inelastik Kolonların Analizi	64
4.1.4. Merkezi Eksenel Basınç Etkisi Altında Elemanların Kapasite Eğrisi	69
4.1.5. Elemanlarda Başlangıç Eğrilik Kusurların İncelenmesi	74
4.2. Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Analizleri	77
4.2.1. Mesnetlenme Koşullarının Etkisi.....	78
4.2.2. Modül Sayısının Etkisi.....	87
5. SONUÇ.....	96
KAYNAKLAR.	97
ÖZGEÇMİŞ	101

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
δ/Δ	Çubuk elemanın orta noktasındaki deplasman
δ_0	Başlangıç eğrilik değerini gösterir
λ	Narinlik oranı
σ_y	Akma dayanımı
μ	Ortalama değer parametresi

Kısaltmalar	Açıklama
IASS	International Association for Shell and Spatial Structures (Uluslararası Kabuk ve Uzaysal Yapılar Birliği)
ASTM	American Society for Testing Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
AISC	American Institute of Steel Construction (Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü)
YDKT	Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım
HKS	Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.
DÇKUKS	Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemler
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (Değişimi İçin Amerikan Standart Kodlama Sistemi)
PDF	Probability Density Function (Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu)
CHS	Circular Hollow Section (Boşluklu Dairesel Kesit)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Uzay Kafes Sistemler.....	7
Şekil 2.2. Ön Germeli Kabuk / Kaplama Sistemler	7
Şekil 2.3. Kablolü Taşıyıcı Sistemler.....	7
Şekil 2.4. Soldan sağa: Bir yüzeyin negatif Gaussian eğriliği (hiperboloid), yüzeyin sıfır Gaussian eğriliği (silindir) ve yüzeyin pozitif Gaussian eğriliği (küre).....	8
Şekil 2.5. Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemler (Sıfır Gaussian Eğriliği).....	9
Şekil 2.6. Kubbe Tipi Uzay Kafes Sistemler (Pozitif Gaussian Eğriliği)	9
Şekil 2.7. Serbest Formlu Uzay Kafes Sistemler (Negatif Gaussian Eğriliği).....	9
Şekil 2.8. Tensegrity Uzaysal Yapı Sistemi.....	10
Şekil 2.9. Pnömatik Yapılar	11
Şekil 2.10. İki ve çok yönlü çalışan ızgara sistemler; a) İki yönde çalışan b) Üç yönde çalışan c) Dört yönde çalışan ızgara sistemler	13
Şekil 2.11. Tek katlı uzay kafes sistemi	13
Şekil 2.12. Üç Katlı Uzay Kafes Sistemi.	14
Şekil 2.13. Çift Katlı Uzay Kafes Sistemi.....	14
Şekil 2.14. Düzlemsel Çift Katlı Izgara Uzay Kafes Sistemi	15
Şekil 2.15. Çubuk- Düğüm Sistemler; a) ve b) Nodus Sistemi c) Octatube sistemi d) Triodetic Sistemi e) Mero Sistemi	16
Şekil 2.16. Space Deck Sistemi.....	17
Şekil 2.17. Unibat Sistemi.....	17
Şekil 2.18. Başlangıç geometrik eğriliğe sahip bir çubuk elemanı	22
Şekil 2.19. Kusursuz ve Kusurlu Elastik Kolonların Sapma Davranışı (Chung Thi Thu Ho 2010)	23
Şekil 3.1. Abaqus 'ta bir tam simülasyonun aşamaları.....	31
Şekil 3.2. Abaqus'ta Kalın cidarlı boru kesitin integrasyon noktaları (Dassault Systèmes 2013)	33
Şekil 3.3. Kalın cidarlı boru enkesitin farklı integrasyon noktalarındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı; Şekil 3.2'de gösterilen kesitin a) 2 nolu noktası b) 20 nolu noktası c) 8 nolu noktası d) 14 nolu noktası	34
Şekil 3.4. Abaqus programında giriş – kolon eleman tiplerinin isimlendirilmesi	35
Şekil 3.5. Gerilme-Şekil Değiştirme Tipik Modelleri a) Elastik Model b) Elasto-Plastik Model c) Bilineer Modeli d) Çoklu Doğrusal Modeli	36
Şekil 3.6. Abaqus 'ta kusurlu geometri tanımlama yöntemler.....	44
Şekil 3.7. Mesnetlenme koşullarına göre hazırlanan düzlemsel çift katlı uzay kafes sistem modelleri	49
Şekil 3.8. Farklı modül sayısında hazırlanan düzlemsel çift katlı uzay kafes sistem modelleri	50
Şekil 3.9. ABAQUS'ta Düzlemsel Çift Katmanlı Uzay Kafes sistem 3D görünüşleri... 51	51
Şekil 3.10. Çubuk elemanın sola çarpık olasılık dağılımı yoğunluk fonksiyon ($L = 2,5$ m)	53
Şekil 3.11. Oluşturulan ÇKUKS'de Şekil 3.9'de verilen eğrilik kusur dağılımı kullanılarak elemanlarında oluşturulan kusurların Histogramları.....	54
Şekil 3.12. Çalışma kullanılan enkesit tipi.....	56
Şekil 4.1. Çubuk elemanın yükleme ve mesnetlenme koşulları.....	61
Şekil 4.2. Değişken Mesh Sayısına Göre Merkezi Eksenel Basınç Etkisi Altında Çubuk Elemanın Davranışı.....	62

Şekil 4.3. Mesh sayısına göre kolonun burkulma kapasitesi	62
Şekil 4.4. Mesh sayısına göre oluşan hata oranları	63
Şekil 4.5. Başlangıç eğrilik kusurlu inelastik kolonun aksel basınç yükü altındaki kuvvet-deplasman ilişkisi.....	64
Şekil 4.6. Kiriş-kolon tipi elemana q_0 fiktif yükünün uygulanması.....	66
Şekil 4.7. Statik Analiz Verilerinden Yararlanılarak kusur tanımlama metodunun yükleme durumu.....	66
Şekil 4.8. Değişken fiktif yüklü kiriş-kolon elemanın merkezi aksel basınç altındaki davranışı	68
Şekil 4.9. Değişken başlangıç eğrilikli kiriş-kolon elemanın merkezi aksel basınç etkisi altındaki davranışı	68
Şekil 4.10. Fiktif Yükleme ile Başlangıç Eğrilik durumlarının karşılaştırılması.....	69
Şekil 4.11. Çubuk elemanı yükleme tipi ve mesnetlenme koşulları	70
Şekil 4.12. Farklı Narinliğe sahip elemanların doğrusal olmayan burkulma analizi davranışı	71
Şekil 4.13. Abaqus'ta kolon kapasite eğrisi	72
Şekil 4.14. Kolon burkulma kapasitelerinin farklı yöntemler için karşılaştırılmaları.....	74
Şekil 4.15. Model A için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	79
Şekil 4.16. Model A için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	80
Şekil 4.17. Model A'ya ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri	80
Şekil 4.18. Model B için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	81
Şekil 4.19. Model B için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	82
Şekil 4.20. Model B'ye ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri	82
Şekil 4.21. Model C için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	83
Şekil 4.22. Model C için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	84
Şekil 4.23. Model C'ye ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri	84
Şekil 4.24. Model D için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	88
Şekil 4. 25. Model D için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	88
Şekil 4.26. Model D'ye ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri	89
Şekil 4.27. Model E için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	90
Şekil 4.28. Model E için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	90
Şekil 4.29. Model E'ye ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri	91

Şekil 4.30. Model F için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	92
Şekil 4.31. Model F için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı	92
Şekil 4.32. Model F'ye ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Çalışma kapsamında oluşturulan modellerde kullanılan kesitler.....	58
Çizelge 3.2. Çalışma kapsamında oluşturulan modellerin eleman kapasite oranları	59
Çizelge 4.1. Kiriş-kolon elemanın geometrik ve malzeme özellikleri.....	65
Çizelge 4.2. Farklı kusur tanımlama metodların elemanın kapasitesine etkisi	67
Çizelge 4.3. Malzeme ve enkesit geometri özellikleri	70
Çizelge 4. 4. Kusur miktarları ve narinlik oranlarına göre elde edilen burkulma kapasitesi	71
Çizelge 4.5. Farklı narinlik oranlarına göre elde edilmiş kapasite değerleri	73
Çizelge 4.6. Elemanın narinlik oranı 149 iken eksenel basınç kapasitesinin değişkenliği.	75
Çizelge 4.7. Elemanın narinlik oranı 128 iken eksenel basınç kapasitesinin değişkenliği	75
Çizelge 4. 8. Elemanın narinlik oranı 120 iken eksenel basınç kapasitesinin değişkenliği	76
Çizelge 4. 9. Elemanın narinlik oranı 110 iken eksenel basınç kapasitesinin değişkenliği	76
Çizelge 4.10. Kusurlu yapı modellerinin kapasite değerleri	86
Çizelge 4.11. Mesnetlenme durumlarına göre kapasite değerleri ve azalım oranları	87
Çizelge 4.12. Kusurlu yapı modellerinin kapasite değerleri	94
Çizelge 4.13. Modül sayısına göre kapasite değerleri ve azalım oranları.....	95

1. GİRİŞ

1.1. Uzaysal Yapı Sistemler ve Tarihçesi

Uzaysal yapı sistemler doğadan ilham alınan yapısal bir taşıyıcı sistemdir. Doğal formlar veya şekiller yüksek rijitliklere sahiptirler maksimum yapısal avantaj için minimum malzeme kullanırlar. Makowski “*Doğal formlar asgari çaba doğrultusunda hareket eder.*” derken bu konudan bahsetmektedir (Ramaswamy et al. 2002).

Mimarlar ve mühendisler, mesnetsiz geniş alanları geçebilen taşıyıcı sistem problemini çözebilmek için her zaman yeni yollar arayışında olmuşlardır. Modern dünyanın sanayileşmesiyle ve gelişmesiyle, verimli ve uyarlanabilir büyük açıklıklı yapıların talebinde de büyük artışlar görülmüştür. Uzaysal yapı sistemleri, geniş çeşitlikleri ve esneklikleri nedeniyle yeni form arayışındaki mimarlar ve mühendisler için değerli bir araç olmuştur (Bossuyt ve ark. 2018).

Alexander Graham Bell, 1898-1908 yıllarda yaptığı uçurtmalarda kullanmak için dörtyüzlü moleküller geometriye (Tetrahedral) dayanan uzay kafes sistem geliştirmiştir. Bell'in amacı havacılık mühendisliğinde kullanmak için hafif, rijit ve sağlam sistemler oluşturmaktır. Böylece, tetrahedral kafes icatlarından biri oldu (Bell 1903).

Tarihsel olarak inşa edilecek en eski uzaysal yapılar, 19'uncu yüzyılda Alman mühendisler Schwedler ve Zimmermann tarafından öncülük edilen kubbelerdir. Zimmermann, 1894'te Lyons'da inşa edilecek bir sergi yapısı için 110m'ik bir açıklık elde etmiştir. İkinci dünya savaşından hemen sonra kuzey Carolina, Amerika'daki Charlotte şehrinde 'Civic Center' üzerinde inşa edilen Schevedler tipi kubbesi 101m açıklığa sahiptir. Aslında bunlar o zamanlar için olağanüstü başarılarıdır. Bu erken deneyler, Dr. Mengeringhausen'nin uzay kafes sistemlerine olan ilgiyi yeniden canlandırdığı 1937'ye kadar unutulmuştur. Dr. Mengeringhausen uzay kafes sistemlerin geniş ölçekte uygulanabilmesi için sistemin ancak fabrika üretimi ve sahada montaj yoluyla mümkün olabileceğini fark etmiştir. Bu iki hedefe ulaşmak için çeşitliliği azaltmak ve kolay montaj araçları geliştirmek gerekiyordu. İdeal olarak, bir uzay kafes sistemi, yaklaşık aynı uzunluktaki elemanlardan oluşmaktadır. Ancak

her ne kadar pratikte aynı boyutta eleman kullanımı teşvik edilse de birkaç farklı boyutta eleman kullanımı zorunlu olabilmektedir. Dr. Mengerlinghausenin öncülük ettiği topolojik çalışmaları ile eleman çeşitliliğin azaltılmasını hedeflemiş ve Mero sistemi (düğüm noktası ve eleman birleşimi) icadı ile kolay montaj problemini zarif bir şekilde çözmüştür. Bu gelişmelerle Mengerlinghausen, 1942 yılında uzay kafes sisteminin başarılı bir şekilde ticarileştirmesini başarmıştır. Evrensel Mero düğüm elemanı (küre), yüzeyi üzerinde dağıtılan delikler ile farklı açılarda 18 kadar elemanı kabul edebilir. Taşımacılık açısından bireysel bileşenler yönetilebilir boyutta ve ağırlıkta olmasından hiçbir sorun oluşturmamıştır. Uzay kafes sistemler nispeten vasıfsız işçilik kullanarak uzak yerlerde bile inşa edilmektedir. Mengerlinghausen'nin çalışması tüm dünyada benzer gelişmeleri tetiklemiştir. Takip eden yıllar, tescilli sistemlerin çoğalmasına tanık olmuştur. Octatube, Nodus, Unistrut, Unibat, Space Deck ve Triodetic ve bunların çeşitleri, bu dönemde dünyanın farklı bölgelerinde geliştirilen sistemler arasındadırlar (Makowski 2002).

1.2. Uzaysal Yapı Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları

Uzaysal yapı sistemlerinin geniş çaptaki popülaritesi, bu yapıların aşağıdaki avantajlarından kaynaklanmaktadır;

- 1) Hafiftir, yapısal olarak verimli ve optimum malzeme kullanılır.
- 2) Nitelikli / Vasıflı işçi sınıfındaki eksiklik ve maliyetlerinin yüksek olması, prefabrike ve sanayileşmiş yapı biçimlerinin benimsenmesini desteklemiştir. Uzaysal yapı sistemleri fabrikalarda standart boyutlarda ve şekillerde seri olarak üretilen elemanlar ve birleşimlerden oluşmalarından dolayı, sahada kolay ve hızlı bir şekilde çok kalifiye olmayan işçilerle de kolaylıkla ve hızlı bir şekilde montaj edilebilmektedir. Bu nedenle bu tür yapılar mühendisler ve mimarlar tarafından giderek daha fazla tavsiye edilmektedir.
- 3) Bileşenlerin küçük boyutları nedeniyle taşıma işlemleri yürütmek ve bu yapıları kurmak geleneksel inşaat metotları ile kolay bir şekilde mümkün olmaktadır. Bu sayede inşaat süresinde tasarruf sağlanmaktadır (fabrikada üretildikleri için hızlı üretim teknikleriyle üretilebiliyor, sahaya taşınabiliyor ve kolayca kurulabiliyor).

- 4) Uzaysal yapı sistemlerinin ađ yapısından dolayı bu sistemler hafiftir. Örneğin, 40m çaplı bir metal kubbenin birim yüzey alanı için kendiliğinden gelen ağırlık, aynı çaptaki beton kubbenin ağırlığından 15 mertebe daha hafiftir. Bu ağırlık kaybı, hiçbir rijitlik kaybı yaşanmadan elde edilen bir avantajdır.
- 5) Bileşenlerin küçük boyutları nedeniyle taşıma işlemleri yürütmek ve bu yapıları kurmak geleneksel inşaat metotları ile kolay bir şekilde mümkün olmaktadır. Bu sayede inşaat süresinde tasarruf sağlanmaktadır (fabrikada üretildikleri için hızlı üretim teknikleriyle üretilebiliyor, sahaya taşınabiliyor ve kolayca kurulabiliyor).
- 6) Uzaysal yapı sistemlerin sahip oldukları geometri, mimarlara ve mühendislere farklı şekillerde, mimari açıdan hoş görünümlü ve çok cazip yapılar yapma imkânı sunmaktadır.
- 7) Belirli açıklık/derinlik oranı için büyük bir rijitliğe sahiptirler.
- 8) Kolonların yerleşimi ve konumlandırılmasında daha fazla esnekliğe sahiptirler. Bazı kolonların kaldırılması veya yapısal bütünlüğüne zarar vermeden pozisyonlarının değişmesi mümkündür.
- 9) Çok katlı uzay kafes sistemlerde tavan elemanların içinden elektrik, su, mekanik tesisatları, klima kanalları geçirilebilmektedir.
- 10) Uzaysal yapı sistemleri büyük rijitliklere sahip olduklarından sehimler oldukça azdır. (Makowski 2002, Subramanian 1999)

Uzaysal yapı sistemleri, avantajlarının yanında aynı zamanda birkaç dezavantaja sahiptir; Uzay kafes sistemleri imalat ve montaj aşamalarında oluşabilecek küçük kusurlara karşı çok hassas sistemlerdir. Bu kusurlar yapının yük taşıma performansını olumsuz şekilde etkilemektedir.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Uzay kafes sistemler, yüzlerce veya binlerce bileşenlerin üç boyutlu formunda bir araya getirilmesiyle oluşturulan sistemler olarak bilinmektedir. Sistemin elemanlarının üretilmesi ve montaj edilmesi sırasında doğal olarak oluşun hatalar, sistemin kusursuz olmasını engel olmaktadır. Kusurlar, üretim hataları olabildiği gibi insan kaynaklı hatalar da olabilmektedir. Örneğin; eleman boylarının olması gerekenden daha kısa veya daha uzun olması, düğüm

noktalarında eleman açılarındaki sapmalar, artık gerilmeler ve eleman eğrilikleri olarak sayılabilir. Kusurlardan dolayı elemanlarda oluşan iç gerilmeler uzay kafes sistemlerinin yük taşıma kapasitesini önemli oranda etkilediğini göstermiştir.

Bu çalışmanın amacı, eleman başlangıç eğrilik kusurunun düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerinin (DÇKUKS) yük taşıma kapasitesine etkisini incelemektir. DÇKUKS elemanlarında oluşan başlangıç eğrilik kusurları, imalat hataları, montaj hataları, nakliye, depolama biçimi ve sıcaklık değişimi gibi sebeplerden oluşabilmektedir. Bu tip kusurun herhangi bir elemanda olma durumu ve büyüklüğü rastlantısaldır. Dolayısıyla, eleman başlangıç eğrilik kusuru dikkate alınırken kusurların büyüklüğü ve dağılımı rastgele ve gelişigüzel olması sağlanmaktadır. Bu çalışmada modül sayısı ve mesnetlenme koşulları gibi parametreler dikkate alınarak uzay kafes sistemlerinde eleman başlangıç eğrilik kusurlarının etkileri araştırılmıştır.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1’de genel tanıtımın takibinde sistemin tarihi süreci, mimari kullanımı, yapı sisteminin avantajları ve dezavantajları ile ilgili genel bilgilendirme yapılmıştır. Bu bölümün sonunda çalışmanın amacı ve çalışmanın amacına uygun bir şekilde bölümler özetlenmiştir.

Bölüm 2’de kuramsal temeller kapsamında çalışmanın temel kavramlarından bahsedilmiştir. Uzay kafes sistemlerin genel ve özel tanımları yapılmıştır. Uzay kafes sistemlerinin çeşitlilikleri ve sınıflandırması bu bölümde incelenmiştir. Kusurların tanımlanmasına ve tiplerine ve olası oluşum kaynaklarına değinilmiştir. Çalışmaya ait kaynak araştırması bu bölümde yer almıştır.

Bölüm 3’te çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerden bahsedilmektedir. Abaqus paket programı hakkında ve doğrusal olmayan statik analizlerin kabiliyetleri ile ilgili özet bir şekilde incelemelerde bulunulmuştur. Çift katlı uzay kafes sistemlerin modellerinin tasarım kriterleri ve yapılan kabullerin açıklamaları bu bölümde yer almaktadır. Bu sistemlerin modellenmesi, eleman başlangıç eğrilik kusurlarının rastgele bir şekilde oluşturulması ve modellerin elemanları arasında gelişigüzel atanmaları için paket programı kullanılarak

geliştirilmiş yazılımın özelliklerine ayrıca değinilmiştir. Analizlerde kullanılan programlar, analiz metodunun özellikleri ve kullanım sınır durumları izah edilmiştir.

Bölüm 4'te bir önceki bölümde yer alan materyal ve metotları kullanarak yapılan analizlerin sonuçlarından bahsedilmektedir. Elde edilen grafiklerden, eleman başlangıç eğrilik kusurunun çift katlı ızgara uzay kafes sistemleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi bu bölümde yer almaktadır.

Bölüm 5'te çalışma sonucu elde edilen bilgilere dayanarak oluşan tartışma konuları ve edinen sonuçlarından bahsedilmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan parametrelerin sisteme olan etkisi, avantajları ve dezavantajları bu bölümde yer almıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bölüm 1’de işaret edildiği gibi, bu çalışmanın odak noktası çift katlı uzay kafes sistemlerin başlangıç eğrilik kusuruna olan hassasiyetlerinin incelenmesidir. Bu bölümde uzaysal yapı sistemlerinin mekanizması, tipleri ve sınıflandırmaları ile ilgili kısa bir açıklama yapılmıştır. Ardından çift katlı uzay kafes sistemlerde elemanların geometrik kusur hassasiyetleri ve yapıların çökme davranışlarına etkileri hakkında daha önce yapılan çalışmalar ve tartışmalardan kısaca bahsedilmiştir.

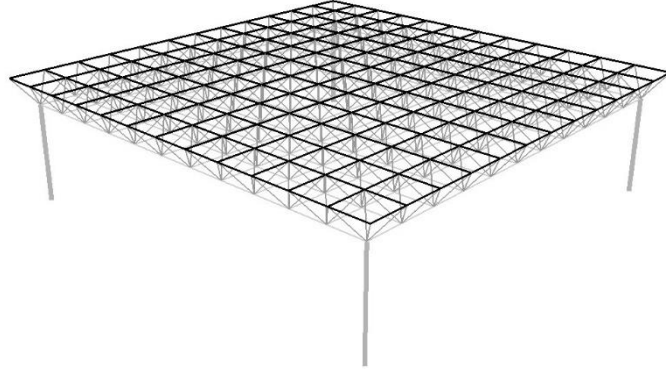
2.1. Uzaysal Yapı Sistemler

Endüstriyel teknolojik gelişmelerin çağdaş mimari üzerinde önemli etkileri olmuştur. Son yıllarda yeni yapım teknikleri, malzemeler ve yapısal formlar farklı geometrilerdeki yapıların inşasına imkân vermiştir. Uzaysal yapı sistemleri, geleneksel sistemlerden çok daha başarılı yapıların inşa edilebilmesine olanak tanımaktadır. Bu sistemler, elemanların üç boyutlu formda bir araya getirilmesiyle oluşan, herhangi bir noktada yapı yüzeyine herhangi bir açıyla eğimli ve herhangi bir yönde uygulanan kuvvetlere karşı direnç gösteren yapı sistemlerdir. Elemanlar sıcak haddelenmiş profillerden veya fabrikada imal edilmiş soğuk şekil verilmiş kesitlerden oluşabilmektedir (Subramanian 1999).

Uzaysal yapı sistemleri farklı yönleri dikkate alınarak farklı sınıflandırmalar yapmak mümkündür. Yük taşıma sistemi, yük altında davranışları ve kullanılan yapı elemanları dikkate alınarak üç genel kategoriye ayırmak mümkündür;

- I. Uzay Kafes Sistemler (Şekil 2.1)
- II. Ön Germeli Kabuk/Kaplama Sistemler (Şekil 2.2)
- III. Kablolü Taşıyıcı Sistemler (Şekil 2.3)

Yukarıdaki üç kategori arasından uzay kafes sistemler daha yaygın kullanılmaktadır. Bu tip sistemlere katmanlı uzay kafes sistemler, katmanlı ızgara sistemler gibi isimlendirmeler verilmektedir.



Şekil 2.1. Uzay Kafes Sistemler



University of Illinois State Form Center (Anonim 2019)

Şekil 2.2. Ön Germeli Kabuk / Kaplama Sistemler



Münih olimpiyat tesisleri (Anonim 2015)

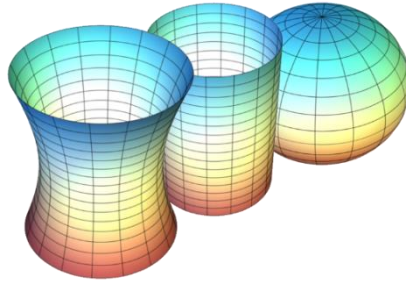
Şekil 2.3. Kablolı Taşıyıcı Sistemler

2.2. Uzaysal Yapı Sistemlerin Yapısal Geometrisine Göre Sınıflandırılması

Uzaysal yapı sistemlerinin her bir elemanının bağlantı biçimi ve yüzeylerinin genel şekli, mimari görünümünü büyük ölçüde etkileyebilir. Bu yapıların geometrisinde, sayısız olası kombinasyon ve çeşitlilik bulunduğundan, birçok benzersiz yapı inşa edilebilir. Pratiklik ve ekonomiklik kazanmak için bu yapıların çoğu düzenli geometrik formlara sahiptirler ve belirli kategorilere ayrılabilirler (Subramanian 1999):

- a) Pozitif Gauss Eğriliği (Ör. Kubbe), (Şekil 2.5)
- b) Negatif Gauss Eğriliği (Ör. Hiperbolik), (Şekil 26)
- c) Sıfır Gauss Eğriliği (Ör. Izgaralar), (Şekil 2.7)

Bu sınıflandırmaya göre tonoz tipi uzay kafes sistemleri tek eğrilikli ve sıfır gauss eğriliğine, kubbeler ise çift eğrilikli ve pozitif gauss eğriliğine sahip Uzay Kafes Sistemlerdir. Gaussian eğrilikli yüzeylerin örnekleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir (Subramanian 1999).



Şekil 2.4. Soldan sağa: Bir yüzeyin negatif Gaussian eğriliği (hiperboloid), yüzeyin sıfır Gaussian eğriliği (silindir) ve yüzeyin pozitif Gaussian eğriliği (küre).



Şekil 2.5. Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemler (Sıfır Gaussian Eğriliği)



Şekil 2.6. Kubbe Tipi Uzay Kafes Sistemler (Pozitif Gaussian Eğriliği)



Şekil 2.7. Serbest Formlu Uzay Kafes Sistemler (Negatif Gaussian Eğriliği)

Buckminster Fuller'in tensegrity yapıları, yeni tip bir uzaysal yapı sistemi olarak ortaya çıkmıştır. Bu sistemlerde sürekli gergi elemanlarının ve süreksiz basınç elemanlarının kullanılması olasılığı, optimum malzemenin kullanılmasına yol açar. Böylece, bu tür yapılar araştırmacılar ile yapı mühendislerinin dikkatini çekmiştir. Bu konudaki araştırmalar halen devam etmektedir (Subramanian 1999). Şekil 2.8'de tensegrity uzaysal yapı sistemi gösterilmiştir



La Plata Şehrindeki Stadyum (Arjun 2019)

Şekil 2.8. Tensegrity Uzaysal Yapı Sistemi

Lanchester tarafından 1917 yılında, pnömötik (Şişme) yapıların icadı ile uzaysal yapı sistemleri alanında yeni bir alan açılmıştır (Şekil 2.9). Bu tür yapılar, uzaysal yapı sistemlerinin tanımına girmeyecek olsa da birçok kişi tarafından uzaysal yapı sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte, kablolu Pnömötik yapılar, genel tanıma uyduğu için uzaysal yapı sistemleri olarak sınıflandırılabilir (Subramanian 1999).



Askeri Radar İstasyonu (Anonim 2010)

Şekil 2.9. Pnömatik Yapılar

2.3. Uzay Kafes Sistemler

IASS (EN: International Association for Shell and Spatial Structures) tarafından 1984 yılında yayınlanan raporuna göre, uzay kafes sistemler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır: “*Bir uzay kafes sistemi kuvvetlerin üç boyutlu bir şekilde aktarıldığı, doğrusal elemanlardan oluşan bir yapısal sistemdir. Bazı durumlarda sistemi oluşturan elemanlar iki boyutlu olabilirler. Mikroskobik olarak, uzay kafes sistemler genellikle düzlemsel veya eğrisel formdadır.*” veya başka bir deyişle uzay kafes sistemler, düzlemsel kirişlerin üçüncü boyuta taşınmış şeklidir (Makowski 2002, Subramanian 1999).

Uzay kafes sistemlerin kullanım alanları oldukça geniştir. Bu sistemlerin en çok kullanıldığı alanlar sanayi tesisleri, uçak hangarları, spor salonları, depolar, fabrikalar, stadyumlar ve opera binaları olarak sıralanabilir. Birbiriyle düğüm noktalarından bağlı çubuk elemanlarından kurulu düzenler olan uzay kafes sistemler, tek veya çok katlı,

düzlem veya eğrisel yüzeyler şeklinde oluşturulabilirler. Bu sistemlerin geçilebileceği açıklıklar 20m- 120m arasında değişmektedir.

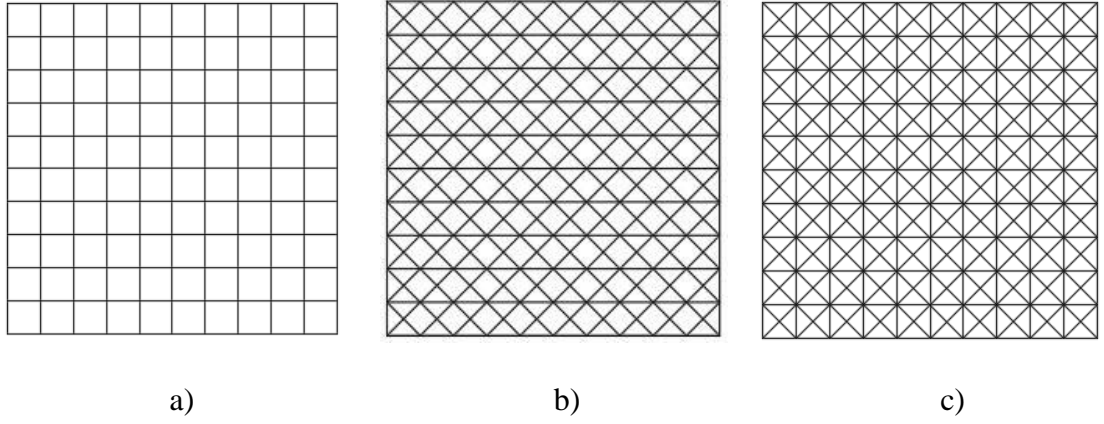
Bu sistemler farklı birimlerin (Modül) bir araya gelmesiyle oluşur. Bu birimler bazen küp, dodekahedron, ikosahedron, ikosidodekahedron, tetrahedron ve piramitler şeklindedir. Temel birimlerin özellikleri yüz sayısı, kenar sayısı ve köşe sayısına göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin; dodekahedron, üç boyutlu bir form olarak 12 yüzü, 30 kenarı ve 20 köşesi varken, ikosahedron üçgen şeklinde olup 20 yüzü, 30 kenarı ve 12 köşesi vardır.

2.4. Uzay Kafes Sistemlerin Çeşitleri

Uzay kafes sistemler, en yaygın kullanılan uzaysal yapı sistemleridir. Bu yapı sistemlerine ait farklı sınıflandırmalar mevcut olabilir. Burada, çalıştığı yön sayısı ve oluşturduğu tabaka sayısına göre kategorilere ayrılmıştır.

2.4.1. Izgara Sistemlerin Paternlerine Göre Sınıflandırılması

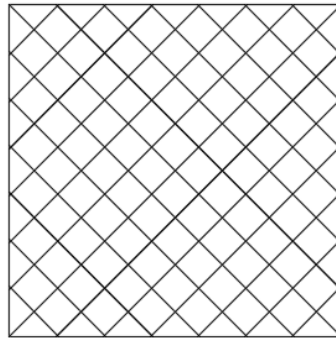
Uzay kafes sistemler ızgara tipi yapılardır. Bu ızgara yapıları farklı paternlerde olabilmektedir. Uzay kafes sistemler, düğüm noktalarında kesişen elemanların iki, üç veya dört yönde çalışıyor olmalarına bağlı olarak; iki, üç veya dört yönde çalışan sistemler olarak kategorilere ayrılabilir. Şekil 2.10'de iki, üç ve dört yönde çalışan ızgaraların plan görünümleri gösterilmektedir.



Şekil 2.10. İki ve çok yönlü çalışan ızgara sistemler; **a)** İki yönde çalışan **b)** Üç yönde çalışan **c)** Dört yönde çalışan ızgara sistemler

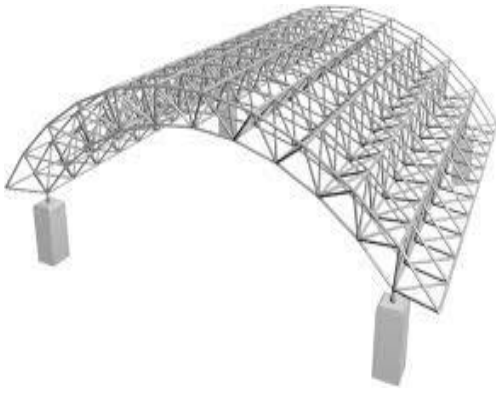
2.4.2. Tek, Çift ve Üç Katlı Uzay Kafes Sistemler

Uzay kafes sistemlerin ilk uygulamaları tek katlı uzay kafes sistemler olarak kullanılmıştır. Daha sonra geniş açıklıkların geçilebilmesi için bir araya getirilen ızgaraların birbiriyle rijit bir şekilde birleştirilmesiyle çift katlı sistemler geliştirilmiştir. Izgara yapısının en önemli özelliği yükün çok yönlü aktarılmasıdır. Tek katlı uzay kafes sistemlerde rijit birleşim uygulanırken çift katlı uzay kafes sistemler mafsallı birleşimli olabilirler (Subramanian 1999). Ayrıca, tek katlı uzay kafes sistemler tek veya çift eğrilikli olmak zorundadır. Örneğin, tonoz veya kubbe tipi yapılar. Fakat açıklık çok küçük olduğunda Şekil 2.11’de gösterildiği gibi düzlemsel tek katlı uzay kafes sistemler kullanılabilir (Makowski 2002).

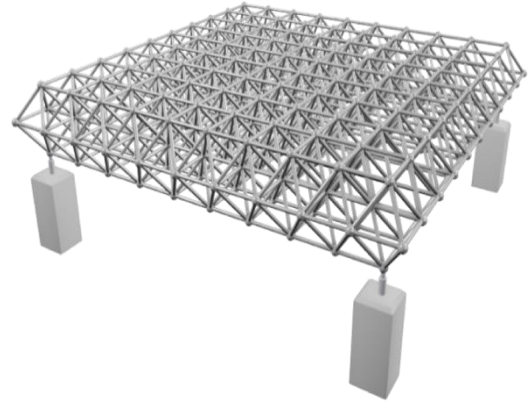


Şekil 2.11. Tek katlı uzay kafes sistemi

Çift katlı uzay kafes sistemler bugüne kadar en yaygın olarak kullanılan uzay kafes sistemleridir (Şekil 2.12). Bu sistemlerin yapısal derinliği açıklığı ile artar. Böylece, çok geniş açıklıklar için diyagonal çapraz elemanların uzunluğu da artmaktadır. Daha geniş açıklıklar için üç katlı uzay kafes sistemler uygun çözüm olabilmektedir (Şekil 2.13). Nötr bir yüzeyde bulunan orta tabaka, çok az yapısal fonksiyona sahiptir veya hiç işlev göstermez. Ancak, çapraz elemanların uzunluğunu azaltır ve bu şekilde daha hafif kesitler kullanılabilir. Bunların yanı sıra, özel durumlarda çok katlı uzay kafes sistemler kullanılabilir.



Şekil 2.13. Çift Katlı Uzay Kafes



Şekil 2.12. Üç Katlı Uzay Kafes

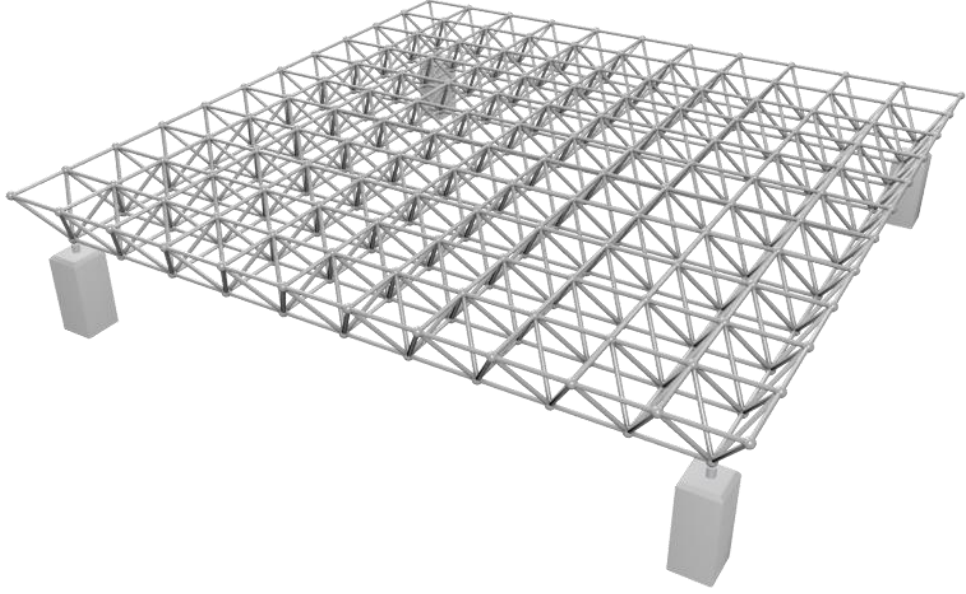
2.5. Çift Katlı Uzay Kafes Sistemler

Uzay kafes sistemlerin gelişmelerini inceleyen bir araştırmanın sonucu, çift katlı uzay kafes sistemlerin diğer sistemlere göre olağanüstü ilerleme ve gelişme gösterdiğine işaret etmektedir. Bu sistemler, çatı yapımında sıklıkla kullanıldığı için özel bir öneme sahiptir. Çeşitli ülkelerde çok katlı binaların çatı inşasında başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Subramanian 1999).

Bu sistemler, birbirine paralel üst ve alt olarak iki düzlemsel ızgara tabakasından ve bunları bağlayan çapraz elemanlardan oluşmaktadır. Çift katlı uzay kafes sistemlerin alt ve üst yatay eleman kümeleri aynı veya farklı dikey düzlemlerde oluşturulabilirler. Bu sistemleri oluşturan her bir alt yatay eleman kümesi, üstteki yatay elemanların altında

aynı dikey düzlemde olabildiği gibi, farklı dikey düzlemlerde de olabilirler. Şekil 2.14’de düzlemsel çift katlı uzay kafesin modeli gösterilmiştir.

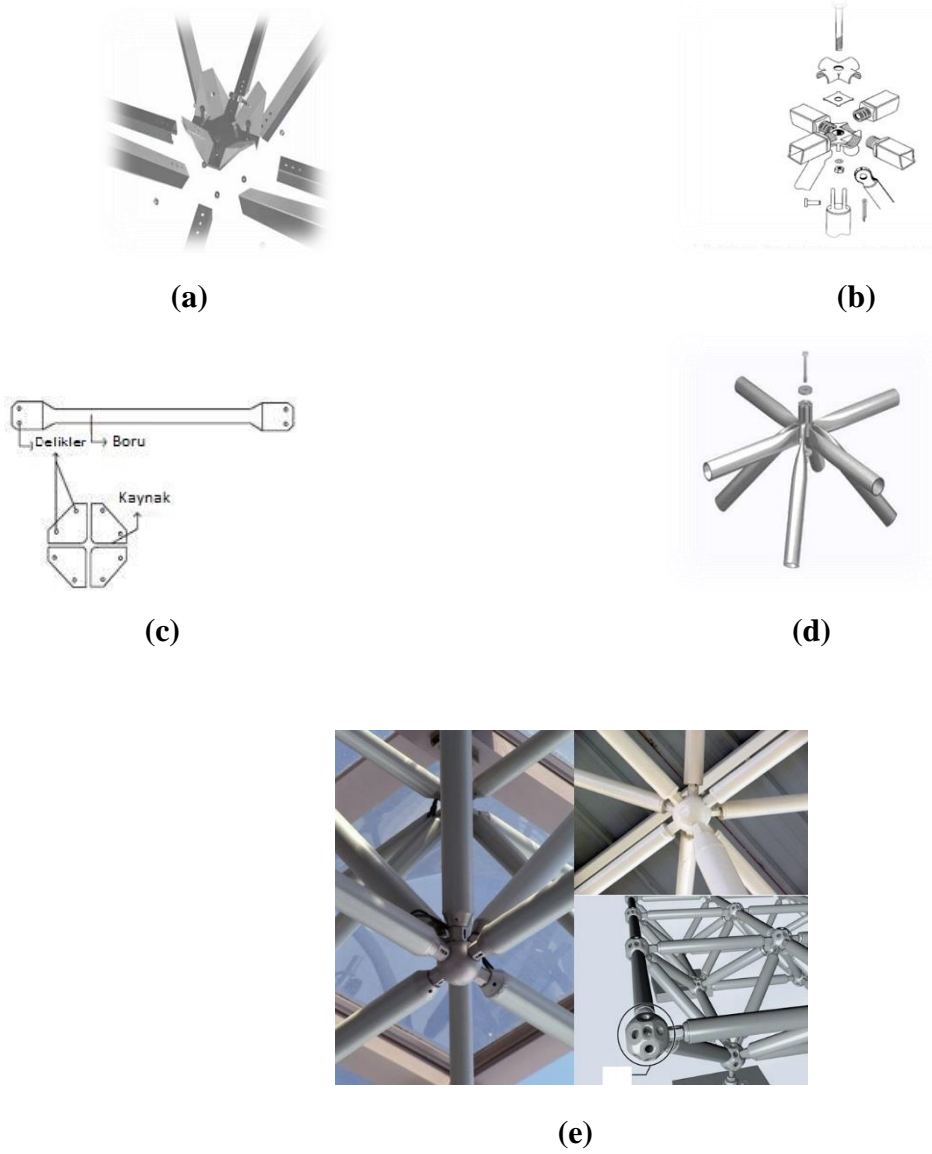
Piyasada çeşitli tiplerde çift katlı uzay kafes sistemler mevcuttur ve bunların popülerliği her geçen yıl artmaktadır. Bu sistemler genel olarak Nodüler (Çubuk- Düğüm Sistemler) ve Modüler olarak sınıflandırılabilir (Subramanian 1999).



Şekil 2.14. Düzlemsel Çift Katlı Izgara Uzay Kafes Sistemi

2.5.1. Çubuk- Düğüm Sistemler

Çubuk-düğüm sistemler, standart küçük parçalar, mafsallar veya bileşenlerden oluşmaktadır. Başka bir deyişle, çubuk- düğüm sistemler, çubuk elemanları ve düğüm noktası bileşenlerinden oluşan sistemlerdir. Şekil 2.15’de çubuk-düğüm sistemlerin en yaygın tipleri Mero sistemi, Triodetic sistemi, Unistrut sistemi, Octatube sistemi, Tuball sistemi ve Nodus Sistemi gösterilmiştir (Subramanian 1999).

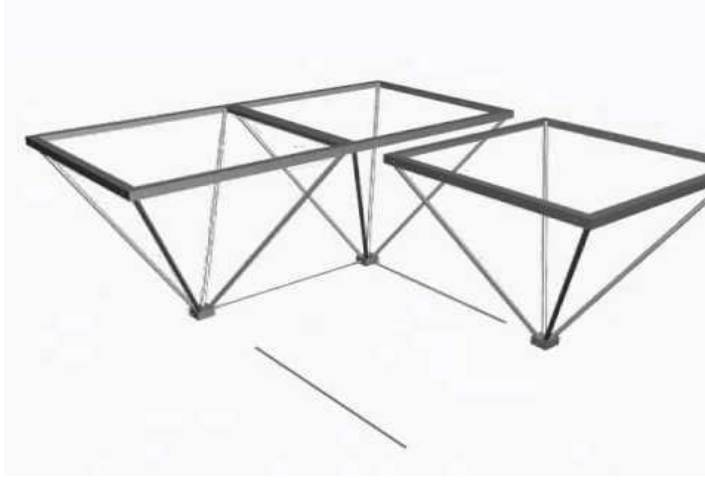


Şekil 2.15. Çubuk- Düğüm Sistemler; **a) ve b)** Nodus Sistemi **c)** Octatube sistemi **d)** Triodetic Sistemi **e)** Mero Sistemi

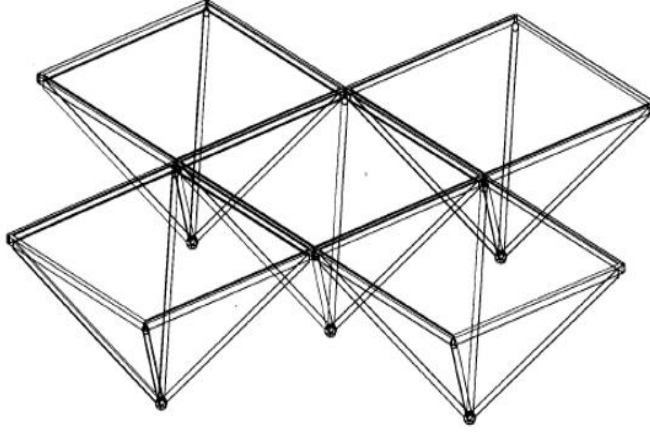
2.5.2. Modüler Sistemler

Modüler sistemler, çeşitli tiplerde ve şekillerde (piramit veya altıgen) prefabrik modüller şeklinde üretilmektedir. Sahada bir araya getirilen modüller, bulonlar yardımıyla birleştirilmektedir. Yani, bu sistemlerde elemanlar yerine prefabrik modüller vardır. Modüler sistemlerin en yaygın kullanılan tipleri, Space Deck Sistemi ve Unibat

Sistemidir (Makowski 2002, Subramanian 1999). Şekil 2.16 ve 2.17’de bu yapı sistemleri ile ilgili şekiller gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Space Deck Sistemi



Şekil 2.17. Unibat Sistemi

2.6. Eleman Kusurları

Pratikte hem eğilme hem de basınca maruz kalan çubuk elemanların davranışı; artık gerilmeler, başlangıç eğriliği, yükün dış merkezliliği ve mesnetlenme koşullarından dolayı kusursuz bir Euler kolonunun davranışından farklıdır. Uzay kafes sistemleri,

yüzlerce elemanın bir araya gelmesiyle oluşan sistemler olduğundan, kapasite ve davranışlarının başlangıç kusurlarına olan hassasiyeti yüksektir. Yapı modellerinde, eleman başlangıç kusurları aşağıda tanımlandığı gibi farklı şekillerde oluşmaktadırlar.

2.6.1. Artık Gerilmeler

Artık gerilmeler, sıcak haddelenmiş ve kaynaklı kesitlerde, ısıtma ve soğutma işlemleri sırasında sıcaklığın düzensizce dağılmasından oluşan plastik gerilmelerden kaynaklanır. Artık gerilmeler elemanlarda kritik burkulma yükünün azalmasına neden olur. Artık gerilmelerin dağılımı ve büyüklüğü, büyük oranda enkesitlere ve soğutma aşamalarına bağlıdır (Mwakali, 1990). Herhangi bir elemanın enkesitindeki artık gerilmelerin büyüklüğünün, basınç veya çekme gerilmesi, normal dağılımlı olasılık kurallarına göre rastgele değiştiği varsayılır (Tall ve Alpsten, 1969).

2.6.2. Başlangıç Eğrilik Kusuru

Birçok standarta göre yapısal elemanların ve plakaların belirli bir geometrik düzgünlüğe sahip olması gerekir (ASTM 1971). Yapısal eleman olarak kullanılacak elemanların standartlarca kabul edilebilir başlangıç kusurlarının altında olması gerekmektedir. Bu nedenle başlangıç eğriliğinin belirli bir değerden daha düşük olması gerekir. Yapılan ölçümlerin çubuk elemanlarda başlangıç eğriliğinin, sola çarpık olasılık dağılımı (Gamma dağılımı, Gumbel dağılımı) gösterdiğini belirlenmiştir ve gerçek ölçümler bunun böyle olduğunu kanıtlamaktadır (Tomonaga 1971). Eleman başlangıç eğriliği, çubuk eleman uzunluğunun bir oranı olarak ifade edilebilir. AISC'nin basınç elemanı kritik burkulma gerilmesi-narinlik eğrisi geliştirilmesinde kullanılan ortalama başlangıç eğrilik değeri $L/1500$ 'dür (AISC 2005b, Galambos 1998, Salmon ve ark. 2010). Diğer bazı standartlar kullanılan eleman başlangıç eğrilik değeri $L/1000$ olarak kabul etmektedir (Chung Thi Thu Ho 2010). Bunlar gözle fark edilmeyecek kadar küçük sapmalardır. Bundan daha büyük kusur değerlerin yüzde 2,5 olasılıkla olabileceği varsayılmaktadır (Wai-fah chen 2007).

2.6.3. Eleman Boy (Uzunluk/Kısalık) Kusuru

Eleman uzunluklarında oluşan boy kusurları (olması gerekenden daha uzun veya daha kısa olması durumu) manuel kesimlerde insan kaynaklı, CNC kesimlerinde cihazın tolerans hassasiyetinden ve/veya sıcaklık değişimi gibi nedenlerden dolayı oluşabilmektedir (Türker 2004). Pratikte geometrik kusurlardan uzak bir uzay kafes sistem inşa etmek mümkün değildir (Karpov ve ark. , El-Sheikh 1997). Tasarımcının tasarım sırasında bu kusurların etkisini dikkate alması yapı güvenliğini sağlamak adına önemlidir. Bu kusur tipi doğal bir şekilde oluştuğundan yapı elemanları arasında rastgele dağılım göstermektedir. Bu kusur tipinin bir yapı sisteminin elemanları arasındaki dağılımının, kaynaklarda kesin bir cevaba varılmadığı halde uzay kafes sistemlerin elemanlarındaki eleman boy (uzunluk/kısalık) kusuru çalışmalarında normal dağılımlı olasılık fonksiyonunu takip ettiği kabul edilmiştir.

2.6.4. Çeliğin Mekanik Özellikleri

Çelik için varsayılan doğrusal elasto-plastik gerilme-deformasyon ilişkisi temelde iki faktörü içermektedir: akma gerilmesi (σ_y), ve elastisite modülü (E). Elastisite modülünün sabit olduğu varsayılarak akma gerilmesinin olasılıksal değişkenliğini bulmak için yaklaşık 60000 çekme deneyi gerçekleştirilmiştir (Alpsten, 1972). Bu deneylerden edinen verilere dayanarak yapılan analizler sonucunda Gumble dağılımının kullanılması durumunda oldukça iyi bir korelasyonun elde edilebileceği bulunmuştur (Wai-fah chen 2007).

2.6.5. Düğüm Noktası Dönmesi

Uzay kafes sistem elemanlarının bağlandığı düğüm noktalarında fabrikasyon hatalarından kaynaklanan veya imalat esnasında yapılan yanlış uygulamalardan dolayı meydana gelen düğüm noktası kusurları sistem performansını olumsuz ölçüde etkileyebilmektedir. Örneğin; Mero sistemin düğüm noktalarında elemanların bağlandığı deliklerin koordinatlarının kayması bir düğüm noktası kusurudur. Düğüm noktası koordinatlarının değişmesi elemanlarda ek kuvvetler oluşturmaktadır. Bu sorunun uzay kafes sistemin

performansını olumsuz yönde etkilememesi için imalat ve montaj sırasında oldukça dikkat edilmelidir.

2.6.6. Yükleme Dış Merkezliliği

Yükleme ve mesnetlenme eksantrikliğinin basınç elemanlarının burkulma davranışı üzerindeki etkileri, başlangıç eğrilik kusuruna benzerdir. Yükleme eksantrikliğinin etkisi, sonuç olarak her iki uçta keskin bir şekilde sıfırlanan başlangıç eğriligi olarak ifade edilebilir (Adams ve Zingoni 2013, Galambos ve Surovek 2008).

2.7. Kolonların Elastik Burkulma Analiz Metotları

Bu kısımda, kolonların elastik burkulma analizi için klasik çözümler kısaca gözden geçirilmiştir. Bu çözümler, Timoshenko ve Gere (1961), Gerard (1962), Galambos (1998) ve Chen ve Lui (1987) tarafından literatürde yaygın olarak bildirilmektedir (Chung Thi Thu Ho 2010). Mevcut çözümler arasında, başlangıçta tamamen kusursuz olan kolonlar ve başlangıçta geometrik kusurlu olan kolonlar bulunur. Ayrıca, yer değiştirme ve eğrilik arasındaki doğrusal veya doğrusal olmayan kinematik ilişkiler kullanılarak çözümler geliştirilebilir.

2.7.1. Kusursuz Elemanın Elastik Burkulma Analizi

Kolon burkulma teorisi, 1744 yılında Leonhard Euler ile ortaya çıkmıştır. Euler denklemi, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında narin (uzun) kolonlar için tutarlıdır, ancak kısa kolonlar için tutarlı değildir. Ön kusuru olmayıp sadece aksenal yük etkisindeki bir basınç elemanı için, kolonun dışarıya doğru eğilmeye başladığı teorik yüke “elastik kritik burkulma yükü” veya “Euler kritik burkulma yükü” denir. Artık gerilmesi ve ön kusuru olmayan tamamen düz basit mesnetli bir kolon için Euler burkulma yükü aşağıda verilmiştir (Vigil ve O. Aghayere 2018):

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{kL^2} \quad (2.1)$$

Burada;

- P_e Elastik burkulma yükü
 E Elastisite modülü
 I Atalet momenti
 L Kolonun boyu
 k Kolon burkulma boyu katsayısı (burada basit mesnetli kolon için $k=1$)

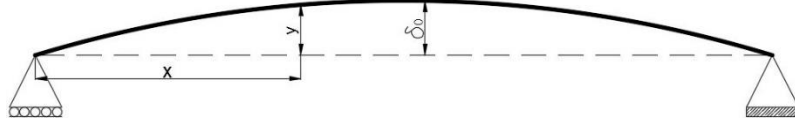
Bu denklem, aksenal bir yüke maruz kaldığında kolonun şekil değiştirmiş halindeki denge denklemini dikkate alınarak elde edilir. Yük P_e 'den küçük olduğunda, kolon tamamen kusursuz kalır. Yük P_e 'ye ulaştığında, kolon kararsız hale gelir ve ek bir yük olmadan ani deplasman yapar. Kusursuz düz bir eleman için yük-deplasman ilişkisi, P_e yükünde bir çatallanma noktasına sahiptir (Gerard 1962).

2.7.2. Kusurlu Elemanın Elastik Burkulma Analizi

Kusurlu elemanlar için ilk burkulma analizi kolonlar için yapılmıştır. Gerçekte, kolonlar tam olarak kusursuz değildirler ve her zaman başlangıç geometri kusurlarına sahiptirler. Başlangıç eğrilikli kolonlar için çözümler, Timoshenko (1961) ve Gerard (1962) gibi isimler tarafından literatürde geniş bir şekilde açıklanmıştır (Chung Thi Thu Ho 2010). Bir kolonun başlangıç eğrilik kusuru yarım sinüs dalgası formunda ise aşağıdaki gibi bir denklem yazılabilir:

$$y = \delta_0 \sin \frac{\pi x}{L} \quad (2.2)$$

Bu denklemde, y istenen noktadaki başlangıç kusur değerini, δ_0 çubuk elemanı orta noktasındaki başlangıç eğrilik kusur değerini, L çubuk elemanın boyunu, x ise çubuk başlangıç noktası ile eğrilik değeri aranan nokta arasındaki mesafeyi belirtmektedir (Şekil 2.17).



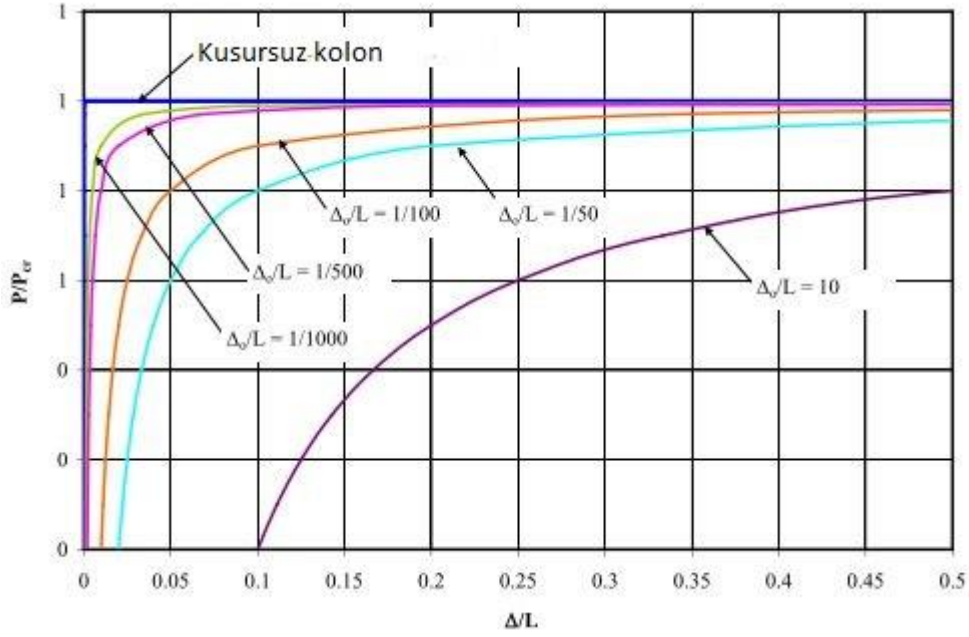
Şekil 2.18. Başlangıç geometrik eğrilğe sahip bir çubuk elemanı

Bir çubuk elemanı δ_0 gibi bir başlangıç eğrilik kusuruna sahip ise, uygulanan P yükü altında çubuk elemanın orta noktasındaki deplasman (δ) büyüklüğü aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$\delta = \frac{\delta_0}{1 - \frac{P}{P_e}} \quad (2.3)$$

Burada, P uygulanan yükü, P_e eleman elastik burkulma yükünü ve δ_0 başlangıç eğrilik değerini göstermektedir.

Kusursuz düz kolonlarda yük-deplasman grafiğinde bir çatallanma noktası oluşur. Öte yandan, başlangıç kusurları olan kolonların grafiği, bir çatallanma noktası göstermez. Aynı zamanda oldukça küçük başlangıç kusurları olan kolonların yük-deplasman grafiği, tamamen düz kolonların grafiğine benzerlik gösterir. Büyük kusurlu kolonlarda, yük arttıkça deplasman daha kademeli bir artış sergiler (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Kusursuz ve Kusurlu Elastik Kolonların Sapma Davranışı (Chung Thi Thu Ho 2010)

2.8. Kolonların Inelastik Burkulma Analizi

Burada elastik olmayan burkulma davranışı gösteren kolonlardan kısaca bahsedilecektir. Pratikte kullanılan kolon inelastik burkulma davranışları; Rankine, Tangent Modulus, Secant Modulus ve Perry-Robertson formülleri ile tanımlanmakta ve literatürde geniş ölçüde tartışılmaktadır (Adams ve Zingoni 2013). Tangent modülü kavramı yükün çatallanma sırasında değişmediğini ve rijitlik gerilme-deformasyon eğrisinin tangent modülünün (E_t) bir fonksiyonu olduğunu varsaymaktadır. Bu teori, elastik olmayan burkulma yükünün alt sınırını oluşturmaktadır (Galambos ve Surovek 2008).

2.9. Kaynak Araştırması

Uzay kafes sistemler sağladığı rijitlik, hafiflik ve montaj kolaylığı gibi avantajlar sayesinde yaygın kullanılan sistemlerdir. Düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemler; uzay kafes sistemlerin bir alt kümesi şeklinde dünya çapında en çok inşa edilmiş ve hızla gelişmekte olan sistemler olarak bilinmektedir. Ancak, bu sistemlerin davranışları, oluşmaları kaçınılmaz olan çeşitli belirsizliklere (değişkenlere) bağlıdır. Bu belirsizlikler

çeşitli küçük kusurların oluşmasına neden olabilirler. Dolayısıyla, küçük kusurların oluşması, çift katlı uzay kafes sistemlerinde kaçınılmaz bir olay olarak değerlendirilmektedir.

ÇKUKS, içsel hiperstatiklik derecesi yüksek olan sistemlerdir. Affan (1987) tarafından yapılan daha önceki çalışmalarda; uzay kafes sistemlerin stabilitesini etkilemeden çıkarılabilecek fazladan çubuk eleman sayısının, toplam çubuk eleman sayısının %15'i ile %25'ini oluşturduğu tahmin edilmiştir. Böylece, çift katlı uzay kafes sistemlerin içsel hiperstatiklik derecelerinin yüksek olması, tasarımcılar tarafından bu tip yapı sistemlerinin güvenilirliğinin de yüksek olduğu gibi bir yanlış yargıya varılmıştır (Affan 1987, Affan ve ark. 1989). Şöyle ki; herhangi bir nedenden dolayı bir elemanın kapasitesine ulaşmasının ardından yüklerin diğer elemanlara aktarılma sureti ile yapı güvenliğinin sağlanacağı düşünülmektedir (Martin ve ark. 2001, Türker 2004). Ancak, 1978'de Amerika'nın "Connecticut" eyaletinde çift katlı uzay kafes Sistemi ile inşa edilmiş "Hartford" kapalı spor salonunun çatısının (Coliseum Space Roof Truss) çökmesi, içsel hiperstatiklik dereceleri yüksek olan bu tip sistemlerin güvenilirliklerinin sorgulanmasına neden olmuştur (Martin ve ark. 2001, Smith ve Epstein 1980). Uzay kafes sistemlerinin içi hiperstatiklik derecelerinin yüksek olmasından dolayı, herhangi bir elemanı kapasitesini doldursa dahi diğer elemanlara yük aktarılması ile yapının ayakta kalacağı düşünülmektedir. Ancak, yaşanan bu tip çatı çökmeleri ve yapılan araştırmalar bu tip sistemlerin eleman küçük kusurlarına ve bunun sonucu olarak zincirleme çöküşe karşı hassas olduklarını göstermektedir. (Schmidt ve ark. 1980, Türker 2015).

Uzay kafes sistemlerde çubuk elemanların akması, sistemde rijitlik kaybına neden olur ama sistem yük taşımaya devam eder. Ancak, olası bir basınç çubuk elemanın burkulması daha kritik bir durumdur. Çünkü burkulma olayı elemanın dayanımında ani düşüğe neden olur. Böylece, kuvvet taşıyamayan burkulmuş elemanın yükünü komşu elemanlar taşımaya zorlanırken burkulurlar. Devam eden burkulma zinciri, yapının yük taşıma kapasitesini ani ve kararsız bir şekilde düşürürken yapıda zincirleme çöküş olayının oluşumunu tetikleyebilmektedir (Schmidte1980,1982). Bu durum, bir uzay kafes

sistemde elemanların burkulma kapasitesini etkileyen parametrelerin, bu sistemler için hayati anlam taşıdığını gösterir.

Elemanların burkulma dayanımını etkileyen başlıca faktörlerden biri başlangıç geometrik kusurlarıdır. Çok sayıda elemandan oluşan bu sistemlerde bütün elemanların hassas ve kusursuz üretimi neredeyse imkânsızdır ve küçük kusurlu elemanların olması son derece doğaldır. Eleman başlangıç eğrilik ve eleman boy kusuru (uzunluk/kısalık) gibi uzay kafes sistemlerdeki küçük kusurlar elemanlarda rastgele oluşur. Kusurların bir olasılık eğrisine uygun olarak rastgele dağılması, yapının gerçekte ve pratikteki dayanımını tahmin etmek için uygun bir yöntem bulmaya olanak sağlar.

Rastgele dağılım gösteren geometrik küçük kusurlar; uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasiteleri, güç tükenme mekanizmaları veya çökme davranışları üzerinde son derece etkilidir. Ancak, uzay kafes sistemlerde geometrik kusurların mevcut olması her zaman yük taşıma kapasitesinin düşmesi veya güç tükenme durumlarına neden olmayabilir. Özel durumlarda bilinçli bir şekilde eleman kısalık boy kusurunun uygulanması bu yapıların yük taşıma kapasitelerini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Örneğin, ideal boylarından daha küçük bir kısalık geometrik kusuruna sahip olan elemanların, basınç elemanlarının arasına dağıtılması, bu elemanlar arasında bir çekme gerilmesinin oluşmasına neden olur. Bu durum, elemanın yük taşıma kapasitesini ve dolayısıyla yapının yük taşıma kapasitesini arttıran bir ön gerilme durumunu meydana getirir (Sheidai ve Gordini 2015).

Uzay kafes sistemler pek çok araştırmanın konusu olmuştur. Wada ve Wang (1992), elemanların dayanımlarının rastgele değişkenliği ve montaj hatalarının çift katlı uzay kafes sistemlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Montaj hataları gibi, imalat hatalarının da bu yapıların yük taşıma kapasitelerinde çok büyük etkisi olduğunu göstermişlerdir. El-Sheikh (1991,1995,1997,2002) kusurlu elemanların uzay kafes sistemler üzerindeki kapasite ve davranış etkileri ile birlikte kusurlu elemanların bulunması kritik olan bölgelerin belirlenmesini araştırmıştır. El-Sheikh (1997), üç katlı uzay kafes sistemlerde eleman boy kusurların (uzunluk/kısalık) yük taşıma kapasitelerine ve güç tükenme mekanizmalarına etkilerini incelemiştir. Geometrik kusurların tek katlı

tonoz tipi uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitelerinde ve güç tükenme mekanizmalarında azalmaya neden olduğunu göstermiştir (El-Sheikh 2002).

Türker (2004), eleman boylarındaki küçük kusurların (olması gereken ideal uzunluklarından daha uzun veya daha kısa olmaları) uzay kafes sistemlerin güvenliğine etkisini irdelemiştir. Bu amaçla, uzay kafes sistemlerin elemanlarının boylarındaki kusurları dikkate alarak üç boyutlu lineer çözüm yapan bir bilgisayar programı yazılmıştır. Hazırlanan program verilen eleman boyundaki kusur uzunluğu (Δl) ve kusurlu eleman sayısını dikkate alarak kusur atanacak elemanları geliş güzel belirlemekte ve verilen kusuru bu elemanlara uygulayarak yapının analizini gerçekleştirmektedir. Kafes elemanlarının boylarındaki küçük kusurların yapı güvenliğini önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir.

Zhou ve ark. (2009), ön gerilmeli uzay kafes sistemlerde eleman başlangıç eğriliklerinin stabilite analizlerine olan etkisini araştırmıştır. Elemanın başlangıç eğriliğinin, ön gerilmeli kablo destekli kemer tipi uzay kafes yapılarının, çeşitli ön gerilme değerleri altında, doğrusal olmayan stabilite performanslarına etkisini incelenmiştir. Eleman başlangıç eğriliğinin, burkulmadan önce yapının genel rijitliği üzerinde çok az etkisi olduğunu, ancak burkulma sonrası yapının performansı ve yük taşıma kapasitesi üzerinde büyük etkisi olduğunu göstermiştir.

Yadollahi ve ark. (2011), başlangıç eğrilik geometrik kusurlarının çift katlı tonoz tipi uzay kafes yapılarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu sistemlerde kusurların monoton ve rastgele dağıtılması suretinde yapı modellerinin kapasite değişimleri incelenmiştir. Kusurların yapı başlangıç rijitliği üzerinde önemli oranda değer bir etkisi olmadığını tespit etmiştir. Ancak, bu tür ölçümlerin en önemli etkisinin sistemin maksimum taşıma kapasitesini düşürdüğünü göstermiştir.

Zhao ve ark. (2014), rastgele dağıtılmış geometrik kusurların çaprazlarla desteklenmiş çerçeveler üzerindeki etkilerini araştırmış ve bu kusurların tasarım kuvvetleri üzerinde

önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Monte Carlo Simülasyon metodunu kullanılarak yapı modelinin çapraz elemanlarındaki kuvvetler olasılık dağılımlarını hesaplanmıştır.

Sheidai ve Gordini (2015), eleman boy kusurlarının (uzunluk/kısalık) rastgele dağılımının düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasiteleri ve çökme davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, elemanlarda gelişigüzel boy (uzunluk/kısalık) kusurlarının oluşturulması için normal dağılımlı olasılık fonksiyonu kullanılmıştır. Monte Carlo Simülasyon metodundan yararlanarak farklı mesnet koşulları için yapıların güvenilirliğini hesaplamış ve eleman boy (uzunluk/kısalık) kusurlarının mevcut olmasının, bu yapıların yük taşıma kapasitelerinde çok büyük etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Cüneyt Vatansever (2016), uzay kafes çatı sistemlerin artan düşey yükler altında doğrusal olmayan davranışını, elemanların başlangıç kusurları ve narinlik oranlarını dikkate alarak incelemiştir. Çubuk elemanların davranış modelleri, başlangıç eğrilik kusuru dikkate alınarak birleşim elemanlarıyla birlikte modellenen her bir çubuk elemanın, tersinir çevrimsel eksenel yükler altında malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Çatı sistemlerinin doğrusal olmayan analiz sonuçları göçme sınır durumunda burkulan çubukların belirleyici olması halinde yapı sisteminde herhangi bir süneklik davranış gözlenmeksizin ani olarak göçtüğünü göstermiştir. Ayrıca başlangıç kusuru miktarının sistemin göçme şeklini etkilemediği, ancak kusur miktarındaki artışın sistemin taşıma kapasitesinde azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Tahamouli Roudsari ve ark. (2017), eleman başlangıç eğrilik geometrik ve eleman boy (uzunluk/kısalık) kusurlarının olasılıksal dağılımının, farklı mesnet koşullarına sahip çift katlı tonoz tipi uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmışlardır. Bu amaçla, eleman başlangıç eğrilik ve boy (uzunluk/kısalık) kusurlarının oluşturulmasında sırasıyla Gamma ve Normal dağılımlı olasılık fonksiyonları kullanılarak, kusurlar rastgele ve gelişigüzel bir şekilde atanmıştır. Daha sonra, OpenSees programında doğrusal olmayan sonlu elemanlar analiz metodu

kullanılarak yapının nihai taşıma kapasiteleri ve çökme davranışları incelenmiştir. Geometrik kusurları göz önünde bulundurularak bu tür yapıların güvenilirlik diyagram ve tabloları oluşturulmuş, bunları yapısal tasarımlara uygulayarak bir yapının tasarım yükünün istenen güvenlikte kolayca belirlenebileceği gösterilmiştir.

Gordini ve ark. (2018), çift katlı uzay kafes sistemlerde eleman başlangıç eğrilik geometrik kusurunun dikkate alınmasıyla, Monte-Carlo Simülasyon metodunu kullanarak uzaysal yapılarının güvenilirlik analizini yapmıştır. Bu amaçla, Gamma dağılımına sahip eleman başlangıç eğrilik geometrik kusuru, yapı elemanlarına rastgele atanmıştır. Yapıların çökme davranışı ve yapının nihai kapasitesi doğrusal olmayan analiz metodu kullanılarak belirlenmiş ve bu prosedür Monte-Carlo Simülasyonu ile tekrarlanmıştır. Modül sayılarındaki artışın, başlangıç eğrilik kusurunun çift katlı uzay kafes sistemlerinde yük taşıma kapasitesinin etkisini azalttığını bulmuştur. Bu durum, daha kısa uzunluklarda ve daha fazla eleman kullanılmasının düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin güvenilirliğini arttırdığını göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında rastgele dağıtılmış eleman başlangıç eğrilik kusurlarının etkileri mesnetlenme koşulları ve modül sayısı parametreleri dikkate alınarak düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesi araştırılmıştır. Başlangıç eğrilik kusurları elemanlar arasında sağdan çarpık olasılık dağılım fonksiyonuna göre uygulanmıştır. Literatürden farklı olarak, Yapı modellerinin tasarımı sabit narinlik oranı ve kapasite oranına göre yapılmıştır. Abaqus sonlu elemanlar paket programı kullanılarak yapı modellerinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre rastgele dağılım gösteren çubuk elemanı başlangıç eğrilik kusuru, düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitelerini önemli oranda etkilediğini gösterilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bölüm 1’de işaret edildiği gibi, bu çalışmanın amacı uzay kafes sistemlerin geometrik kusurlara olan hassasiyetlerinin incelenmesidir. Bu çalışmada yapı modellerinin simülasyonu için genel amaçlı sonlu elemanlar analiz programı olan Abaqus’ten yararlanılmıştır. Analizlerde Abaqus’un 2017 sürümü kullanılmıştır. Çalışmada, Abaqus 6.13, 6.14 ve 2017 sürümlerinin dokümantasyon talimatları takip edilmiştir. Bu bölümde Abaqus programı ve yapısal modellerine kısa bir genel bakış sunulmaktadır. Geometri ve malzemenin doğrusal olmayan davranışlarını dikkate alarak doğrusal olmayan statik analiz yapan metotlardan ve bu çalışmadaki yapı modellerinin analizleri için kullanılan analiz metodundan bahsedilmiştir. Ayrıca eleman başlangıç geometrik kusurlarının modellenmesi ile düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin analitik modellerinin hazırlanması da bu bölümde anlatılmıştır.

3.1. Abaqus Programı

ABAQUS şirketi 1978 yılında Dr. David Hibbitt, Dr. Bengt Karlsson ve Dr. Paul Sorensen tarafından orijinal adıyla “Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.” (HKS) olarak kurulmuştur. Daha sonra, şirketin adı “Abaqus Inc.” şeklinde değiştirilmiştir. Şu anda “Simulia Corp.” tarafından piyasaya sürülen Abaqus programı, genel amaçlı bir simülasyon aracıdır (Dassault Systemes 2010). Bu program ile yapısal analiz ve geometri kusuru sorunları da dâhil olmak üzere çok çeşitli mühendislik problemleri çözülebilmektedir. Abaqus’te çeşitli geometriler modellenebildiği gibi, geniş bir malzeme modeli ve eleman tipi kütüphanesi de mevcuttur. Ayrıca, kullanıcıya yeni bir malzeme modeli veya eleman tipi oluşturabilme olanakları da sağlanmaktadır.

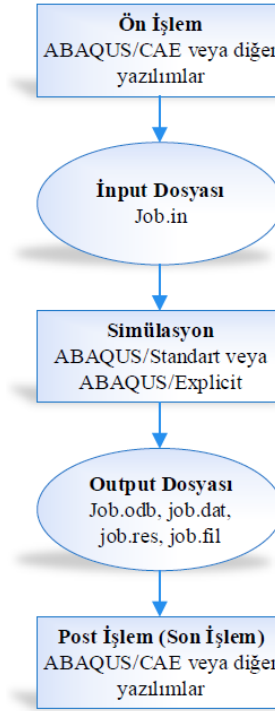
Abaqus, üç ana üründen oluşmaktadır. Bunlar Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit ve Abaqus/CAE’dir. Abaqus/Standard ve Abaqus/Explicit ile yapısal analiz gerçekleştirilebilirken, Abaqus/CAE ile işlem öncesi ve işlem sonrası için bir grafik ortamı sağlanabilmektedir. Abaqus/Standard doğrusal, doğrusal olmayan, statik ve dinamik problemleri çözmek için kullanılan genel amaçlı bir analiz programıdır. Abaqus/Explicit, kapalı (Explicit) bir dinamik sonlu eleman formülasyonu kullanan özel

amaçlı bir analiz programıdır. Darbe ve patlama problemleri gibi kısa, geçici dinamik olayları modellemek için uygundur (Abaqus 2008a). Bu tez kapsamında Abaqus/Standard ve Abaqus/CAE ürünleri, yapısal analiz için kullanılmıştır.

Abaqus'te yapılan bir analiz, anahtar kelime satırlarını (Komutlar) ve veri satırlarını içeren bir girdi dosyası (Input File) ile tanımlanabilmektedir. Abaqus girdi dosyası (Abaqus/Input File) bir ASCII veri dosyasıdır (ABAQUS 2017). ASCII (İngilizce: American Standard Code for Information Interchange, Türkçe: Bilgi Değişimi İçin Amerikan Standart Kodlama Sistemi) Latin alfabesi üzerine kurulu 7 bitlik bir karakter kümesidir. İlk kez 1963 yılında ANSI tarafından standart olarak sunulmuştur.

Abaqus'ün girdi dosyaları (Input Files), bir metin editör dosyası (Abaqus/Input file) olarak veya Abaqus/CAE gibi bir grafiksel ön işlemci kullanılarak oluşturulabilmektedir. "Abaqus/Input" girdi dosyası, komutlar kelimeleri (anahtar kelime satırları) ve verileri (veri satırları) içeren bir dizi satırdan oluşmaktadır.

Genel olarak, eksiksiz bir Abaqus simülasyonu 3 farklı aşamadan oluşmakta: Şekil 3.1'de işlem öncesi, simülasyon sırası ve işlem sonrası aşamaları gösterilmiştir (Abaqus 2013).



Şekil 3.1. Abaqus ‘ta bir tam simülasyonun aşamaları

3.2. ABAQUS Programında Yapısal Modelleme

Abaqus’ta her bir analitik model 10 ana kısmı içerir: Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job, Visualization ve Sketch. Bir tam analiz modeli oluşturmak için, genellikle aşağıda açıklandığı gibi bu esas kısımların çoğundan geçmek gerekir (Chung Thi Thu Ho 2010).

- Yapının geometrisi parçalar (Part) halinde oluşturulur. (Part module, Sketch module, Mesh module)
- Eleman kesit özellikleri tanımlanır. (Property module)
- Malzeme özellikleri tanımlanır. (Property module)
- Elemanlara kesit ve malzeme özellikleri tanımlanır. (Property module)
- Tüm yapıyı oluşturmak için parçalar birleştirilir. (Assembly module, Mesh module, Interaction module)
- Analiz adımları oluşturulur ve analiz tipi seçilir. (Step module)
- Yükleme ve mesnetlenme koşulları tanımlanır. (Load module)

- İş (Job) oluşturulur ve analize gönderilir. (Job module)
- Sonuçlar görselleştirilir. (Visualization module)

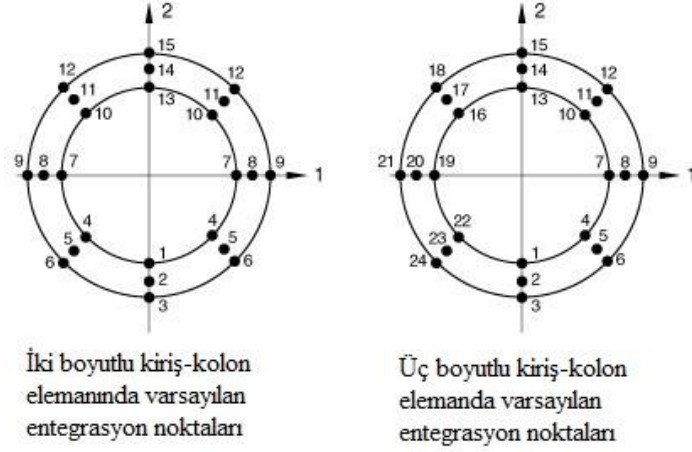
3.3. Abaqus'ta Çerçeve Modellerin Oluşturmasıyla İlgili Genel Konular

Abaqus programında karmaşık yapısal sorunların analizine izin veren birçok seçenek mevcuttur. Ancak bir problemi formüle ederken kullanıcı tarafından göz önünde bulundurulması gereken birçok modelleme sorunu yaşanabilir. Aşağıdaki bölümlerde, bu tez çalışması kapsamında Abaqus'te daha sonraki analizlerde kullanılan; eleman tipi, parça boyutu (Mesh), yükleme tipi, malzeme gerilme-deformasyon eğri modeli, geometrik doğrusal olmayan elemanların davranışı, yük kontrollü ve deplasman kontrollü analizler gibi incelenen konular ve yapılan işlerden bahsedilmektedir.

3.3.1. Enkesit Seçimi ve Özellikleri

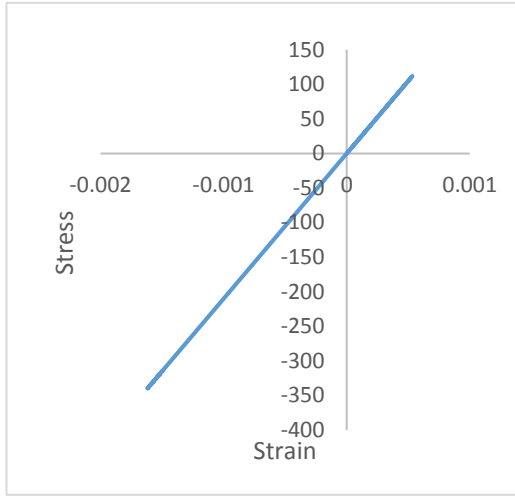
Kiriş-kolon çubuk eleman tipleri için Abaqus'te yeni bir enkesit geometrisi oluşturulabileceği gibi standart enkesitler de mevcuttur. Standart çubuk elemanları için, kullanıcı enkesit geometri bilgilerini girmekte, Abaqus programı alan ve atalet momenti gibi kesitsel özellikleri hesaplamaktadır. Elasto-plastik analizler için Abaqus ayrıca akma momenti, plastik moment, çekmede ve basınçta akma kuvvetlerini de hesaplar.

Bu çalışmada, sonraki bölümlerde açıklanacağı gibi kullanılan eleman tipi, narinlik oranları ve geometri kusurları dikkate alınarak kalın cidarlı boru (Thick-Walled Pipe Section) enkesit tipi olarak seçilmiştir. “kalın cidarlı boru” kesitler, programda tanımlanmış kiriş veya boru tipi elemanlar ile kullanılabilir. Kullanılan enkesitin integrasyon noktaları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

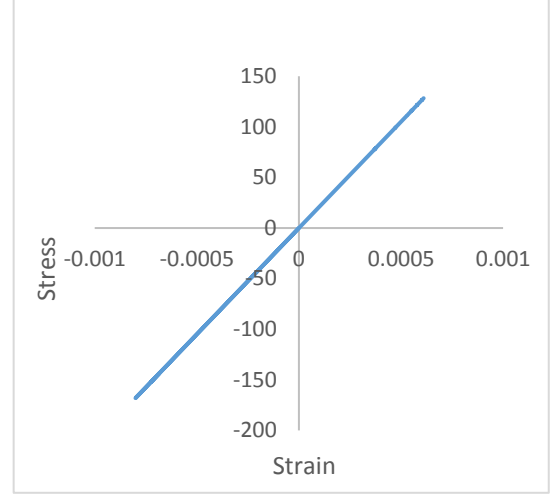


Şekil 3.2. Abaqus'ta Kalın cidarlı boru kesitin integrasyon noktaları (Dassault Systèmes 2013)

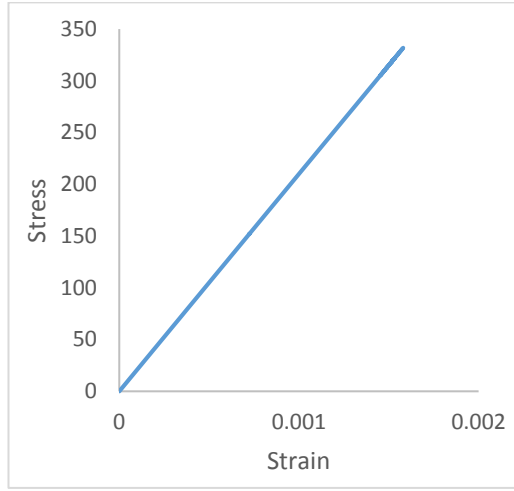
Şekil 3.2'de gösterilen enkesite sahip ideal üç boyutlu bir kiriş tipi elemanın burkulma sonrası elde edilen doğrusal olmayan davranışı Şekil 3.3'teki grafikler ile gösterilmiştir. Şekil 3.3'e göre kesitteki bazı noktalarındaki davranış lineer iken, başka noktalarında akma meydana gelmiştir. Bu durum, herhangi bir integrasyon noktasındaki davranışların birbirinden farklı olduğunu gösterir. Sonuç olarak kesitlerin doğrusal olmayan davranışı yapılan çözümlerin daha gerçekçi olmalarına neden olur.



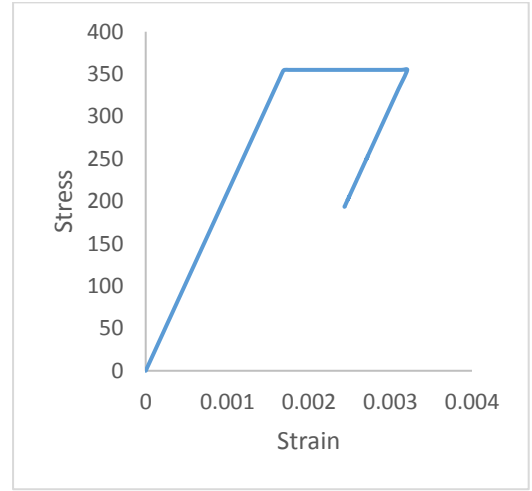
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.3. Kalın cidarlı boru enkesitin farklı integrasyon noktalarındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı; Şekil 3.2’de gösterilen kesitin **a)** 2 nolu noktası **b)** 20 nolu noktası **c)** 8 nolu noktası **d)** 14 nolu noktası

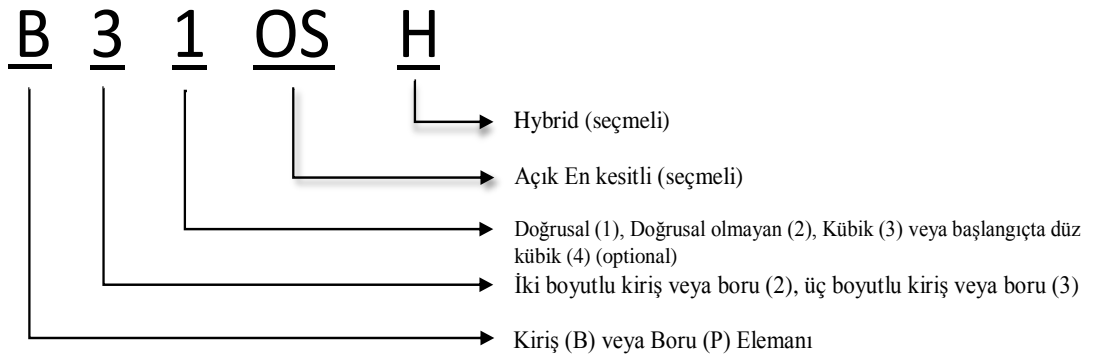
3.3.2. Eleman Parça Sayısı (Mesh Sayısı)

Sonlu elemanlar analizinin doğruluğunu etkileyen önemli faktörlerden biri elemanların parça büyüklüğüdür. Daha hassas bir ‘Mesh’ genellikle daha doğru analizlerin gerçekleştirilmelerine olanak sağlamakta, ancak aynı zamanda daha büyük hesaplama kaynakları ve zaman gerektirmektedir. Sonlu elemanlar kullanılırken Mesh’in analiz

sonuçlarına önemli bir etkisi vardır. Bu tezde ele alınan problemler için parça sayısı, tek bir kiriş-kolon elemanı modellemek için kullanılan elemanların sayısı ile ilgilidir. Bir sonraki bölümde deneme-yanılma hesaplama yoluyla, çubuk elemanın 10 eşit parçaya bölünmesi ile hesaplarda yeterli hassasiyet elde edilmiştir. Bu nedenle DÇKUKS'in modellenmesinde parça sayısı (Mesh) 10 olarak seçilmiştir.

3.3.3. Eleman Tipleri ve Genel ABAQUS varsayımları

Abaqus; “Euler-Bernoulli” tipi kirişler ve içi dolu enkesitli, kapalı ince cidarlı, açık ince cidarlı en kesitleri olan “Timoshenko” tipi kirişleri dâhil olmak üzere çok çeşitli kiriş eleman tipleri sunmaktadır. Abaqus'ta kiriş elemanların tipleri ve isimlendirilmesi aşağıdaki Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Abaqus programında kiriş – kolon eleman tiplerinin isimlendirilmesi

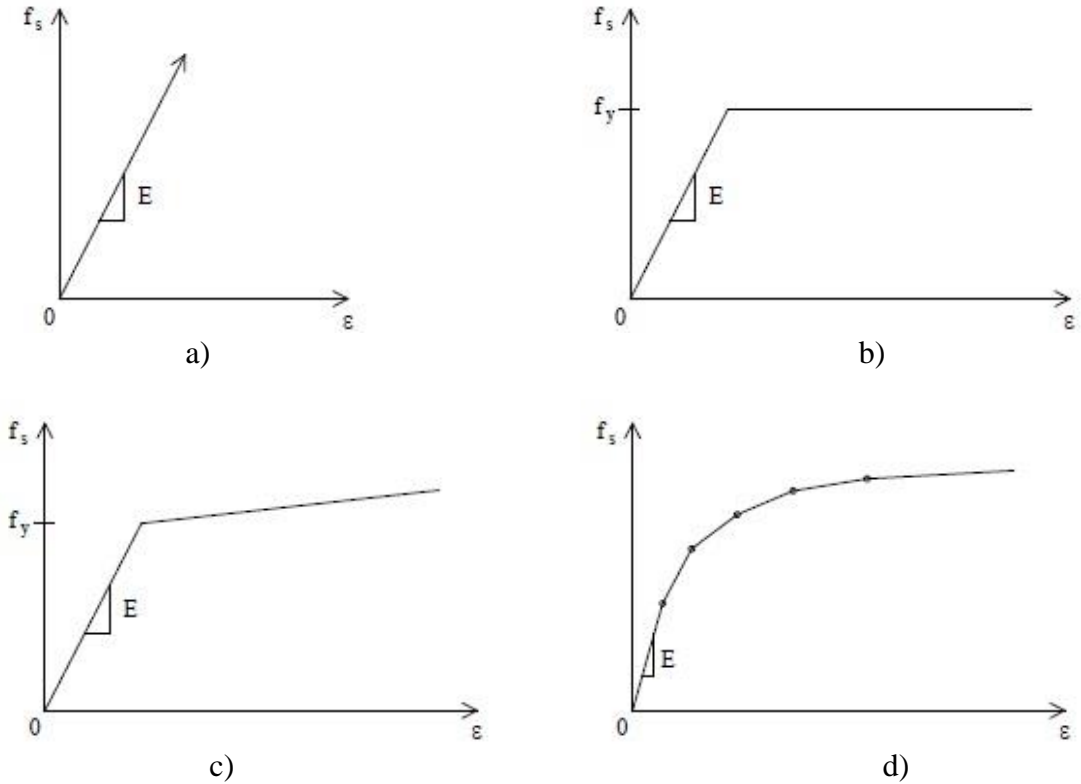
Burada B harfi, kiriş-kolon eleman anlamına gelen İngilizce “Beam” kelimesinden alınmıştır. B harfinden sonraki birinci rakam 2 veya 3 boyutlu bir eleman tipi olduğuna işaret ederken ikinci rakam elemanın doğrusal veya doğrusal olmayan bir çubuk elemanı olduğuna işaret eder. Örneğin, B21 ve B31 deki 2 ve 3 rakamları iki ve üç boyutlu elemanları ve 1 rakamı bu elemanların düğümler arasındaki boşluğu hesaplamak için doğrusal enterpolasyon kullanıldığını gösterir (ABAQUS 2016).

Bu tezde, kullanılan eleman tipleri, iki ve üç boyutlu (2D, 3D) kiriş-kolon çubuk elemanlarıdır. Çalışma kapsamında uzay kafes sistemlerin modellenmesinde kullanılan

kiriş-kolon çubuk elemanlarının Abaqus programındaki adları B21 ve B31'dir. B21 ve B31 narin ile orta derecede kalın kiriş yapılarını analiz etmek için uygundur (Li ve Taniguchi 2019).

3.3.4. Malzeme Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisi Modeli

Abaqus'te çubuk elemanlarının malzemelerini modellemek için tek eksenli bir gerilme-deformasyon eğrisi girilir. Oda sıcaklığında, çelik malzeme modellenmesi için bir dizi idealleştirilmiş gerilme-deformasyon eğrileri kullanılabilir. Analizin amacına bağlı olarak, gerilme-deformasyon eğrisi; bir elastik model, elasto-plastik model, bilineer model, çoklu doğrusal modeller, Ramberg-Osgood modelleri ve diğerleri gibi bir dizi farklı modellere basitleştirilebilmektedir. Şekil 3.5'te f_s gerilmeyi, f_y akma dayanımını, ϵ deformasyonu ve E elastisite modülünü ifade ederken gerilme-deformasyon eğrileri için bazı tipik basit modeller gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Gerilme-Şekil Değişirme Tipik Modelleri **a)** Elastik Model **b)** Elasto-Plastik Model **c)** Bilineer Modeli **d)** Çoklu Doğrusal Modeli

Abaqus'te, gerilme-deformasyon eğrisi (Property Module) elastik ve plastik özelliklerinin girilmesiyle tanımlanmaktadır. Elastik özellikler ve plastik özellikler. Elastik özellikler için istenen temel veriler Elastisite Modülü ve Poisson oranıdır. Plastik özelliklerde, istenen ana veriler akma gerilmesi ve plastik gerilme değerleridir. Elastik olmayan bir analiz yapmak için Abaqus'ta hem elastik hem de plastik özelliklerin tanımlanması gerekmektedir. Abaqus, kullanıcıların gerilme-deformasyon eğrisi üzerindeki noktaları tanımlayarak istenen herhangi bir gerilme-deformasyon eğrisini kullanmasına izin vermektedir. Bu çalışma kapsamında çubuk elemanların ve DÇKUKS'lerin modellenmesinde çelik malzemesi için Şekil 3.5.b'de gösterilen idealleştirilmiş elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır.

3.3.5. Kuvvet Kontrolü ve Deplasman Kontrollü

Abaqus'ta mevcut eleman veya yapı modelinin analizi için yük kontrollü ve deplasman kontrollü olarak iki yöntem uygulanabilmektedir. Yük kontrollü yönteminde elemana bir yük uygulanmakta ve ardından iç kuvvetler, moment ve deplasman değerleri hesaplanmaktadır. Deplasman kontrollü yöntemde, herhangi bir serbestlik derecesinde deplasman veya dönme büyüklüğü tanımlanır ve iç kuvvetler hesaplanır. Abaqus'ta yük veya deplasman tanımlaması "Load Module" kısmında yapılmaktadır. Yük kontrollü yöntemi, elemanın davranışını belirlemek için kullanılan basit bir yöntemdir. Deplasman kontrollü yönteminin uygulanması biraz daha karmaşıktır çünkü eşdeğer yükün hesaplanmasını gerektirir. Bununla birlikte, Abaqus'ta yük kontrollü yönteminin temel dezavantajı, elemanın dayanımı düşmeye başladıktan sonra yapı davranışının izlenememesidir (Chung Thi Thu Ho 2010). Deplasman kontrollü ise dayanım düşmeye başladığında da yapıların analizinin devam etmesine izin verir. Ancak, yük kontrollü yönteminde "Stabilizasyon ile Statik Analiz" yöntemi kullanıldığında yük yapı bazında göç tükenme sonrası davranışların izlenmesi mümkündür.

3.3.6. Doğrusal Geometri ve Doğrusal Olmayan Geometri Analizleri

Abaqus'te doğrusal geometrik analiz (birinci merteye etkisi) ve doğrusal olmayan geometrik analiz (ikinci merteye etkisi) yapabilmektedir. Doğrusal geometrik analiz, yapı modelinin veya elemanın başlangıç geometrisi dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu yaklaşımda yapı modelinin geometrisi, analiz sırasında herhangi bir yükleme veya deplasman değişiminden etkilenmemektedir. Bu durum, küçük deformasyonların varsayımına dayanan klasik yapısal analiz yöntemleriyle benzerdir (Chung Thi Thu Ho 2010).

Doğrusal olmayan geometrik analizde, yapının deformasyonları ve geometrideki değişimleri hesaba katılarak analiz boyunca yapının geometrisi güncellenmektedir. Doğrusal olmayan geometri seçeneği kullanılarak yapılan analizler, yük altında geometrideki değişiklikler hesaba katıldığı için daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir. Çerçeve yapıları için klasik yapısal analiz yöntemlerinde, yaklaşık doğrusal olmayan geometri analizi genellikle değişen geometrinin denge denklemleri üzerindeki etkisinin hesaba katılmasıyla gerçekleştirilir. Bu tür analizlere genellikle "P- Δ " analizi denilir. Bununla birlikte; doğrusal olmayan geometrinin etkileri için daha kesin bir analiz, eğrilik ve deplasman arasındaki tam ve doğrusal olmayan ilişkinin dahil edilmesi ve yük altındaki kesit şeklindeki değişikliklerin ve bunun sonucunda kesit özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin kontrolüyle yapılabilmektedir. Abaqus programında doğrusal olmayan geometri tanımlandığında, eleman ve kesit bazındaki geometrik nonlineeriteyi dikkate alarak analizler gerçekleştirilebilmektedir (Chung Thi Thu Ho 2010).

3.4. Burkulma Sonrası (Post-Buckling Analysis) Analizi için Abaqus Uygulaması

Abaqus'ta burkulma sonrası analizinde (Post-Buckling Analysis) beş tip kapalı integrasyon (Implicit) sonlu eleman analizi yöntemi ve bir açık integrasyon (Explicit) analiz yöntemi mevcuttur. Bu, Abaqus'un uzaysal yapıların analizinde kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Bu çalışma kapsamında düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin doğrusal olmayan analizleri için uygun bir yöntem arayışında farklı analiz

yöntemleri incelenmiştir. Bu yöntemler, kaynaklardan ve çalışma sırasında edinilen bilgilere dayanarak, aşağıda özetle açıklanmıştır.

3.4.1. Genel Statik Analiz

Genel Statik Analiz metodu, eylemsizlik ve zamana bağlı malzeme davranışının etkilerinin göz ardı edilebileceği, Abaqus'ta varsayılan statik analiz yöntemidir. Yük kontrolü veya deplasman kontrolü olarak kullanılabilen bir yöntemdir. Daha çok kararlı problemler için kullanılır. Doğrusal veya doğrusal olmayan analizler yapılabilir. Ancak, burkulma gibi kararsız problemlerde eleman bazında deplasman kontrollü olarak analizin yapılması gerekmektedir (Abaqus 2013). Bu gibi durumlarda kuvvet kontrollü çözümü yapılan elemanların analizinde, elemanın burkulma öncesi davranışı ve maksimum taşıyabileceği yük kapasitesi bulunabilirken, elemanın burkulma sonrası oluşan yük kapasite düşüş değeri elde edilemez. Kuvvet kontrolü ve deplasman kontrolü analizlerinin arasındaki mevcut olan farklar hakkındaki detaylı açıklamalar Kısım 3.3.5'da yer almıştır.

3.4.2. Stabilizasyon ile Statik Analiz

Bu çalışma kapsamında düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin yük kontrollü doğrusal olmayan analizlerinde uygulanan bir yöntemdir. Doğrusal olmayan statik analizlerde kararlı veya kararsız durumlar ile karşılaşılabilir. Uzay Kafes Sistemlerin performans (göçme) analizleri, elemanların akması, burkulması ve bunların sonucu olarak sistem yük kapasitesinde azalma (softening) içermektedir. Kararsızlık durumunda bir elemanın veya yapının yük-deplasman eğrisinde negatif bir rijitlik oluşuyorsa, bu durumda bir burkulma veya güç tükenmesi problemi olarak çözüm yapılabilir. Böyle durumlarda en iyi çözüm yöntemi olarak "Arc-Length" metodu kullanılabilir. Ancak, kararsızlıkların yerel olduğu durumlarda, modelin bir bölümünden komşu bölgelere yerel olarak bir şekil zorlanma enerjisi aktarımı olacaktır ve global çözüm yöntemleri (Genel Statik Analiz Yöntemi, "Arc Length" Analiz Yöntemi, vb) işe yaramayabilir. Böyle bir sorunun üstesinden gelmek ve çözümün ilerlemesine izin vermek için çözüm sürecine stabilizasyon uygulanabilir. Stabilizasyon yapısal sönümleme veya enerji dağıtımı

yoluyla sağlanır. Uygulanan sönümlenme ve enerji yayılımının, ani bükülme veya çökmeyi önlemek için yeterince büyük olması gerekir. Ancak, aynı zamanda yapısal göçmeyi önemli ölçüde etkilemeyecek kadar küçük olması gerekir.

Uygulanan sönümlenme faktörleri, bir analiz süresi boyunca sabit olabilir veya bir analizin ilerleyişindeki değişiklikleri hesaba katmak için yük artımına göre değişebilir. İkinci yaklaşım “Uyarlanabilir otomatik stabilizasyon şeması” olarak genelde tercih edilir. Bu yöntem, sönümlenme faktörü, deplasman ve yük artımı ile değişebildiği için etkili bir alternatif yaklaşım sunar. Bu durumda sönümlenme faktörü, yük-deplasman grafik yakınsaması ve viskoz sönümlenme ile harcanan enerjinin toplam gerilme enerjisine oranı ile kontrol edilir. Yakınsama davranışı kararsızlıklar nedeniyle sorunluysa, Abaqus/Standard otomatik olarak sönümlenme faktörünü artırır. Öte yandan, Abaqus/Standard, dengesizlikler azalırca sönümlenme faktörünü otomatik olarak azaltabilir. Sönümlenme ile harcanan enerjinin toplam gerilme enerjisine oranı, belirtilecek hassasiyet toleransı ile sınırlıdır. Böyle bir hassasiyet toleransı, tüm model için global düzeyde uygulanır. Uyarlamalı otomatik stabilizasyon şeması tarafından kullanılan varsayılan hassasiyet toleransı 0,05'tir (Abaqus V6.10).

3.4.3. Riks Statik Analizi

Abaqus/Standard'ta Riks metodu; kararlı veya kararsız güç tükenme durumlarında, burkulma veya burkulma sonrası problemlerin analizlerinde kullanılabilen bir yöntemdir. Genellikle, kararsız ve geometrik olarak doğrusal olmayan bir elemanın veya yapının göçme davranışlarını incelemek için kullanılır. Geometrik kusurları ve malzemedeki doğrusal olmayan davranışları dikkate almaktadır. Riks analizi, kararsız yapıların yük kontrollü analiz edilmesini sağlar ve yükün herhangi bir düzenlemesinin dikkate alınmasına izin verir. Bu yöntemde, bir burkulma sonrası problemini analiz etmek için bunun çatallanma yerine sürekli olarak tepki veren bir soruna dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu etki, “kusursuz” bir geometriye başlangıç kusuru verilerek sağlanabilir. Böylece kritik yüke ulaşılmadan önce burkulma modunda bir tepki oluşabilir.

Riks Statik Analizi, global yük kontrolü yöntemi olduğundan tek bir kolon analizi gibi basit yapılar için burkulma davranışını analiz etmekte çok faydalı olabilir. Ancak, yapılarda yerel burkulmalar gibi yerel kararsızlık durumları için bu yöntem uygun değildir. Abaqus/Standard böyle durumlarda, bir önceki kısımda açıklandığı gibi Stabilizasyon ile Statik Analiz yöntemlerini önermektedir.

3.4.4. Yarı-Statik Analiz (Quasi – Static Analysis)

Abaqus / Standard'ta yarı statik analiz yöntemi, zamana bağlı malzeme davranışı (sünme, şişme, viskoelastisite ve iki katmanlı viskolastiklik) ile ilgili problemleri analiz etmek için kullanılır. Atalet etkileri ihmal edilir. Bu yöntem ile doğrusal veya doğrusal olmayan analizler yapılabilir (Abaqus V6.6).

Yarı-statik bir analizin genel statik analize göre avantajı; atalet etkisinin, burkulma veya göçme davranışından kaynaklanan yerel kararsızlıkları stabilize etmek için ortaya konmasıdır (Adams ve Zingoni 2013).

3.4.5. Kapalı (Implicit) Dinamik Analiz

Abaqus/Standard'ta dinamik analiz yöntemi yapısal bir sistemin geçici dinamik tepkisini hesaplamak için zaman integrasyonunu kullanır. Dinamik yükleme yöntemleri, ani ve sürekli dinamik yükleme (darbe veya titreşim) tepkisinin önemli olduğu, dolayısıyla ivme ve hız terimlerinin büyük önem taşıdığı durumlarda kullanılır.

Geometrik olarak doğrusal olmayan statik problemler bazen burkulma veya göçme davranışını içermektedir. Böyle burkulma veya burkulma sonrası davranışları söz konusu olduğunda, kuvvet-deplasman davranış grafikleri negatif bir rijitlik gösterebildiğinden dolayı yapının dengede kalması için gerilme enerjisini serbest bırakması gerekebilir. Bu tür davranışların modellenmesi için kullanılan yaklaşımlardan biri, burkulma davranışını dinamik bir şekilde ele almaktır. Dinamik analizi burkulma ve burkulma sonrası problemlerin analizlerinde kararlı hale getirmek için atalet etkisi kullanılabilir. Bu

yaklaşım, sonlandırılmış statik analizi yeniden başlatmak ve statik çözüm kararsız hale geldiğinde dinamik analize (Dinamik/Implicit) geçmek suretiyle kolayca gerçekleştirilebilir (Abaqus 2013).

3.4.6. Açık (Explicit) Dinamik Analiz

Açık dinamik analiz, çok sayıda küçük zaman artışını etkili bir şekilde gerçekleştirir. Eşzamanlı denklem dizileri için çözüm olmadığından her bir zaman artışını nispeten kolay bir şekilde gerçekleştirir. Eksenel olarak basınç altındaki yapılar veya elemanlarda burkulma sonrası davranış, dinamik mod değiştirme ile temsil edilebilir. Büyük deformasyon teorisi kullanır. Dolayısıyla modeller büyük dönmeye ve büyük deformasyona maruz kalabilir.

Açık yöntemde, merkezi zaman farkı integrasyonu (Central Difference Time Integration, CDTI), ilgili düğüm noktalarında alan değişkenlerini hesaplamak için kullanılır. Doğrusal olmayan adi diferansiyel denklem için sadece bir sayısal çözüm mümkün olduğundan, bu yöntem doğrusal olmayan problemler için özellikle uygundur (Abaqus 2017).

3.4.7. Abaqus'ta Burkulma Sonrası Analiz Metotlarının Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasındaki amaç, eleman başlangıç eğrilik kusurlarına sahip Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin incelenmesidir. Bu sistemler birçok çubuk elemanın mafsallı birleşimler ile bir araya getirilmesiyle oluşan sistemlerdir. Bu sistemlerin elemanlarında yüklenme sadece merkezi eksenel basınç veya çekme şeklinde oluşmaktadır. Dolayısıyla, bu kısımda yukarıda tanımlanan analiz metotları Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin doğrusal olmayan analizleri için uygulama dereceleri değerlendirilmiştir.

Önceki kısımlarda belirtildiği gibi Abaqus'ta burkulma ve burkulma sonrası gibi davranışları karakterize etmek için birkaç yaklaşım mümkündür. Ancak, Uzay Kafes Sistemlerin göçme analizleri: doğrusal olmayan malzeme, kusurlu eleman geometrisi, eleman bazında burkulma (yerel burkulma) ve sistem bazında güç tükenme mekanizmasına sahip bir problemin çözümüdür (Adams ve Zingoni 2013). Bu sistemlerin

analizlerinde karşılaşılan iki ana zorluk, güç tükenme davranışının ortaya çıkması ve yük kapasitesinin ani düşmesidir (Adams ve Zingoni 2013). Bu analizler sırasında burkulma sonrası aşamasına geçildiğinde sistemin davranışında bir rijitlik azalması gözlemlenecektir. Bu aşamada malzemenin doğrusal olmayan davranışından elemanlarda akmanın oluşması ve kusurlu geometrisinden dolayı elemanların burkulma sonucu ani dayanım düşüşü yaşanacaktır. Elemanlar birbirleriyle mafsallı bir şekilde bağlanmış olduklarından dolayı sistemde güç tükenme durumu yerel veya genel olabilir. Dolayısıyla, uzay kafes sistemlerin analizinde kullanılan analiz metodu genel kararsızlık durumların yanı sıra yerel olarak oluşan kararsızlık durumlarının mevcut olduğunda da analize devam etme kabiliyetine sahip olması gerekmektedir.

Uzay kafes sistemlerin göçme durumunu değerlendirmek için hem kapalı dinamik (Implicit dynamic) analiz metodu hem de açık dinamik analiz (Explicit dynamic) metotları kullanılabilir (Fu ve Parke 2018). Implicit metodu kolay ve basit bir yöntemdir. Bu yöntemde analiz çok daha hızlıdır ve Explicit yöntemine göre daha az hesaplama süresi gerektirir. Ancak, yapının genel göçme durumunu simüle edemez. Bu yöntemin aksine, tüm göçme sürecini simüle eden “Explicit” yöntemi kullanmak mümkündür. Explicit yöntemi ise daha fazla hesaplama süresi gerektirir. Bu durum, genel uygulamada kullanımı kolay olmadığı anlamına gelse de yapının göçme analizinin doğru bir gösterimini sağlayabilir (Fu ve Parke 2018). Bu çalışmada kullanılmamasının sebebi ise çubuk elemanların iki uçlarındaki dönmelerini serbest bırakılmaları için kullanılan “Release” komutunun Abaqus/Explicit’te mevcut olmamasıdır. Bu durumda mafsallı düğüm noktaların modellenmeleri için ekstra bağlantı elemanları modellenip kullanılabilir ancak bu durum pratik olmayabilir.

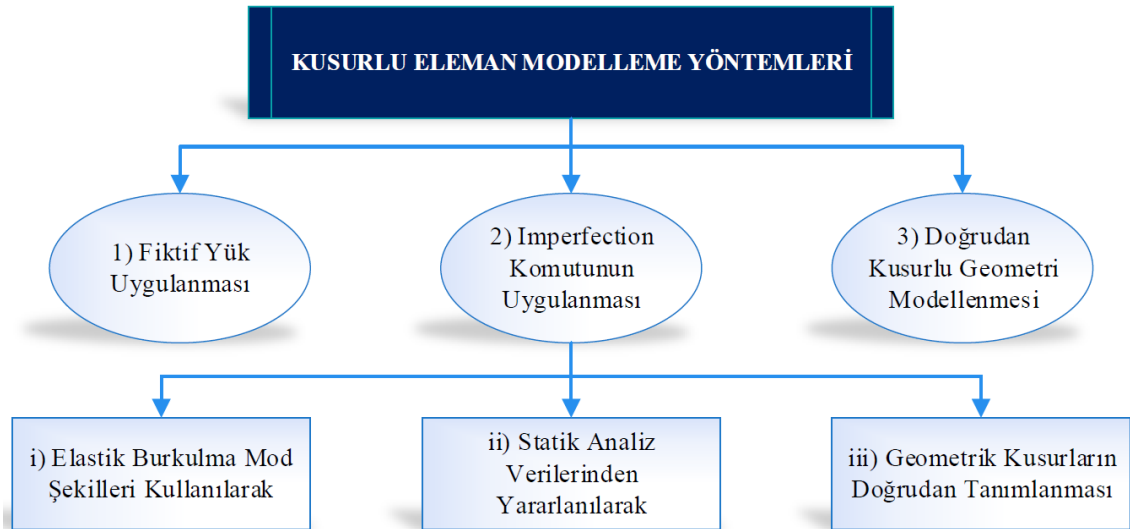
Riks Statik analiz metodu tek bir çubuk elemanın analizleri gibi basit yapıların burkulma analizlerinde yararlı bir yöntem olabilir. Yapıların davranışları, bir dizi elemanın aynı anda akması ve burkulmasını içerdiği veya yükleme koşullarının karmaşık olduğu durumlarda Riks Statik analizi, kullanışsız veya olanaksız olabilir (Chung Thi Thu Ho 2010).

Bu çalışma kapsamında uzay kafes sistemlerin analizlerinde kullanılan “Stabilizasyon ile Statik Analiz” yöntemi, uygulanan yükleme tipine göre ve yapının modelinin tipine en uygun yöntem olarak öngörülmüştür.

3.5. Abaqus'ta Eleman Başlangıç Geometrik Kusurların Modellenmesi

Arc-length metodu burkulma sonrası davranış, burkulma dallanma yüklerinin bulunması ile yapılabilmektedir. Ancak dallanma sırasındaki oluşan süreksizlikten dolayı gerçek davranış elde edilemez. Süreksizlik oluşturan dallanma davranışı yerine, başlangıç kusuru dikkate alınarak burkulma esnası ve sonrasında süreklilik elde edilmektedir (Kobayashi ve Mihara 2010).

Abaqus'te çubuk elemanlara başlangıç Eğrilik kusuru farklı yöntemlerle (yaklaşımlarla) verilebilir. Şekil 3.6'de görüldüğü gibi geometrik kusurların modellenmesi için üç genel yöntem kullanılabilir; Fiktif Yük Uygulanması, “Imperfection” komutunun ve Doğrudan Kusurlu Geometri Modellenmesi. ”Imperfection” komutu ile elemanlarda kusur tanımlanabilir. Bu yöntemle “Elastik Burkulma Mod Şekilleri Kullanılarak” yapı elemanlarına başlangıç geometrik kusurları verilebilmektedir. Kusur uygulama yöntemleri aşağıda incelemeye alınmıştır:



Şekil 3.6. Abaqus 'ta kusurlu geometri tanımlama yöntemler

3.5.1. Fiktif Yükün Uygulanması

Elemanın veya yapının doğrusal olmayan burkulma sonrası analizi, küçük fiktif yük uygulanması şeklinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemde küçük bir fiktif yük, elemanın eksenini dışında belirli bir noktasında tekil yük olarak veya eleman uzunluğu boyunca üniform yayılı yük olarak istenilen miktarda başlangıç deplasmanı (kusuru) oluşturacak şekilde verilmektedir.

İkinci mertebe (geometrik nonlineerite) analizleri ile elemana veya yapıya uygulanan kuvvetin büyüklüğünün belirli bir aralıkta olması gerekmektedir. Fiktif yükün çok büyük olması elemanın maksimum kapasitesini etkileyebileceği gibi çok küçük olduğunda ise burkulmayı tetikleyemeyeceği için burkulma oluşamaz ve büyük yüklemelerde burkulma kapasitesini etkileyerek gerçek kusura dönüşür.

Bu yöntemin kullanılması için iki analiz adımı (Step) oluşturulur. Birinci adımda doğrusal statik analiz yapan, “Genel Statik” analiz uygulanır. Burkulmayı tetikleyen fiktif yükün yüklemesi bu adımda yapılmaktadır. İkinci adımda doğrusal olmayan burkulma analizi yapan “Riks” gibi bir analiz metodu oluşturulmaktadır. Elemanın eksenel basınç yüklemesinin artırımlı bir şekilde uygulanması “Riks” analizinde yapılmaktadır.

3.5.2. “İmperfection” Komutunun Uygulanması

Kusursuz bir geometriye sahip yapı veya elemana, Abaqus paket programının sunduğu metotlardan yararlanarak kusurlu bir geometri oluşturulur. Bu yöntemde önceden tanımlanmış, kusuru bulunmayan bir geometriye sahip yapı veya elemana belirli yöntemleri kullanarak farklı büyüklüklerde geometrik kusuru uygulanır. Genel yaklaşım, aynı model tanımına sahip iki analizin yapılmasını içerir. Birinci analizde olası göçme veya burkulma modları belirlenir. İkinci analiz çalışmasında, bu burkulma modlarını “kusursuz” geometriye ekleyerek geometride bir geometrik kusuru oluşturulur. Abaqus programı, kusurlu verileri düğüm etiketleri üzerinden ikinci analize aktarır. Bu yöntemde kullanılan “Imperfection” komutu Abaqus/CAE’de mevcut olmadığı için sadece

Abaqus/Input'ta geçerli bir yöntemdir. "Imperfection" kusur uygulama yöntemi üç şekilde gerçekleştirilebilir (Abaqus 2016):

Elastik Burkulma Mod Şekilleri Kullanılarak Kusur Tanımlama Yöntemi

Elastik burkulma analizi sonucu elde edilen modlara bağlı olarak geometrik kusuru tanımlanır. Bu yöntemde, birinci analiz normal elastik burkulma analizi suretinde yapılır. Daha sonra elastik burkulma mod şekillerinden yararlanılarak modlar doğrultusunda kusurlu eleman olarak ikinci analiz gerçekleştirilir.

Statik Analiz Verilerinden Yararlanılarak Kusur Tanımlama Yöntemi

Birinci analizin statik analiz olması durumunda, statik analiz sonucunda deforme olmuş geometriye dayalı bir kusur tanımlanır. Bu yöntemde, statik analiz sonucunda eleman veya yapıda deformasyonlar oluşturulur ve ikinci analizi deforme olmuş yeni kusurlu geometriye veya yer değiştirmiş düğüm noktalarına dayanarak burkulma sonrası analiz yapılır.

Geometrik Kusurların Doğrudan Tanımlanması Yöntemi

Kusurların dolaylı olarak tanımlanması yerine, doğrudan düğüm noktalarının numaraları ve koordinatları şeklinde tanımlanmasıdır. Bu yöntemde birinci analize gerek kalmadan kusurlar düğüm noktalarının herhangi bir koordinat sistemine göre yer değiştirmeler/sapmalar şeklinde tanımlanır.

3.5.3. Doğrudan Kusurlu Geometri Modellenmesi

Bu çalışma kapsamında Çift Katlı Uzak Kafes Sistemlerinin elemanların kusurlu olarak modellenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Abaqus/CAE kullanılırken geometrisi kusurlu elemanların modellenmesi veya Abaqus/Input kullanıldığında direkt olarak elemanın kusurlu geometri halinin koordinatlarını tanımlanması şeklinde uygulanan bir yöntemidir. Bu metodun avantajlarından biri, diğer yöntemlerden farklı olarak, iki ayrı

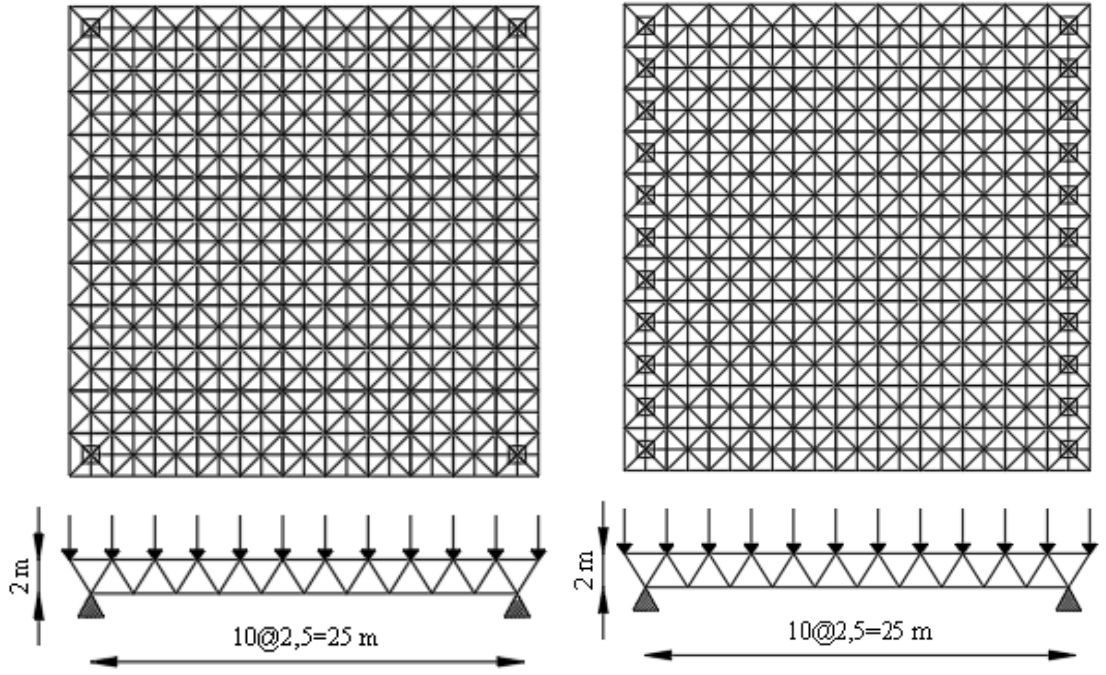
analize gerek duyulmamasıdır. Eleman veya yapı modellerinin geçek kusurlu şekilleri modellenir ve analizlerde geometrik nonlineritesi dikkate alınarak analiz yapılır. Böylece, eleman ve/veya yapının modelinin kusurlu durumunun analizi gerçekleştirilir.

3.6. Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin Analitik Modellerinin Hazırlanması

Bu çalışmada, rastgele dağıtılmış eleman başlangıç eğrilik kusurlarının Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin yük taşıma kapasitelerine etkisi incelenmiştir. Elemanların başlangıç eğriliklerini doğru tanımlamak amacı ile parçalara ayrılmıştır. Bu parça sayısı yakınsama (convergence) analizi ile belirlenmiştir. Oluşturulan Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistem elemanlarında eğrilik büyüklükleri gelişi güzeldir. Abaqus modellemesi için Mathematica’da bir program hazırlanmıştır. Bu program verilen geometrik özellikleri, yükleme durumunu, eğrilik kusuru dağılım eğrisi özelliklerini (standart sapma, ortalama, eğri tipi, maksimum eğrilik vb.), eleman parça sayısı gibi verilen özellikleri dikkate alarak istenilen sayıda Abaqus/İnput dosyası oluşturmaktadır. Her “İnput” dosyasında eleman kusur miktarları farklı oluşturmaktadır. Bunda amaç, aynı geometrik özellikteki yapılarda eğrilik kusur etkisini olasılık yaklaşımı ile irdelemektir. Mesnetlenme koşulları ve modül sayısı parametreleri dikkate alınarak 6 adet Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemi modellenmiştir. Modellerin boyutları 25m x 25m ve derinlikleri 2m olarak dikkate alınmıştır. Mesnetlenme koşullarının araştırılması için oluşturulan modellerde katmanlardaki eleman uzunlukları sabit olarak 2.5m, çapraz elemanların uzunlukları 2.67m ve modül sayısı 10 x 10 sistemlerdir. Modül sayısı etkilerini araştırmak için oluşturulan modeller ise 12 x 12, 10 x 10 ve 8 x 8 modüllere sahip sistemlerdir. Burada, elemanların uzunlukları modül sayılarının farklı olmasından dolayı her bir model için değişkenlik göstermektedir.

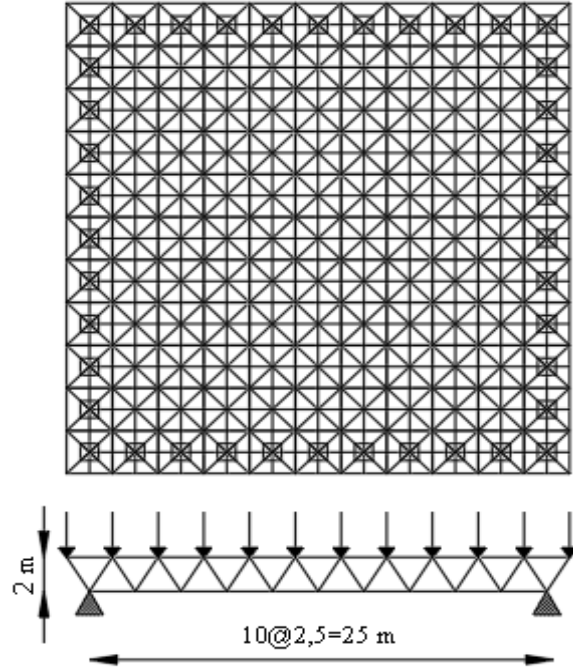
Bütün elemanlar Kısım 3.3.1’de açıklandığı gibi boru tipi enkesite sahiptirler. Kullanılan malzeme Kısım 3.3.4’te tanımlanan elasto-plastik davranışa sahip çelik malzemesidir. Kullanılan çelik malzemesinin akma gerilmesi 355MPa ve elastisite modülü 2,1E+5 MPa olarak alınmıştır.

Mesnetlenme durumları ve modül sayısına göre dikkate alınan düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin boyutları, mesnetlenme durumları ve yükleme tipi gibi özellikleri Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi Model A, Model B ve Model C yapı modelleri sırasıyla köşe sabit mesnetli, iki kenar sabit mesnetli ve dört kenarı sabit mesnetli sistemlerdir. Diğer taraftan Model D, Model E ve Model F yapı modelleri sırasıyla 12 x 12, 10 x 10 ve 8 x 8 modül sayısına sahip, köşelerde sabit mesnetlenmiş sistemlerdir.



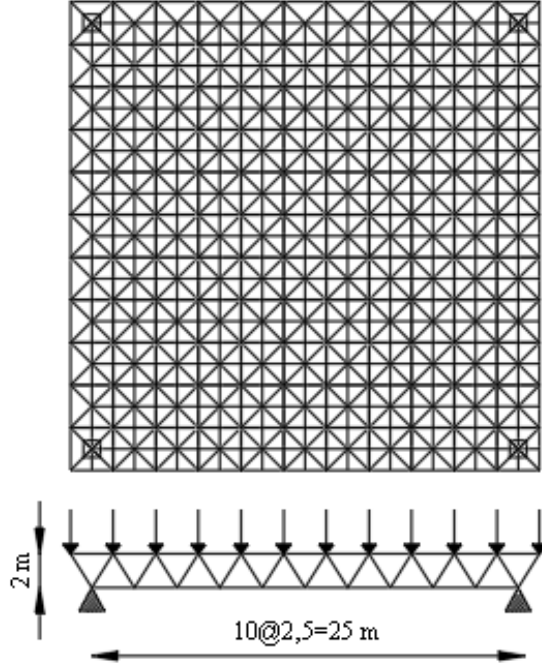
Model A

Model B

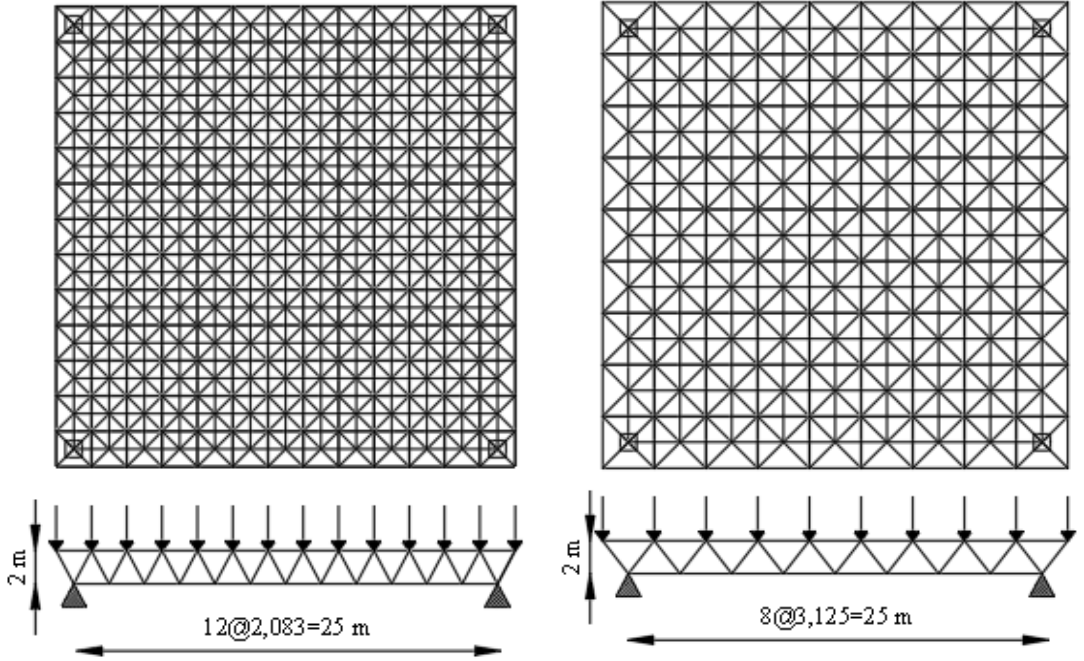


Model C

Şekil 3.7. Mesnetlenme koşullarına göre hazırlanan düzlemsel çift katlı uzay kafes sistem modelleri



Model E

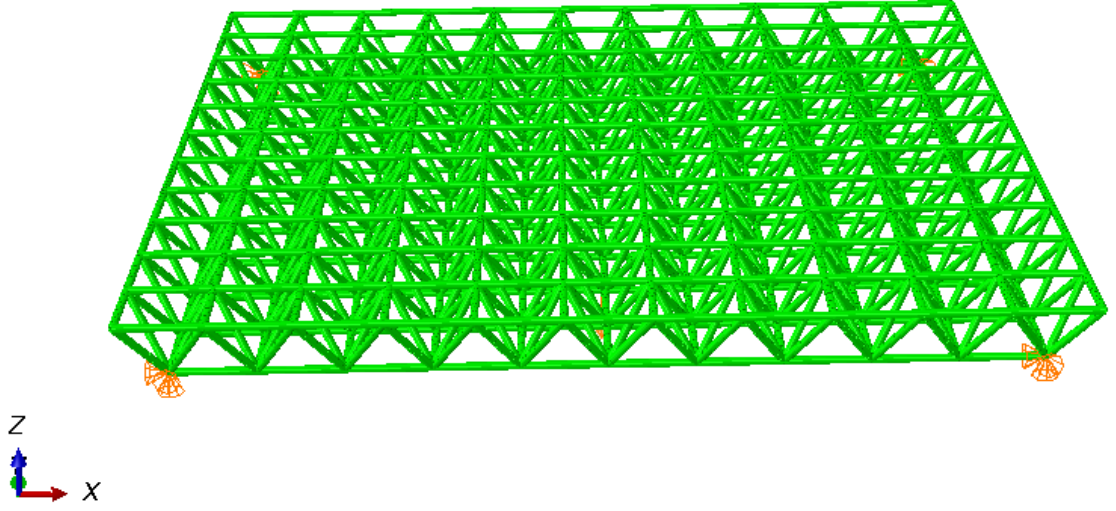


Model D

Model F

Şekil 3.8. Farklı modül sayısında hazırlanan düzlemsel çift katlı uzay kafes sistem modelleri

Abaqus programında oluşturulan yapı modellerin üç boyutlu görünüşleri Şekil 3.9'de gösterilmiştir.



Şekil 3.9. ABAQUS'ta Düzlemsel Çift Katmanlı Uzay Kafes sistem 3D görünüşleri

Bu modellerin hazırlanmasında aşağıda belirtilen konular dikkate alınmıştır.

Eleman Tipi ve Birleşim Noktaları Modellenmesi

Bu çalışmada iki boyutlu analizler için B21 ve üç boyutlu elemanlar için B31 kiriş-kolon (Beam) eleman tipleri kullanılmıştır. Bu eleman tipleri narin ile ortada derecede kalın kiriş-kolon elemanları analiz etmek için uygundur.

Düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemin çubuk elemanları birbiriyle mafsallı olarak bağlanmaktadır. Bu amaca göre Abaqus/Standard'ta bulunan "Release" komutu kullanılmıştır. "Release" komutu elemanın bir veya iki ucundaki mafsallı bağlantıları (bir, iki veya üç yönde mafsallı) modellemek için kullanılır. Bu komut ile dönme etkisi serbest bırakılarak, bir elemanın seçilen serbestlik dereceleri etrafındaki serbestçe dönmeye izin verilir. Burada, kullanılan çubuk elemanların uç noktalarındaki dönme etkileri serbest bırakılmıştır ve böylece sadece eksenel kuvvet serbestlik dereceleri aktif olacaktır.

Rastgele Kusurlu Eleman Modellenmesi

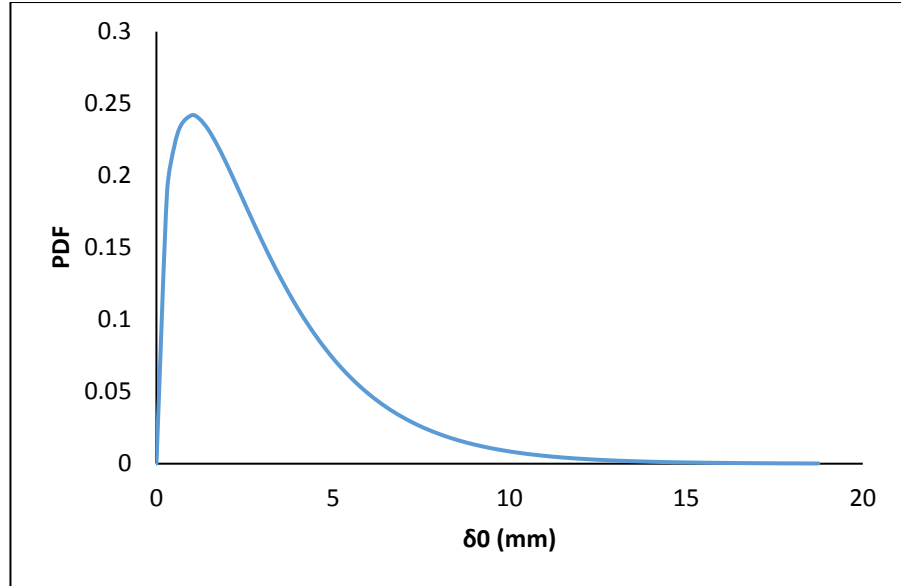
Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin modellenmeleri, rastgele eleman başlangıç eğrilik kusurlarının oluşturulması ve bunların yapı modelinin elemanları arasında gelişigüzel atanması için MATHEMATICA paket programı kullanılmıştır. Bu programda yazılmış olan yazılım ile; farklı açıklıklarda, derinliklerde, modül sayısında, yükleme şekli ve kusur dağılımlarında modeller oluşturulabilmektedir. Burada aynı zamanda, oluşturulan modeller Abaqus paket programı işlem öncesi hazırlanan girdi (Abaqus/Input) dosyası olarak hazırlanabilmektedir. Kısım 2.6.2’de belirtildiği gibi, eleman başlangıç eğrilik kusuru yaygın olarak karşılaşılan ve bir sistemin elemanları arasındaki dağılım şekli sağdan çarpık dağılım fonksiyonuna göre gelişigüzel dağıtılmaktadır.

Düzlemsel çift katlı uzay kafes sistem modelleri Abaqus programında başlangıçta kusurlu ve kusursuz sistemler olarak oluşturulmuştur. Kusursuz yapı modelleri, herhangi bir geometrik kusuru olmayan sistemlerdir. Ancak, bu sistemlerdeki elemanlarda burkulmanın gerçekleşebilmesi için çok küçük bir fiktif geometrik kusur verilmiştir. Geometrik kusur, yarım sinüs dalgası şeklinde eleman başlangıç eğriliği olarak verilmiştir. Bu fiktif kusurun büyüklüğü Bölüm 4, Kısım 4.1.5’te açıklanmak üzere; analiz metodu, kusur uygulama metodu, eleman tipi ve narinlik oranı gibi pek çok parametre dikkate alınarak ve elemanın kapasitesini etkilemeyecek şekilde seçilmiştir. Burada seçilen çubuk eleman eğrilik kusuru $L/6250$ oranındadır.

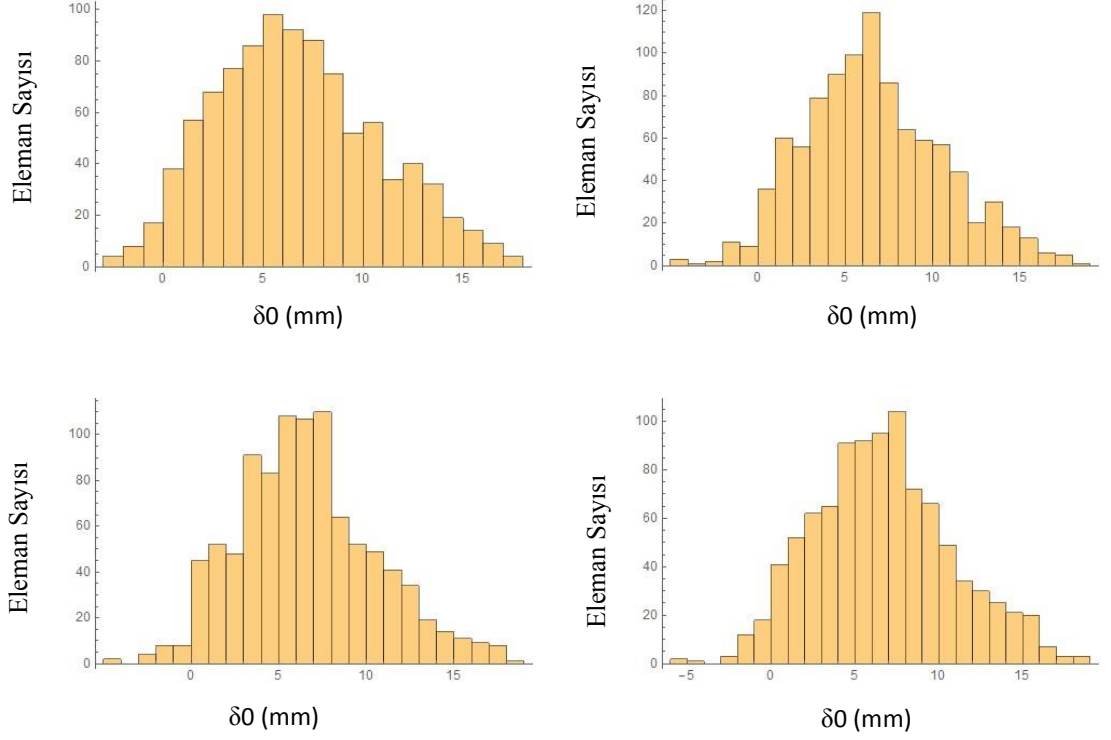
Kusurlu düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemler, elemanlarında başlangıç eğrilik kusuru bulunan sistemlerdir. Başlangıç geometrik kusurunun rastgele olduğu gerçeğini göz önünde bulundurarak, çubuk elemanların orta noktasındaki başlangıç eğrilik kusurlarının büyüklüğünün, sola çarpık dağılım gösteren bir olasılık dağılımına sahip olduğu varsayılmıştır. Burada ortalama değer parametresi (μ), bu tip yapılarda izin verilen bir değer olduğu için, $L/1000$ olarak seçilmiştir. Standart sapmanın (σ) büyüklüğü $2,5L/1000$ olarak alınmıştır. Aynı zamanda üst sınır olarak kusurların maksimum büyüklüğü

7,5L/1000 olarak sınırlandırılmıştır. Bunun nedeni, büyük ölçüde eğriliği olan elemanları kullanmaktan kaçınmaktır.

Şekil 3.10'da uzunluğu 2,5m olan bir çubuk elemanın kusur miktarının olasılık dağılım grafiği gösterilmiştir. Şekildeki düşey eksen olasılık dağılım fonksiyonunu (PDF), yatay eksen eleman orta noktasındaki deplasmanı göstermektedir. Sağdan çarpık olasılık dağılımı ve yukarıda belirtilen özellikler üzerinden rastgele sayılar üretilerek, uzunluğu 2,5m olan elemanlar için MATHEMATICA paket programında üretilen kusur dağılımlarından 4 tanesi Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Çubuk elemanın sola çarpık olasılık dağılımı yoğunluk fonksiyon ($L = 2,5$ m)



Şekil 3.11. Oluşturulan ÇKUKS’de Şekil 3.9’de verilen eğrilik kusur dağılımı kullanılarak elemanlarında oluşturulan kusurların Histogramları.

Yükleme Tipi ve Mesnetlenme Koşulları

Düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri için yapı modellerin üst tabakalarının düğüm noktalarına yükleme yapılmıştır. Mesnetlenme koşulları ise dikkate alınan parametrelere göre birbirinden farklılık göstermektedir. Mesnetlenme durumlarının ÇKUKS in performansları üzerinde etkilerini irdelemek için, köşe mesnetlenme, iki kenar mesnetlenme ve dört kenar mesnetlenme (çepe çevre) durumları dikkate alınmıştır. Şekil 3.6’da Model A, Model B ve Model C nin mesnetlenme koşulları gösterilmiştir. Ancak, modül sayısı parametrelerini incelerken yapı modellerinin hepsinde köşe mesnetli durum göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 3.7’de gösterilen Model D, Model E ve Model F köşe noktalardan mesnetlenmiş, modül sayıları farklı sistemlerdir.

Çift Katlı Uzay Kafes Sistem Modellerinin Tasarımı

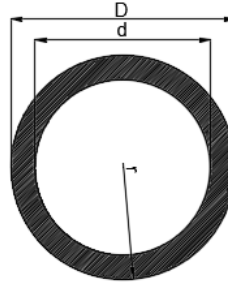
Yapı modellerinin tasarımında çubuk elemanların çeşitliliğini azaltmak ve değişkenlerin sayısını en aza indirmek amacıyla yapı modellerinin elemanları gruplandırılmıştır. Bu gruplandırmalar kapsamında; köşe mesnetlenmiş sistemlerde dört grup eleman, iki kenarlı mesnetlenme ve dört kenarlı mesnetlenme durumlarında üç grup eleman oluşturulmuştur. Yapı modellerinin tasarımı her bir grubundaki en kritik eleman dikkate alınarak yapılmıştır. Köşe mesnetlenme durumunda olan yapı modellerinde, mesnetler üzerindeki çapraz elemanları ayrı bir eleman grubu olarak değerlendirilmiştir. Bu elemanların tasarım kapasiteleri diğer eleman gruplarına göre çok yüksek seçilerek güvenliğe alınmıştır.

Narinlik oranı

Bir sonraki bölümde açıklanacağı gibi kusurlu çubuk elemanların kapasitesi narinlik oranına göre değişkenlik göstermiştir. Kusurlu çubuk elemanların kapasiteleri farklı narinliklerde farklı hassasiyetler göstermiştir. Dolayısıyla, yapı modellerinin çubuk elemanların narinlik oranı sabit bir değer olarak öngörülmüştür. Burada eleman narinlik oranının büyüklüğü 115 olarak seçildiğinden, elemanlarda elastik burkulma oluşacağı öngörülmüştür.

Çubuk Elemanın Tasarım Kapasitesi

ÇKUKS modellerin elemanlarının tasarımı için model elemanları üç farklı grup olarak dikkate alınmıştır (Ust elemanlar, Alt elemanlar, Diyagonal elemanlar). Aynı gruptaki elemanlar aynı boyutta seçilmiştir. Gruplardaki elemanların kesit tasarımları, ilgili gruptaki en kritik eleman dikkate alınarak yapılmıştır. Eleman bağlantı noktaları mafsallı olduğundan her bir elemanın davranışı Şekil 4.1'de gösterilen basit mesnetli bir çubuk eleman olarak ele alınabilir. Bu durumda elemanların tasarım kapasiteleri Euler denklemine göre belirlenebilir. Elemanların enkesitleri Şekil 3.12'da gösterildiği gibi boru enkesitli çubuk elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Çalışma kullanılan enkesit tipi

Boru enkesitli bir basit mesnetli eleman için Euler elastik burkulma bağıntıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$D=2r \quad (3.1)$$

$$d=D - 2t \quad (3.2)$$

$$I=\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (3.3)$$

$$A=\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (3.4)$$

$$\lambda=\frac{4L}{\sqrt{D^2 + d^2}} \quad (3.5)$$

$$P_e=\frac{\pi^2 E(D^2 + d^2)}{16L^2} \quad (3.6)$$

Burada:

- r kesit yarı çapı,
- t kesit et kalınlığı,
- d kesit iç çap,
- D kesit dış çapı,
- A kesit alanı,
- λ narinlik oranı,
- L eleman uzunluğu,

- E elastisite modülü ve
P_e Kolon elastik burkulma yükü göstermektedir.

Bu denklemler kullanılarak sabit bir çubuk eleman uzunluğu için istenilen bir elastik burkulma yükü istenilen bir narinlik oranında elde edilebilir.

Tasarım Yükü

Düzlemsel çift katlı uzay kafes sistemlerin kesitlerinin tasarımı için üst tabakalar üzerine 0,5kN/m² sabit yayılı yük ve 0,75kN/m² hareketli yayılı yük ön görülerek yapılmıştır. Yük kombinasyonu olarak q = G + Q kombinasyonu kullanılmıştır. Uygulanan tasarım yükleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$G = 0,5 \text{ kN/m}^2 \quad Q = 0,75 \text{ kN/m}^2 \quad q = G + Q = 1,25 \text{ kN/m}^2$$

A, B, C ve E Modelleri için Düğüm Noktası Yük alanı,

$$A_1 = 2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} = 6,25 \text{ m}^2$$

A, B, C ve E Modellerin üst tabaka düğüm noktalarına uygulanan tekil yük hesabı:

$$P_{N1} = q \times A = 1,25 \times 6,25 = 7,8125 \text{ kN}$$

Model D için Düğüm Noktası Yük alanı,

$$A_2 = 2,08 \text{ m} \times 2,08 \text{ m} = 4,33 \text{ m}^2$$

Model D'nin üst tabaka düğüm noktalarına uygulanan tekil yük hesabı

$$P_{N2} = q \times A = 1,25 \times 4,33 = 5,47 \text{ kN}$$

Model F için Düğüm Noktası Yük alanı,

$$A_3 = 3,125 \text{ m} \times 3,125 \text{ m} = 9,76 \text{ m}^2$$

Model F'nin üst tabaka düğüm noktalarına uygulanan tekil yük hesabı

$$P_{N3} = q \times A = 1,25 \times 9,76 = 12,2 \text{ kN}$$

Kapasite Oranı

Tasarımda dikkate alınan başka bir parametre, kritik elemanların kapasite oranlarıdır. Farklı yapı modellerindeki aynı eleman grubu için kritik elemanların kapasite oranları aynı olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Kesitlerin kapasite oranları aşağıdaki bağıntı ile tanımlanabilir.

$$CR_c = \frac{P_{uc}}{P_n} \quad (3.7)$$

Burada; CR_c kritik elemanın kapasite oranını, P_{uc} talep edilen basınç kuvvetini ve P_n basınç elemanının kapasitesini göstermektedir.

Yukarıdaki kabuller ve varsayımlara göre gerçekleştirilmiş olan tasarım enkesitlerinin özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2’de tasarımda talep edilen kuvvetlere göre belirlenmiş olan elemanların kapasiteleri ve oranlarını göstermektedir.

Çizelge 3.1. Çalışma kapsamında oluşturulan modellerde kullanılan kesitler

Modeller	Kullanılan Eleman Kesitleri		
	Üst Katman Elemanları	Alt Katman Elemanları	Çapraz Elemanlar
Model A / Model E	CHS 68.6/8	CHS 64.8/3.5	CHS 69/3.5
Model B	CHS 66/4.6	CHS 62.6/3.2	CHS 67/1.7
Model C	CHS 64/2.5	CHS 62.8/1.4	CHS 66.4/0.7
Model D	CHS 59/8.7	CHS 55.2/4.8	CHS 64/3.5
Model F	CHS 69.6/7	CHS 73.6/2.2	CHS 68.8/3.9

Çizelge 3.2. Çalışma kapsamında oluşturulan modellerin eleman kapasite oranları

Modeller	Talep Edilen Kuvvetler (kN)			Eleman Kapasiteleri (kN)			Kapasite Oranları		
	Üst	Alt	Çapraz	Üst	Alt	Çapraz	Üst	Alt	Çapraz
Model A / E	205	89	95	235	105	113	0.872	0.848	0.841
Model B	123	79	46	139	92	54	0.885	0.859	0.852
Model C	67	36	19	76	42	23	0.882	0.857	0.826
Model D	186	98	84	214	116	102	0.870	0.845	0.823
Model F	230	68	116	264	80	137	0.871	0.850	0.847

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölüm iki ana başlıktan oluşmaktadır. Bölümün ilk kısmında Abaqus'ta basit bir çubuk elemanın burkulma analizi ile ilgi yapılan araştırmaların sonuçları yer almaktadır. Kiriş-kolon elemanların kusurlu ve kusursuz durumları, farklı eleman tipleri ve kusur büyüklükleri için davranışları incelenmiştir. Bu parametreleri dikkate alarak farklı analiz metotları değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında DÇKUKS'lerin analiz sonuçları yer almaktadır. Bu sistemlerin kusursuz ve kusurlu durumlarındaki kapasite değişkenliklerinden bahsedilmiştir. Mesnetlenme durumları ve modül sayısının kusurlu Düzlemsel Çift Katlı Uzak Kafes Sistemlere etkileri incelenmiştir.

4.1. Abaqus'ta Basit Bir Çubuk Elemanın Burkulma Analizi

Uzak Kafes Sistemlerde her bir çubuk elemanın davranışı tüm yapının davranışını etkileyebilmektedir. Bu bağlamda sistemde kullanılan çubuk elemanların kuvvet-deplasman özelliklerinin bilinmesi son derece önemlidir. Bundan dolayı sistemlerde kullanılan boru enkesitli çubuk elemanların davranışlarının incelenmesi amacıyla, çubuk elemanlar "Abaqus paket programında modellenerek farklı parametrelere göre analizleri yapılmıştır. Merkezi aksenal basınç etkisi altında çubuk elemanların elastik eğilmeli burkulma analizleri teorik ve numerik olarak gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan malzeme davranışları, başlangıç eğrilik kusurları, farklı kusur tanımlama yaklaşımları dikkate alınarak çubuk elemanların burkulma değerleri bulunmuş ve burkulma sonrası davranışları incelenmiştir. Çubuk elemanların kapasitelerini etkileyen bir diğer parametre elemanların narinlik oranlarıdır. Elemanların merkezi aksenal basınç altındaki kapasite eğrisi farklı teorik ve numerik metotlar kullanılarak farklı narinlik oranlarına göre elde edilmiştir. Ayrıca, bu tezin ana konulardan olan başlangıç eğrilik kusurun elemanlar üzerindeki etkisi farklı parametreleri dikkate alarak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

4.1.1. Eleman Parça Sayısı (Mesh Sayısı)

Sonlu elemanlar analizinin hassasiyetini etkileyen önemli faktörlerden biri ‘Mesh’in büyüklüğüdür. Daha hassas bir ‘Mesh’ genellikle daha doğru analizlere yol açar, ancak aynı zamanda daha büyük hesaplama kaynakları ve zaman gerektirir. Bu çalışmada Mesh’in hassasiyetini incelemek amacıyla Şekil 4.1’de gösterilen bir ucu sabit diğer ucu kayıcı çubuk elemanı dikkate alınmıştır. Enkesit olarak, çapı 101,6mm ve cidar kalınlığı 10mm boru tipi kesit seçilmiştir. Elastisite modülü $2.1E+05\text{MPa}$ ve akma dayanımı 355MPa olan elasto-plastik çelik malzeme dikkate alınmıştır. Uzunluğu 3m dikkate alınan bu elemanın narinlik oranı 92 olarak hesaplanmıştır.

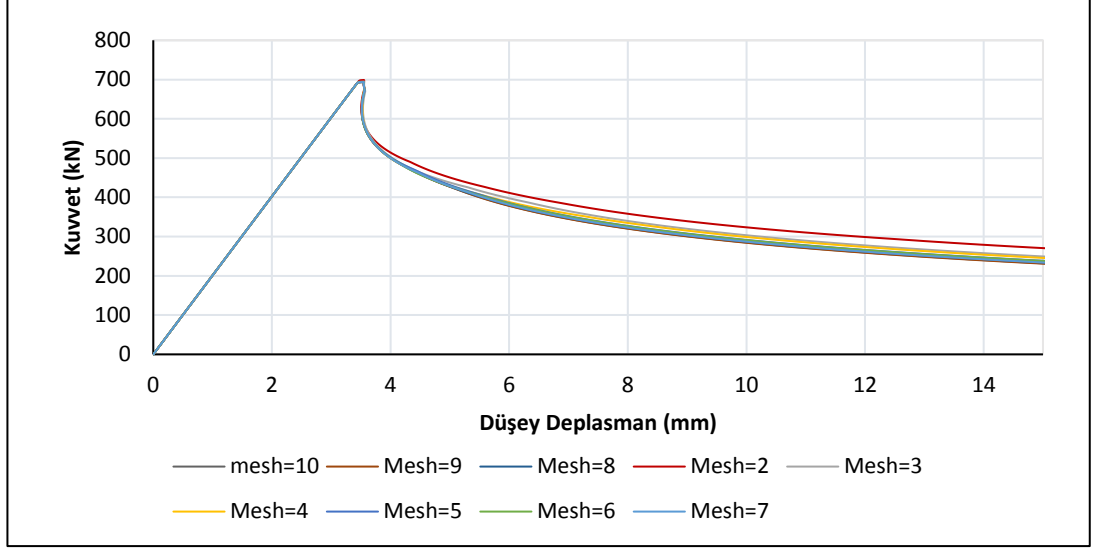


Şekil 4.1. Çubuk elemanın yükleme ve mesnetlenme koşulları

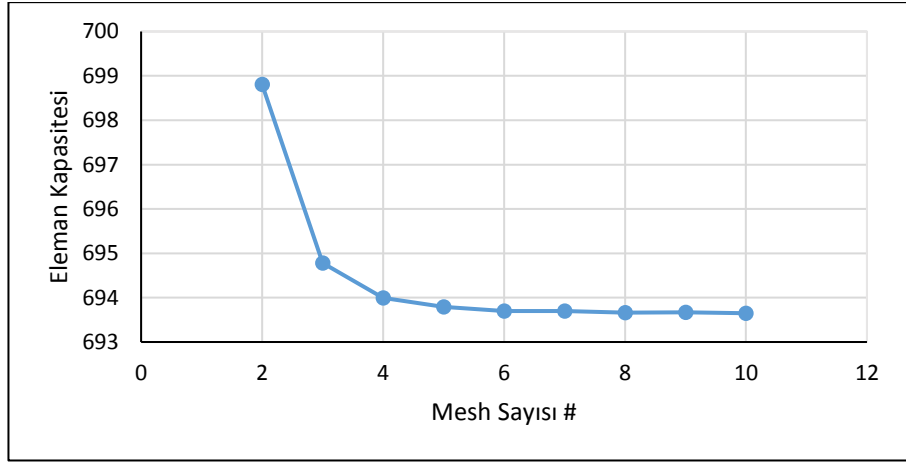
Eksenel basınç altında yük-deplasman grafikleri ‘Riks’ analiz metodu kullanılarak elde edilmiştir. Riks analizinin prensibi gereği elemanda burkulmanın gerçekleştirilebilmesi için, elemanın eksenel basınç kapasitesini veya davranışını önemli ölçüde değiştirmeyecek şekilde sabit küçük bir başlangıç geometrik kusuru uygulanmıştır. Başlangıç geometrik kusuru yarım sinüs dalgası şeklinde verilmiştir. Maksimum kusur değeri çubuk orta noktasında $\delta_0 = L/320000$ olarak hesaplanmıştır.

Yapılan doğrusal olmayan burkulma analizleri sonucunda, elde edilen kuvvet-deplasman grafiklerin tepe noktası elemanın burkulma kapasitesi olarak değerlendirilmiştir. Mesh

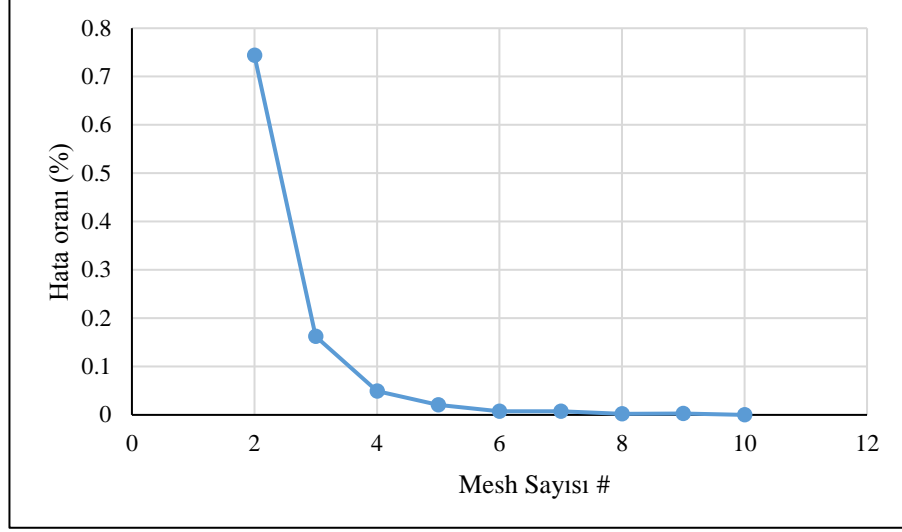
sayısının 9 farklı durumları için kuvvet-düsey deplasman grafikleri Abaqus analiz sonucu olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Farklı Mesh sayısına göre, elemanın burkulma kapasitesi değişkenliği şekil 4.3’te gösterilmiştir. Ayrıca parça boyutu büyüklüğünden dolayı kaynaklanabilecek hata oranı şekil 4.4’te gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Değişken Mesh Sayısına Göre Merkezi Eksenel Basınç Etkisi Altında Çubuk Elemanın Davranışı



Şekil 4.3. Mesh sayısına göre kolonun burkulma kapasitesi



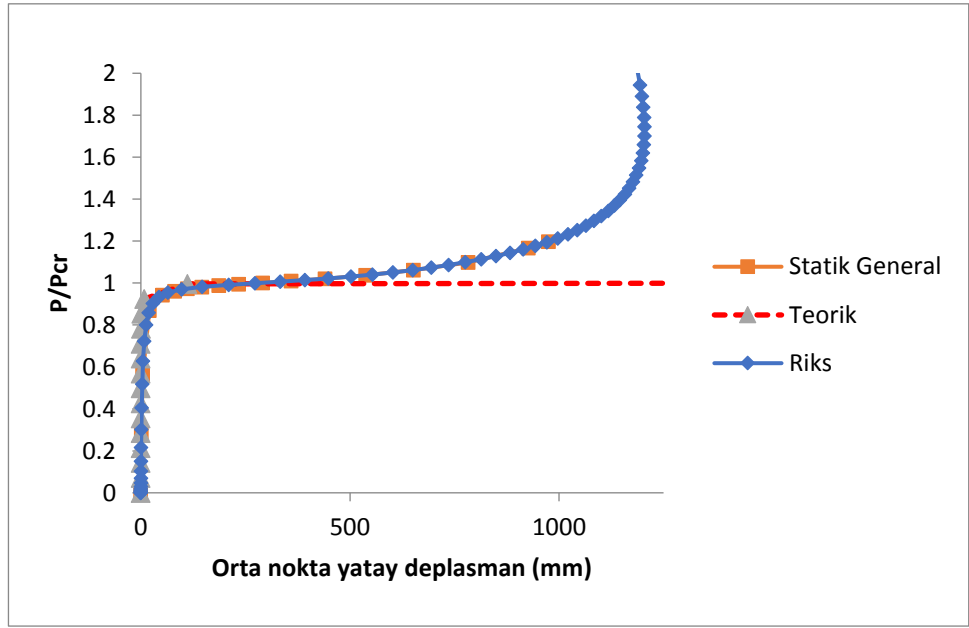
Şekil 4.4. Mesh sayısına göre oluşan hata oranları.

Şekil 4.3 ve 4.4'te gösterilen grafiklere göre elemanın analiz sonuçlarını parça boyutlarına göre önemli oranlarda etkilenmemiştir. Aynı zamanda şekil 4.2'deki grafiğe göre elemanın parça sayısı elemanın davranışını burkulmadan önce herhangi bir etkisi olmadığını fakat burkulma sonrası elemanın davranışına kısmen değişiklik getirdiğini göstermektedir. Elemanın narinlik oranı 92 ve inelastik bir kolon olduğundan teorik olarak elemanın aksel basınç kapasitesinin hesaplanması güçtür. Dolayısıyla burada sadece elemanın basınç kapasitesinin parça sayısının artmasıyla gösterdiği yakınsama ile yetinmiştir.

4.1.2. Merkezi Aksel Basınç Yüğü Altında Elastik Kolonların Analizi

Bu bölümde merkezi aksel basınç yükü altında elastik kolonların burkulma analizi sonuçları yer almıştır. Abaqus sonuçları, başlangıç eğrilik kusuru içeren bir kolon için Bölüm 2.7.2'de yer alan Denklem 2.2'den hesaplanan teorik bir çözümle karşılaştırılmıştır. Abaqus çözümlerinde başlangıç kusuruna sahip kolonlar için Riks ve Genel Statik analiz yöntemleri kullanılmıştır. Elemanların orta noktasındaki deplasman ve P/P_e grafikleri teorik çözümle kıyaslamak için çizilmiştir. Bu analiz için malzemenin elastik davranış sergilediği ve Elastisite Modülünün $2,1E+5$ MPa olduğu kabul edilmiştir. 2880 mm^2 alana ve 3 m uzunluğa sahip boru kesitli eleman kullanılmıştır.

Analiz sonuçlarından yola çıkarak P/P_{cr} ile çubuk elemanın orta noktasındaki deplasman arasındaki ilişki Şekil 4.5'te gösterilmiştir. P_e , Bölüm 2.7.1'de yer alan Denklem 2.1'den hesaplanmıştır. Abaqus çözümleri, teorik çözümle kuvvet-deplasman ilişkisinin ilk kısmı için, yaklaşık 500mm'lik bir orta nokta deplasmanına kadar iyi bir şekilde benzerlik gösterir. Bu değerden daha büyük kusurlarda, gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinde doğrusal olmayan davranış önemli hale geldiğinden, iki çözüm önemli ölçüde farklılık gösterir. Şekil 4.5'e göre yapılabilecek bir başka gözlem ise iki farklı Abaqus analiz yöntemlerine ait sonuçların çok yakından eşleştiğidir.



Şekil 4.5. Başlangıç eğrilik kusurlu inelastik kolonun aksenal basınç yükü altındaki kuvvet-deplasman ilişkisi

4.1.3. Merkezi Aksenal Basınç Yükü Altında Inelastik Kolonların Analizi

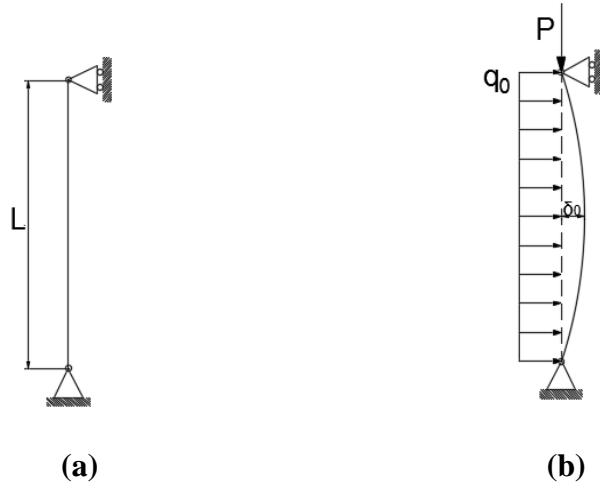
Farklı yöntemlerle tanımlanabilen geometrik kusurlar için çalışmanın bu aşamasında Fiktif Yük Uygulanarak Kusur Tanımlama metodu ve Statik Analiz Verilerinden Yararlanılarak Kusur Tanımlama metodu ile kusurlu geometri tanımlaması yapılmış, doğrusal olmayan malzeme davranışı ve ikinci mertebe etkileri dikkate alarak kolon analizi yapılmıştır. Her iki yöntem hem kendi içinde hem de birbirleriyle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Bu çalışmada Abaqus'teki bir kiriş-kolon eleman tipi olan Euler Bernouli (B23) elemanı dikkate alınmıştır. Fiktif Yük Uygulanarak Kusur Tanımlama metodunda (Fiktif Yükleme Metodu olarak anılacaktır.) elemana uygulanan burkulmayı tetikleyici yük olarak fiktif üniform yayılı yük (q_0) dikkate alınmıştır. Şekil 4.6'de görüldüğü gibi elemanın orta noktasında δ_0 kadar bir deplasman oluşturacak şekilde fiktif yük (q_0) uygulanmıştır. Statik Analiz Verilerinden Yararlanılarak Kusur Tanımlama metodunun (Başlangıç Eğrilik Yöntemi olarak anılacaktır) Fiktif Yük Uygulama metodu ile kıyaslanabilmesi için birinci analiz adımında elemanın orta noktasında δ_0 kadar bir deplasmanı oluşturacak q_0 yayılı yükü uygulanmış olup (Şekil 4.7.b) ikinci adımda deforme olmuş (eğriliğe sahip) modele merkezi aksenal basınç kuvveti uygulanmıştır (Şekil 4.7.d). Başlangıç eğrilik metodu için hazırlanmış kiriş-kolon elemanın mesnetlenme tipi ve yükleme durumu Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

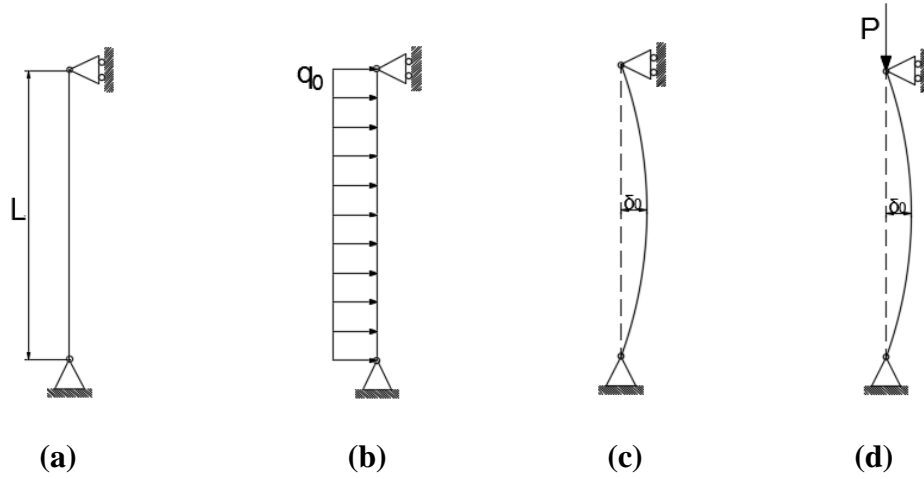
Dikkate alınan boru kesitli çubuk elemanın geometri ve malzeme özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Elemanlar sabit bir uzunluğa ve kesit alanına sahiptir. Bu sayede bütün analizler sabit bir narinlik oranı için yapılmaktadır.

Çizelge 4.1. Kiriş-kolon elemanın geometrik ve malzeme özellikleri.

A (mm ²)	D (mm)	t (mm)	L (mm)	E (MPa)	F _y (MPa)	Narinlik oranı (λ)
2880	101,6	10	3000	2,1E+5	355	92



Şekil 4.6. Kiriş-kolon tipi elemana q_0 fiktif yükünün uygulanması



Şekil 4.7. Statik Analiz Verilerinden Yararlanılarak kusur tanımlama metodunun yükleme durumu

Fiktif yükün (q_0) büyüklüğü ise sabit bir eleman uzunluğu ve değişken deplasman değerlerine (δ_0) bağlı olarak aşağıdaki formülden yararlanılarak hesaplanmıştır.

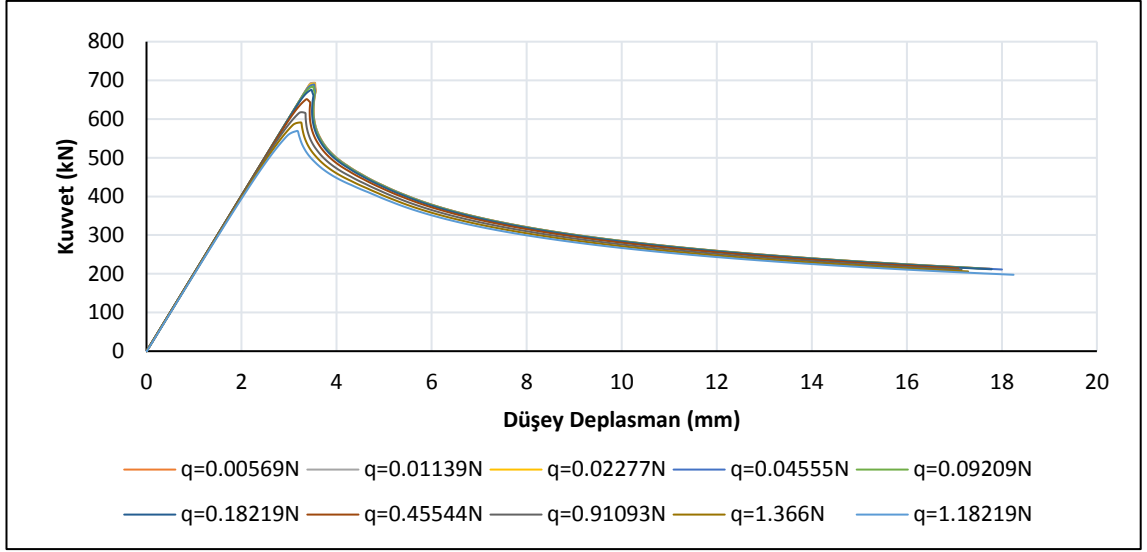
$$q_0 = \frac{384EI}{5L^4} \times \delta_0 \quad (4.1)$$

Elemanların merkezi aksenal basınç altındaki burkulma kapasiteleri (P_n) her iki kusur uygulama metodu dikkate alınarak, değişken q_0 değerleri ve onlara karşılık gelen δ_0 için kuvvet kontrollü “Riks” analiz metodu ile bulunmuştur (Çizelge 4.2).

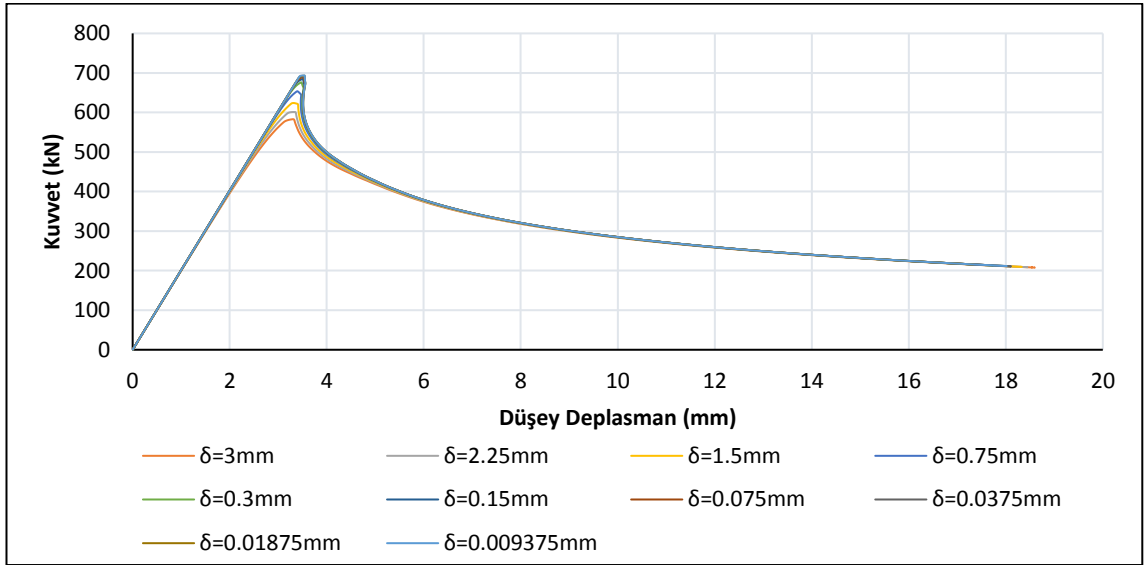
Çizelge 4.2. Farklı kusur tanımlama metodların elemanın kapasitesine etkisi

Analiz No	(L/ δ_0)	δ_0 (mm)	q_0 (N)	P_n (kN)		
				Fiktif Yükleme Durumu	Statik Analiz Verilerinden Yararlanılarak	Hata Oranı (%)
1	1000	3	1,821	569,256	582,950	2.3491
2	1333	2,25	1,366	591,160	601,154	1.6625
3	2000	1,5	0,910	617,687	623,893	0.9947
4	4000	0,75	0,455	651,391	653,625	0.3418
5	10000	0,3	0,182	675,655	676,120	0.0688
6	20000	0,15	0,091	684,552	684,775	0.0326
7	40000	0,075	0,045	689,323	689,432	0.0158
8	80000	0,0375	0,022	691,832	691,834	0.0003
9	160000	0,01875	0,011	693,037	693,038	0.0001
10	320000	0,009375	0,005	693,649	693,655	0.0009
11	638977	0,004695	0,002	x	x	x

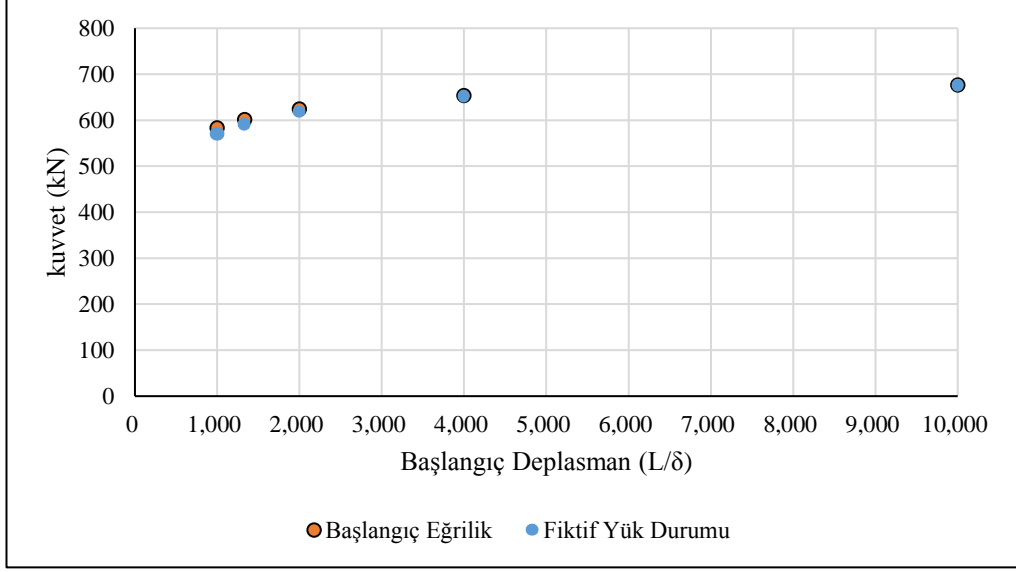
Çizelge 4.2'deki veriler ışığında uygulanan kusurun miktarı arttıkça her iki yöntemde eleman kapasitesinde bir azalma görülmektedir. Aynı zamanda elemana belli bir kusur değerinden daha küçük bir kusur verilince burkulma oluşmadığı için basınç kuvveti kapasitesi bulunamamaktadır. Fiktif Yükleme ve Başlangıç Eğrilik metoduyla tanımlanan kusurlu geometriye sahip inelastik kolonun 10 analiz sonucuna göre kuvvet-deplasman grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.8 ve 4.9). Ayrıca Fiktif Yükleme ve Başlangıç Eğrilik metodların eleman kapasitesine etkisi karşılaştırılması Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Değişken fiktif yüklü kiriş-kolon elemanın merkezi eksenel basınç altındaki davranışı



Şekil 4.9. Değişken başlangıç eğrilikli kiriş-kolon elemanın merkezi eksenel basınç etkisi altındaki davranışı



Şekil 4.10. Fiktif Yükleme ile Başlangıç Eğrilik durumlarının karşılaştırılması

Değerlendirme

Kusur miktarının küçük oranlarda olması durumunda burkulmayı tetikleyici metot olarak fiktif yük veya başlangıç eğrilik kusuru verilmesi arasında önemli bir fark gözlemlenmemiştir. Öte yandan, Fiktif Yük uygulanarak ve Statik Analiz verilerinden yararlanılarak kusur tanımlama metotları uygulandığı zaman elemanların kapasiteleri arasındaki fark, uygulanan fiktif yük / başlangıç deplasmanı ile paralel bir şekilde artmaktadır (Şekil 4.10). Bu farkın oluşma sebebi elemanda yayılı yük olarak tanımlanan fiktif yükten doğan momentlerdir. Fiktif yükün büyük olması, büyük momentler oluşturmakta ve dolayısıyla hata oranı büyümektedir. Ancak küçük değerlerde göz ardı edilebilecek bir moment oluştuğundan eleman kapasitesi önemli ölçüde etkilenmemekte ve böylece başlangıç eğriliği verilmiş eleman ile aynı kapasiteye sahip olmaktadır.

4.1.4. Merkezi Eksenel Basınç Etkisi Altında Elemanların Kapasite Eğrisi

Elemanların merkezi eksenel basınç kuvveti altında kapasiteleri ve davranışları narinliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Eksenel basınç kapasite eğrisi, kesit ve malzeme özelliklerinin sabit tutulması ve farklı narinlikler altında doğrusal olmayan burkulma veya burkulma sonrası (Post-Buckling) analizlerin yapılması ile elde edilebilir.

Narin elemanların aksenal basınç kapasite eğrisinde en yaygın olarak bilinen yöntemlerden birisi Euler-Bernouli elastik burkulma yöntemi olarak söylenebilir. Oysa, bu yöntemdeki kullanılan denklemler gerçek elemanlarda geçerli olmayan kabuller içermektedir. Hooke kanununa uyan malzemenin bulunması, prizmatik bir çubuk, artık gerilmenin mevcut olmaması, elemanların ideal düzlükte olması ve küçük deplasman teorisinin geçerli olması yapılan kabullerdendir. Ancak, bilindiği gibi bu kabullerin gerçek yapı elemanlarında mevcut olması veya gerçekleştirilmeleri çok zor ve hatta imkânsız olabilir. Dolayısıyla, yapılan araştırmalar sonucunda deneysel ve teorik verilere dayanarak AISC tarafından elemanların tasarımında gerçek davranışların dikkate alınmaları için, elemanların narinlik oranlarına göre elastik ve elastik olmayan burkulma kapasitesi olarak merkezi aksenal basınç kuvveti altındaki elemanlar için kapasite eğrisi önerilmiştir (AISC 2005b, Galambos 2008).

Çizelge 4.3'te gösterilen enkesit geometri ve malzeme özelliklerine sahip bir çubuk elemanı, Abaqus sonlu elemanlar paket programı kullanılarak, Riks analiz metodu ile farklı narinlik oranlarına göre aksenal basınç kapasiteleri elde edilmiştir. Elemanın mesnetlenme koşulları ve yükleme tipi Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

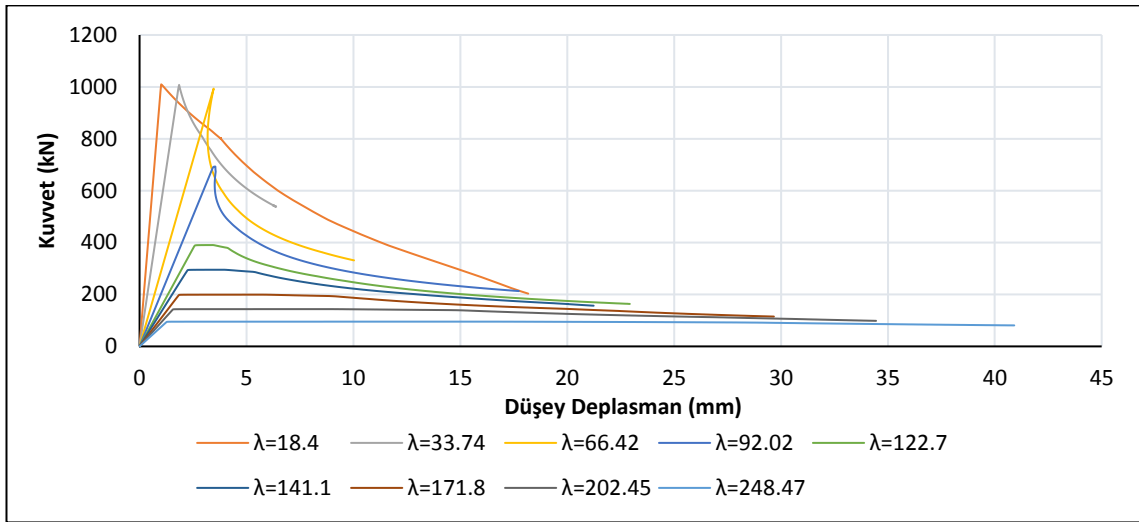
Çizelge 4.3. Malzeme ve enkesit geometri özellikleri

A (mm ²)	D (mm)	t (mm)	E (MPa)	F _y (MPa)
2880	101,6	10	2,1E+5	355



Şekil 4.11. Çubuk elemanı yükleme tipi ve mesnetlenme koşulları

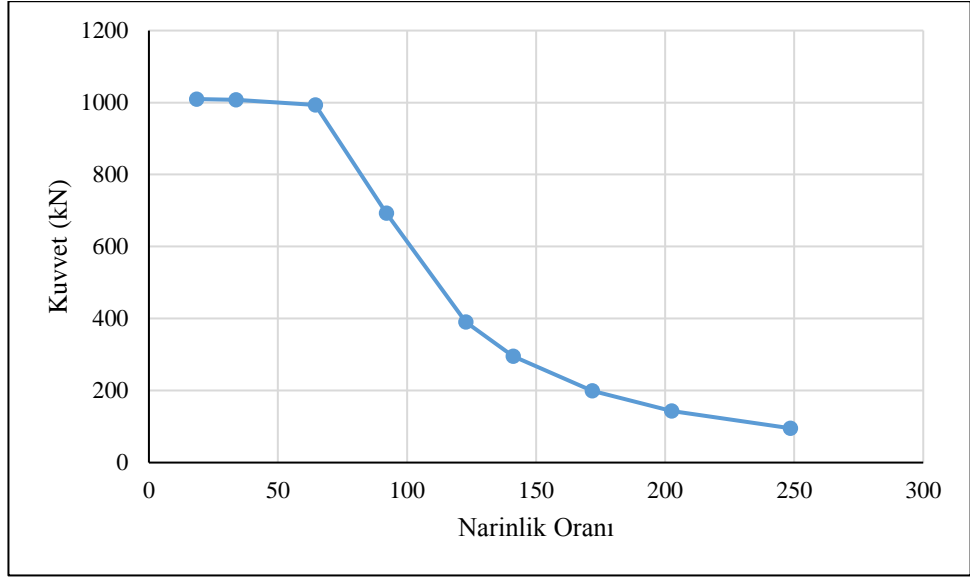
Değişken narinlik oranlarındaki elemanların doğrusal olmayan analiz sonuçlarının kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Kuvvet-deplasman grafiğinde eğrilerin tepe noktası elemanların burkulma kapasitesi olarak kabul edilmiştir. Çubuk elemanın uzunluğunun değişmesiyle narinlik oranları ve verilen minimum başlangıç eğrilik kusurları Çizelge 3.4’te gösterilmektedir. Burkulma kapasitelerinden yararlanılarak elemanın kapasite eğrisi çizilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.12. Farklı Narinliğe sahip elemanların doğrusal olmayan burkulma analizi davranışı

Çizelge 4. 4. Kusur miktarları ve narinlik oranlarına göre elde edilen burkulma kapasitesi

Analiz No	L (mm)	L / δ_0	δ_0 (mm)	Narinlik Oranı (λ)	P_{cr} (kN)
1	600	32000	0,01875	18,40	1009,799
2	1100	20000	0,055	33,74	1007,635
3	2100	16000	0,13125	64,41	993,3633
4	3000	160000	0,01875	92,02	693,0369
5	4000	160000	0,025	122,69	390,4909
6	4600	160000	0,02875	141,10	295,3903
7	5600	160000	0,035	171,77	199,4043
8	6600	160000	0,04125	202,45	143,6105
9	8100	160000	0,050625	248,46	95,39565



Şekil 4.13. Abaqus'ta kolon kapasite eğrisi

Değerlendirme

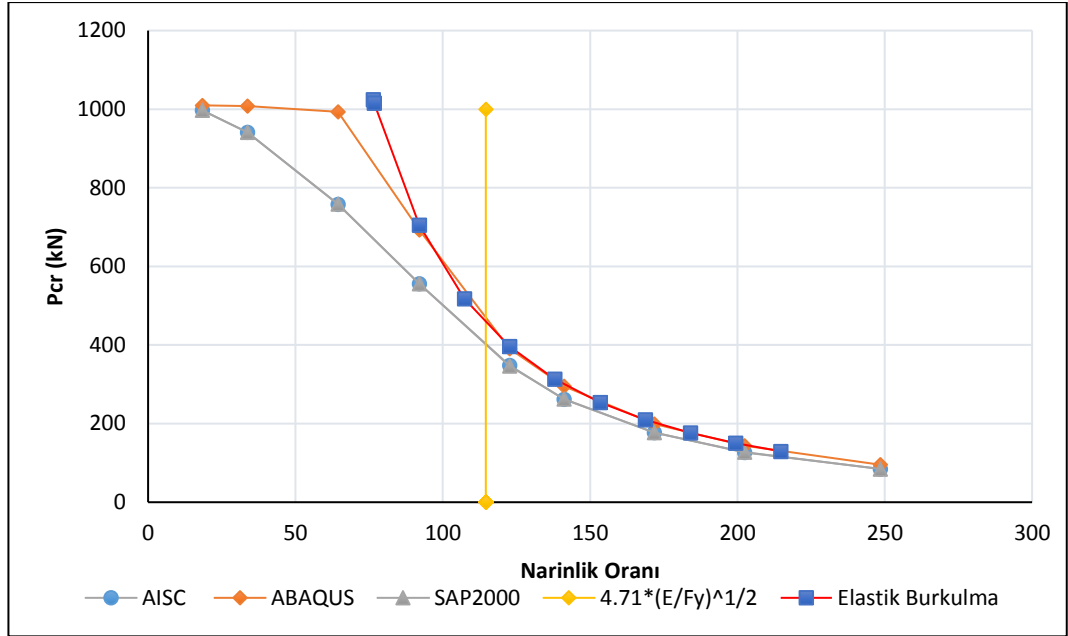
Abaqus'ta, Riks metodu ile AISC (Analitik) ve Euler-Bernouli elastik burkulma kapasite eğrisi Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Bu grafikte, Euler Bernouli elastik burkulma teorisine göre elde edilen kapasite eğrisi, elastik olmayan burkulma durumlarında diğer yöntemlere göre daha yüksek kapasite değerlerine sahiptir. Elastik burkulma durumunda ise, Euler Bernouli kapasite eğrisi ile Abaqus'te Riks analiz metoduyla elde edilen kapasite eğrisi önemli oranda yakınsaklık göstermektedir. Abaqus çözümü ile Euler Bernouli kolon burkulma kapasite eğrilerin, elastik olmayan burkulma durumlarında oluşan farklılık Abaqus analizlerinde doğrusal olmayan malzeme modelinin ve ikinci mertebe moment etkilerinin dikkate alınmasıdır. Ayrıca, AISC ve SAP2000 ile elde edilen kapasite eğrileri, birbirleriyle tamamen örtüşmektedir. Bu yöntemler ile elde edilen kapasite eğrisi, diğer kapasite eğrilerin altındadır. Bunun sebebi AISC ve SAP2000'nin kolon tasarım kapasite eğrisini çıkartırken başlangıç eğriliği ve artık gerilme gibi kusurları dikkate alınmasıdır. Farklı durumlardaki çubuk elemanların merkezi aksenal basınç kapasiteleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Bunların yanı sıra, Şekil 4.14'te gösterildiği gibi farklı kapasite eğrileri arasındaki fark oranları narinliğin azalmasıyla artmaktayken, narinliğin artmasıyla fark oranları azalmaktadır.

Çizelge 4.4'e göre Riks analiz yöntemi kullanıldığında farklı narinlik oranları için tetikleyici minimum fiktif deplasman değerlerinin (δ_0) değişkenlik göstermektedir. Bu farklılık düşük narinlik oranları için artmakta ve narinliğin artmasıyla azalma göstermiştir.

Çizelge 4.5. Farklı narinlik oranlarına göre elde edilmiş kapasite değerleri

L (mm)	Narinlik Oranı(λ)	Elastik/Inelastik	AISC (kN)	ABAQUS (kN)	SAP2000 (kN)	Elastik Burkulma (kN)
600	18,40	Inelastik	997	1009,79	997,04	1009,799
1100	33,74	Inelastik	941,5	1007,63	941,40	1007,635
2100	64,41	Inelastik	758	993,36	758,40	993,3633
3000	92,02	Inelastik	556	693,03	556,22	693,0369
4000	122,69	Elastik	348	390,49	346,96	390,4909
4600	141,10	Elastik	262	295,39	262,35	295,3903
5600	171,77	Elastik	177	199,40	177,02	199,4043
6600	202,45	Elastik	127	143,61	127,44	143,6105
8100	248,46	Elastik	84,7	95,39	84,61	95,39565



Şekil 4.14. Kolon burkulma kapasitelerinin farklı yöntemler için karşılaştırılmaları

4.1.5. Elemanlarda Başlangıç Eğrilik Kusurlarının İncelenmesi

ABAQUS'ta doğrusal olmayan analizlerde Riks metodunun yanı sıra Genel statik analiz metodu da kullanılabilir. Özellikle Uzak Kafes Sistemler gibi karmaşık sistemlerde "Riks" metodu sonuç vermezken "Genel Statik" analiz metodu ile sonuç alınabilir. Bu çalışma çerçevesinde "Riks" ile "Genel Statik" yöntemi farklı narinlik oranları, kiriş-kolon eleman tipleri ve kusur miktarları dikkate alınarak kıyaslanmıştır. Bu kıyaslanmanın amacı, "Genel statik" metodunun hangi durumlarda kullanılabilirliğini belirlemektir.

Narinlik oranları 149, 128, 120 ve 110 olan elemanlar uygulanan kusur miktarı, eleman tipi ve analiz metodu gibi parametreleri dikkate alınarak Abaqus'te analiz edilmiştir. Eksenel basınç kuvveti altında eleman karakteristik basınç kuvveti dayanımları (P_n) sırasıyla Çizelge 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. Çizelgelerde ayrıca elemanların elastik kolon burkulma kapasiteleri (P_e) ile çekme kuvveti altında akma kuvvetleri (P_y) de yer almıştır.

Çizelge 4.6. Elemanın narinlik oranı 149 iken aksenal basınç kapasitesinin değişkenliği.

$P_e=197,78\text{kN}$		$P_y=753\text{kN}$			
$\lambda=149$		P_n (kN)			
Kusur (L/ δ_0)	δ_0 (mm)	Genel statik		Riks	
		B21	B23	B21	B23
25000	0,1	198,0344849	196,559875	198,389053	196,944458
12500	0,2	196,8566895	195,739761	197,633956	196,184753
8333	0,3	194,8856659	194,776428	196,878707	195,429733
6250	0,4	194,3467255	193,906005	196,118011	194,688461
5000	0,5	193,8088074	193,015747	195,418548	193,969604
4166	0,6	193,2719574	191,845321	194,658752	193,236679
3571	0,7	192,7351685	191,297226	193,952606	192,536560
3125	0,8	192,1990967	190,780105	193,255966	191,836608
2777	0,9	191,6640625	189,665512	192,541015	191,153457
2500	1	191,130188	189,245193	191,857940	190,477432
1250	2	185,7390747	184,517349	185,872146	184,518051
833	3	180,6853333	179,368316	181,042175	179,586288
500	5	170,8673553	169,583587	172,132385	170,927383
250	10	155,0479279	153,730133	155,033538	153,581680

Çizelge 4.7. Elemanın narinlik oranı 128 iken aksenal basınç kapasitesinin değişkenliği

$P_e=109\text{kN}$		$P_y=306\text{kN}$			
$\lambda=128$		P_n (kN)			
Kusur (L/ δ_0)	δ_0 (mm)	Genel statik		Riks	
		B21	B23	B21	B23
25000	0,1	306,4434814	108,6461945	109,2721024	108,6856689
12500	0,2	108,6886597	108,1111145	108,7986984	108,2100601
8333	0,3	108,2933807	108,2933807	108,3297424	107,7430191
6250	0,4	107,84095	107,84095	107,8629303	107,2862854
5000	0,5	107,3889923	106,843956	107,4168701	106,8416901
4166	0,6	106,9619598	106,3946915	106,9944763	106,3958435
3571	0,7	106,5304184	105,9644241	106,5514297	105,9847794
3125	0,8	106,0988922	105,5317001	106,1597137	105,5797424
2777	0,9	105,6691132	105,10392	105,7068558	105,138588
2500	1	104,4565201	103,7789383	105,3424301	104,7755737
1250	2	101,2603149	100,6344376	101,5057068	100,9152145
833	3	98,19376373	97,62671661	98,21477509	97,65205383
500	5	92,43409729	91,89343262	92,5585556	92,03703308
250	10	81,49326324	80,87606049	82,36886597	81,85378265

Çizelge 4. 8. Elemanın narinlik oranı 120 iken aksenal basınç kapasitesinin değişkenliği

$P_e=261.6\text{kN}$		$P_y=646\text{kN}$			
$\lambda=120$		P_n (kN)			
Kusur (L/δ_0)	δ_0 (mm)	Genel Statik		Riks	
		B21	B23	B21	B23
25000	0,1	258,638	256,6924133	261,5217896	260,054901
12500	0,2	254,042	253,5931549	260,1295776	258,659851
8333	0,3	254,684	252,8847046	258,7985229	257,317352
6250	0,4	253,826	251,9684296	257,4458008	255,993682
5000	0,5	252,895	251,0331268	256,1434021	254,712554
4166	0,6	251,937	250,1285095	254,934967	253,474334
3571	0,7	251,003	249,2124329	253,7975159	252,290344
3125	0,8	250,078	248,2605743	252,6329193	251,147445
2777	0,9	249,162	247,4093781	251,5414124	250,054687
2500	1	248,254	246,5218964	250,4480133	248,960266
1250	2	239,606	238,0484619	240,4418945	239,052627
833	3	231,588	230,1846008	231,7566376	230,443573
500	5	217,738	215,8664703	217,7055054	216,238555
250	10	189,857	185,5243988	190,001358	190,775070

Çizelge 4. 9. Elemanın narinlik oranı 110 iken aksenal basınç kapasitesinin değişkenliği

$P_e=68\text{kN}$		$P_y=142.75\text{kN}$			
$\lambda=110$		P_n (kN)			
Kusur (L/δ_0)	δ_0 (mm)	Genel Statik		Riks	
		B21	B23	B21	B23
25000	0,1	142,6648	142,4542	68,15821	67,7542
12500	0,2	142,5761	142,4855	67,71143	67,1855
8333	0,3	142,4878	142,4542	67,2959	66,8542
6250	0,4	70,40715	70,03530	66,87451	66,1353
5000	0,5	70,92817	70,51718	66,47445	66,1058
4166	0,6	64,77187	64,52085	66,10587	65,7588
3571	0,7	64,36082	64,11170	65,75885	65,3335
3125	0,8	65,4513	65,13938	65,43357	65,1228
2777	0,9	65,08234	64,80297	65,12985	64,2472
2500	1	64,81115	64,47267	64,84726	62,8429
1250	2	61,88302	61,55669	61,84290	59,7467
833	3	59,41869	59,11389	59,25774	59,1138
500	5	55,21582	54,94931	55,23325	54,7049
250	10	46,93241	46,70677	48,49361	46,2857

Değerlendirme:

Bu çalışmanın amacı, elemanların kapasitelerini etkilemeyecek ve aynı zamanda burkulmayı tetikleyebilecek başlangıç eğrilik kusurun büyüklüğünü tespit etmektir. Çizelge 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9 incelendiğinde dört farklı narinlik oranı için de belli kusur değerlerinden sonra kusur büyüklüğü arttıkça eleman kapasitesinde bir azalma olmaktadır. Bununla beraber çok küçük eğrilik kusur değerleri için burkulma oluşmayabilmekte ve çubukta basınçta akma meydana gelmektedir.

Minimum kusur değeri narinlik oranı, analiz metodu ve kullanılan eleman tipine göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin; narinlik oranı 110, eleman tipi B21 ve “Genel Statik” analiz metodu uygulandığı zaman, minimum kusur değeri olarak $L/6250$ kullanılması uygun görünmektedir. Çünkü bu kusurdan daha küçük değerler için elemanda basınçta akma oluşmakta ve $L/6250$ den daha büyük kusurlar için elemanın kapasitesi etkilenmektedir. Narinlik oranı 149, eleman tipi B21 ve “Genel Statik” analiz metodu kullanıldığında ise minimum kusur değeri için $L/25000$ değerinin alınması uygun olacaktır. Narinlik oranının artmasıyla verilecek minimum kusur değerinin düşmesine neden olduğunu göstermektedir. Çizelgelerde gösterildiği gibi, elemanların basınç kapasiteleri aynı kusur büyüklüğü ve eleman tipleri için analiz metotlarına göre değişkenlik göstermektedir. Bilindiği gibi “Riks” analiz metodu diğer metotlara göre kusurlu elemanların doğrusal olmayan analizi için hassasiyeti ve güvenilirliği yüksektir. Dolayısıyla, “Genel Statik” analiz metodunun burkulma sonrası analizlerdeki (Post-Buckling Analysis) hassasiyetini ölçmek için “Riks” metoduyla karşılaştırılabilir. “Genel Statik” analiz metodu ile “Riks” analiz metodu karşılaştırıldığında, narinlik oranının artmasıyla iki yöntem arasındaki farkın düştüğü görülmektedir. “Genel Statik” analiz metodu narinlik oranının artmasıyla daha hassas bir sonuç vermektedir.

4.2. Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerinin Doğrusal Olmayan Analizleri

Bu çalışmada başlangıç eğrilik kusurunun Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesine etkisi, mesnetlenme koşulları ve modül sayısı parametreleri dikkate alınarak araştırılmıştır. Bu parametrelere göre yapı modellerinin

geometrik özellikleri, yükleme tipi, mesnetlenme koşulları ve isimlendirilmesi Kısım 3.6'da açıklanmıştır. Başlangıç eğrilik kusurun tanımlanması için Kısım 3.5.3'te açıklanan yöntem kullanılmıştır. Rastgele kusurlu elemanın modellenmesi Kısım 3.6.2'de belirtildiği şekilde yapılmıştır. Kısım 3.4.2'de açıklanan “Stabilizasyon ile Statik Analiz” yöntemi kullanılarak yapı modellerinin üst katmanındaki düğüm noktalarına düşey artımlı yükleme yapılmıştır. Yapı modellerin tasarımında Kısım 4.1.5'ten edinen bilgilere dayanarak narinlik oranı 115 olarak sabit bir değer seçilmiştir. Kusursuz modellerde bu narinlik oranı için burkulmayı tetikleyici olarak $L/6250$ oranında eleman eğrilik kusuru verilmiştir. Kusurlu modellerde ise, gerçek eğrilik kusuru gelişini güzel bir şekilde ek olarak verilmiştir. Aynı zamanda, kısım 3.6.4'te açıklandığı gibi farklı modellerin aynı eleman grupları için kritik elemanın kapasite oranları sabit alınmıştır. DÇKUKS'nin modellenmesinde kısım 3.6.1'de açıklandığı gibi B31 eleman tipi seçilmiştir. Birleşim noktaları elemanlar moment aktarmayacak şekilde mafsallı olarak modellenmiştir.

Çalışmada dikkate alınan parametreler (mesnetlenme durumu ve modül etkisi) için kusurlu durumda, üretilen her bir modelde farklı kusur dağılımlarını içeren 30'ar adet analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler Abaqus paket programında “Genel Statik” analiz metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz sonucunda, modelin mesnet reaksiyonlarının toplamı sisteme etkileyen yük olarak ve sistemin alt tabakasının orta noktasında oluşan düşey deplasman da deplasman değerlerini gösterecek şekilde yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerdeki tepe noktası maksimum sistem kapasite değerlerini göstermektedir.

4.2.1. Mesnetlenme Koşullarının Etkisi

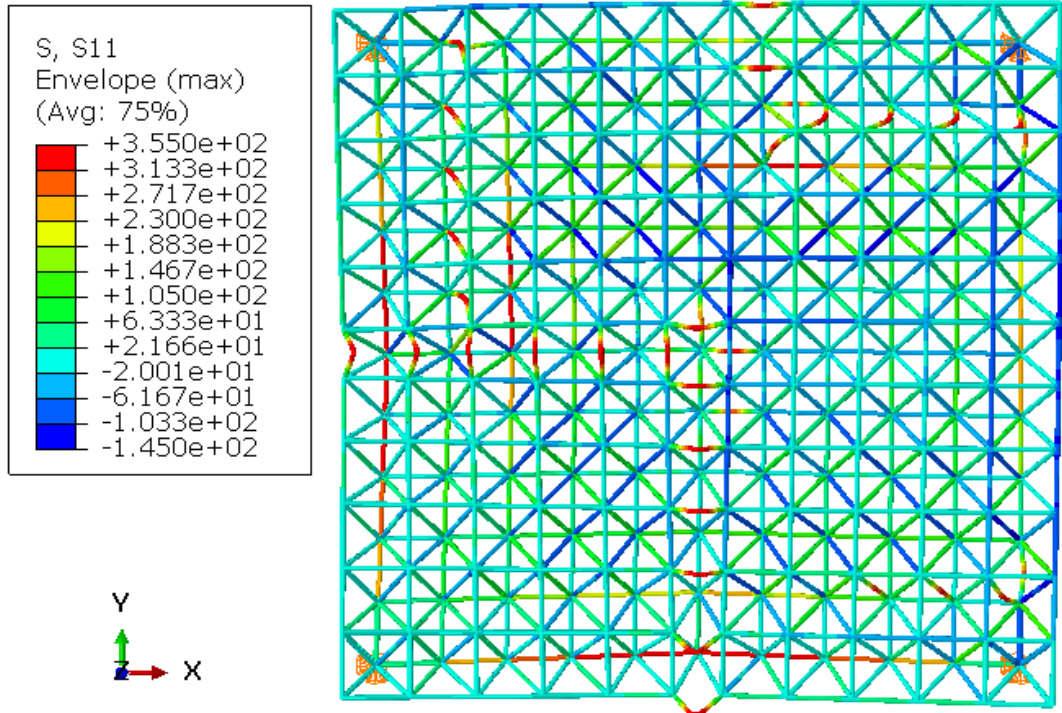
Bu bölümde, mesnet durumlarını dikkate alarak, başlangıç eğrilik kusurlarının DÇKUKS in yük taşıma kapasitelerine etkisi çalışılmıştır. Bu amaçla farklı aynı boyutlarda farklı mesnetlenme durumlarına sahip DÇKUKS modelleri oluşturulmuştur. Bu oluşturulan modellerin özellikleri Kısım 3.6'ta tanıtılmıştır. Oluşturulan modellerdeki bütün mesnetler sabit mesnetlerdir. Model A dört köşeden mesnetli, Model B iki kenardan mesnetli ve Model C ise dört kenardan sabit mesnetli sistemlerdir.

Kısım 3.4.2’de açıklanan “Stabilizasyon ile Statik Analiz” yöntemi kullanılarak yapı modellerinin üst katmanındaki düğüm noktalarına düşey artımlı yükleme yapılmıştır. Yükleme kapasitesine ulaşıldıktan sonra yapı önemli yük kaybına ulaşmaya kadar devam ettirilmiştir. Bütün modellerin yük deplasman grafikleri çizilmiştir.

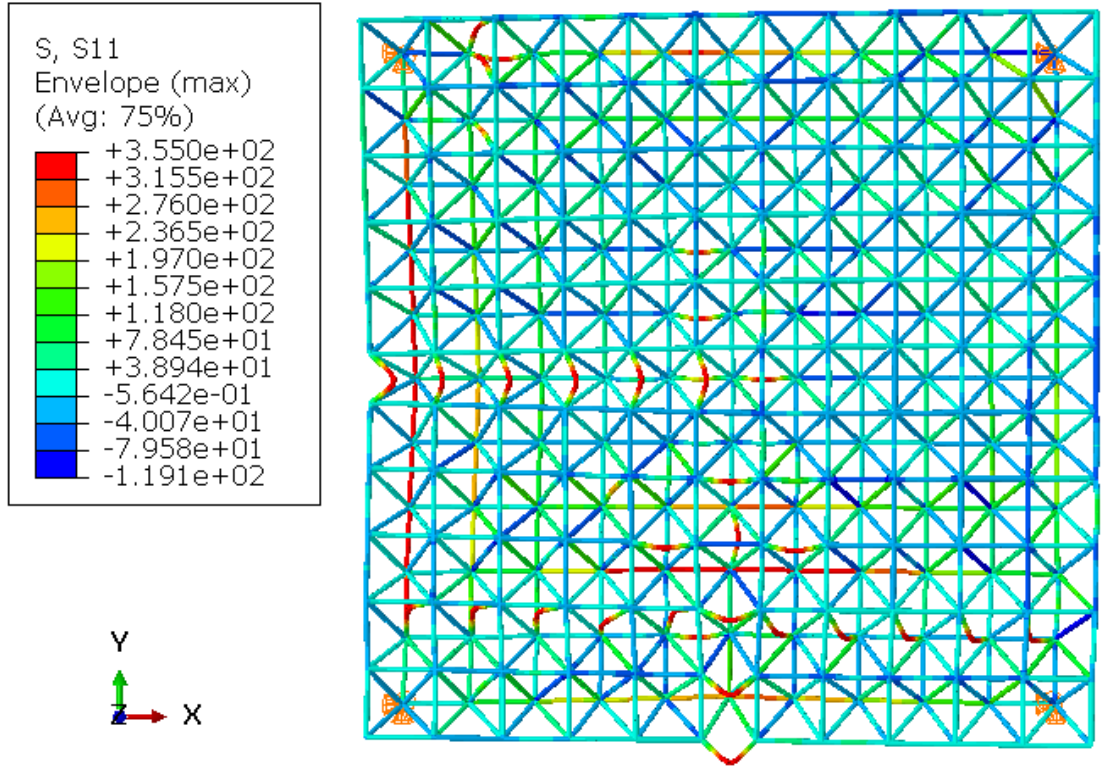
Yapılan yükleme altında elemanların burkulması sonucunda sistemde güç tükenme yaşanmıştır. Güç tükenme veya göçme durumunu gösteren yük-deplasman grafikleri çizilmiştir.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16, Model A’nın doğrusal olmayan analizler sonucunda sırasıyla kusursuz ve kusurlu durumlarındaki gerilme dağılımlarını göstermektedir.

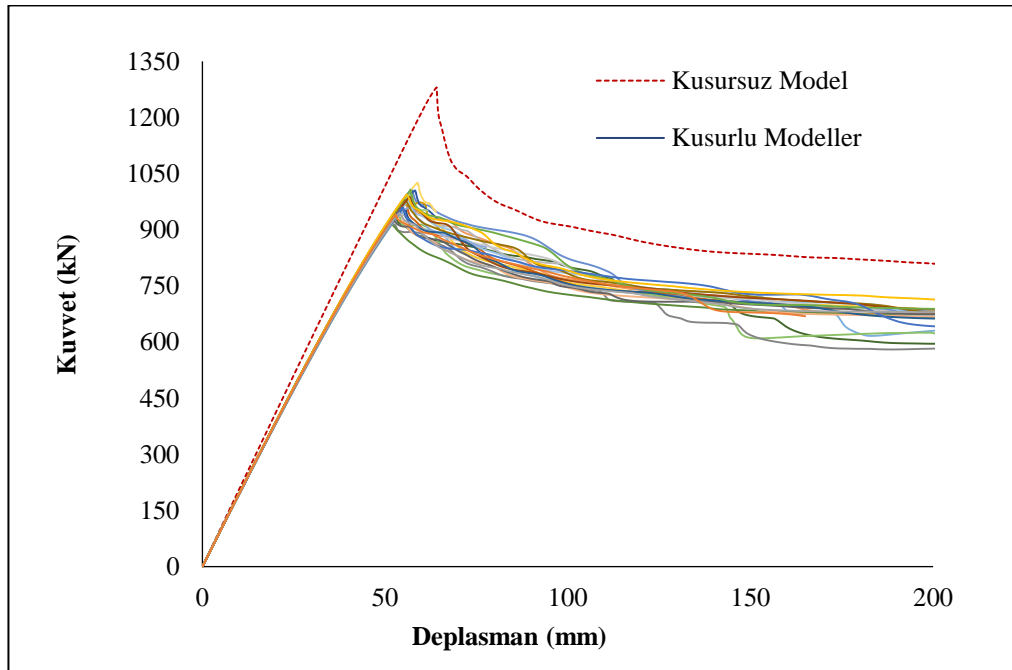
Model A’de doğrusal olmayan analiz sonucunda kusursuz ve kusurlu durumları için elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki tepe noktaları sistemin maksimum taşıyabileceği yük kapasitesini göstermektedir.



Şekil 4.15. Model A için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



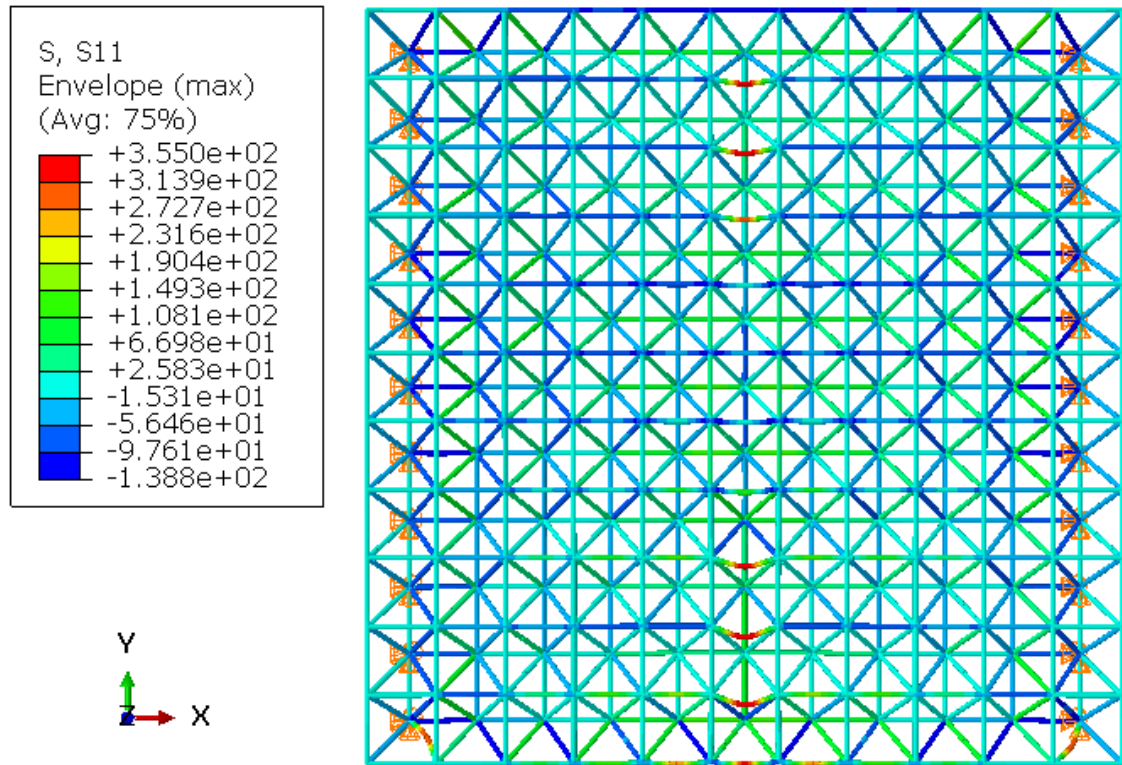
Şekil 4.16. Model A için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



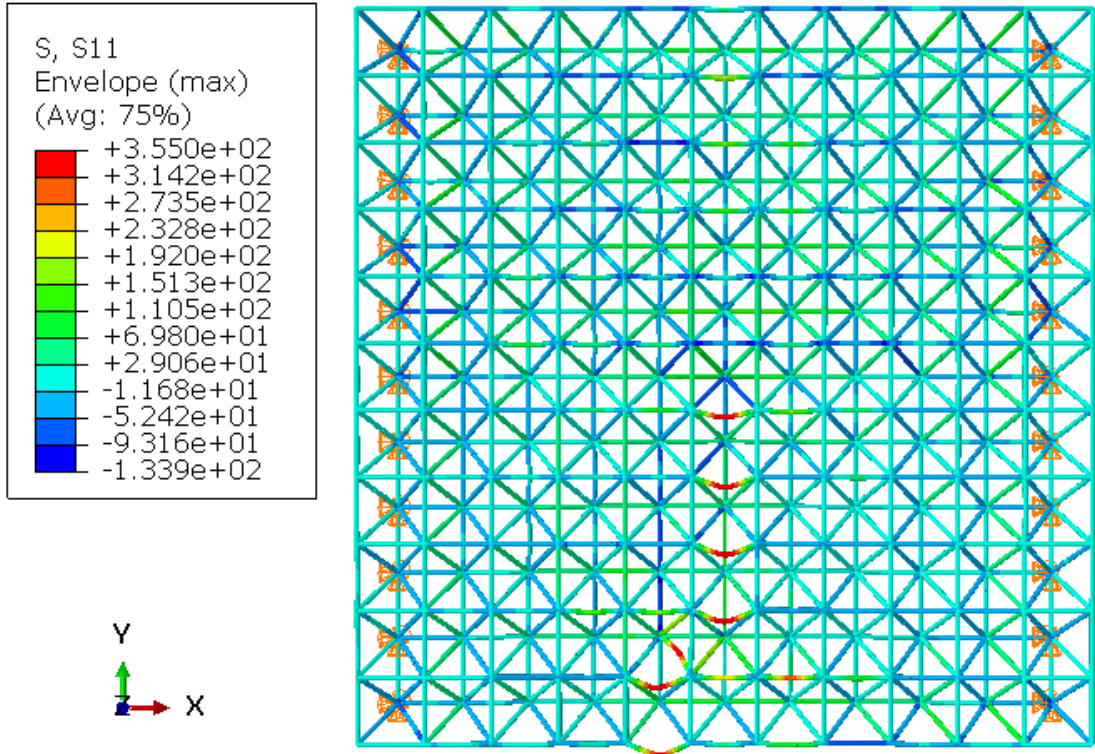
Şekil 4.17. Model A'ya ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19, Model B'nin doğrusal olmayan analizler sonucunda sırasıyla kusursuz ve kusurlu durumlarındaki gerilme dağılımlarını göstermektedir.

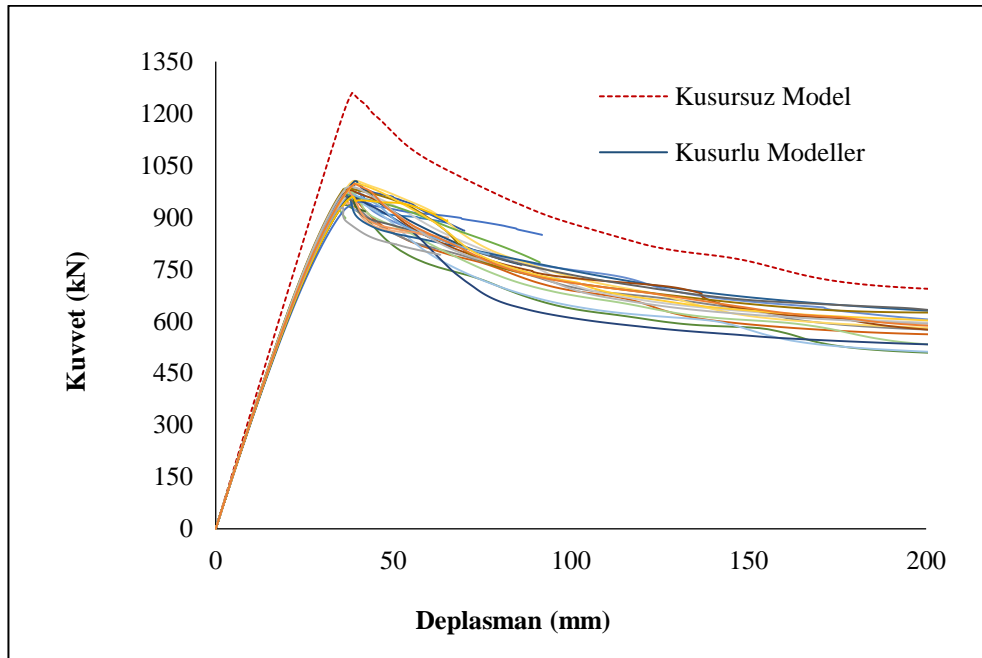
Model A'de doğrusal olmayan analiz sonucunda kusursuz ve kusurlu durumları için elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki tepe noktaları sistemin maksimum taşıyabileceği yük kapasitesini göstermektedir.



Şekil 4.18. Model B için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



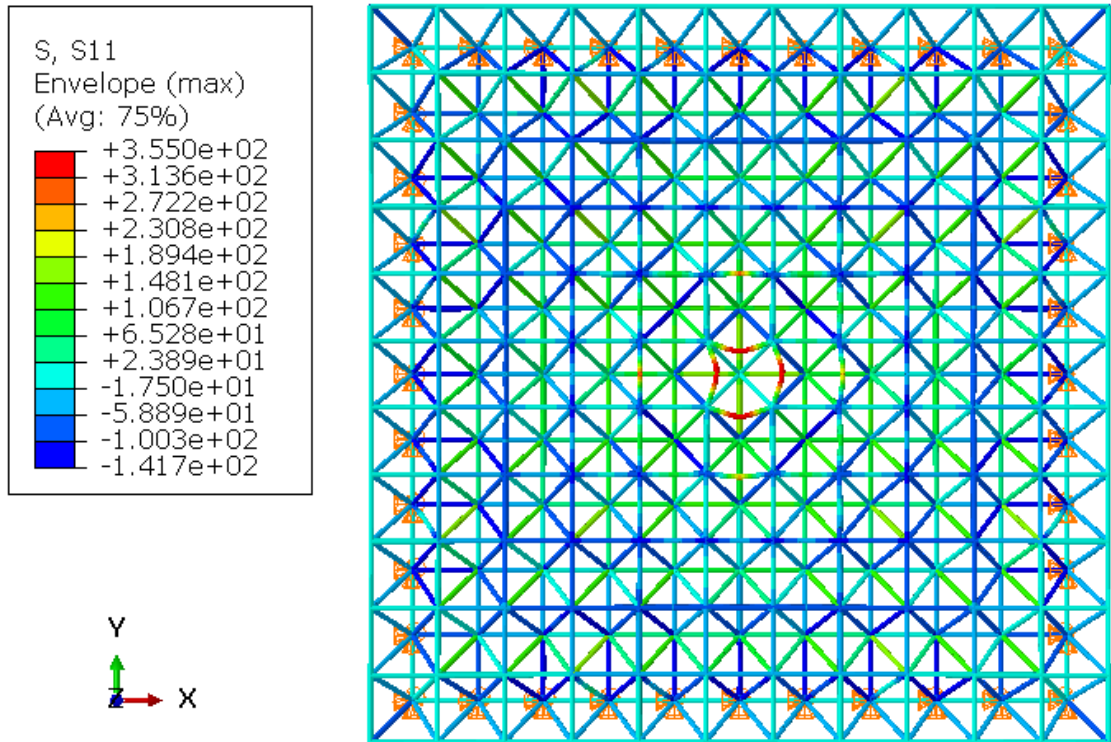
Şekil 4.19. Model B için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



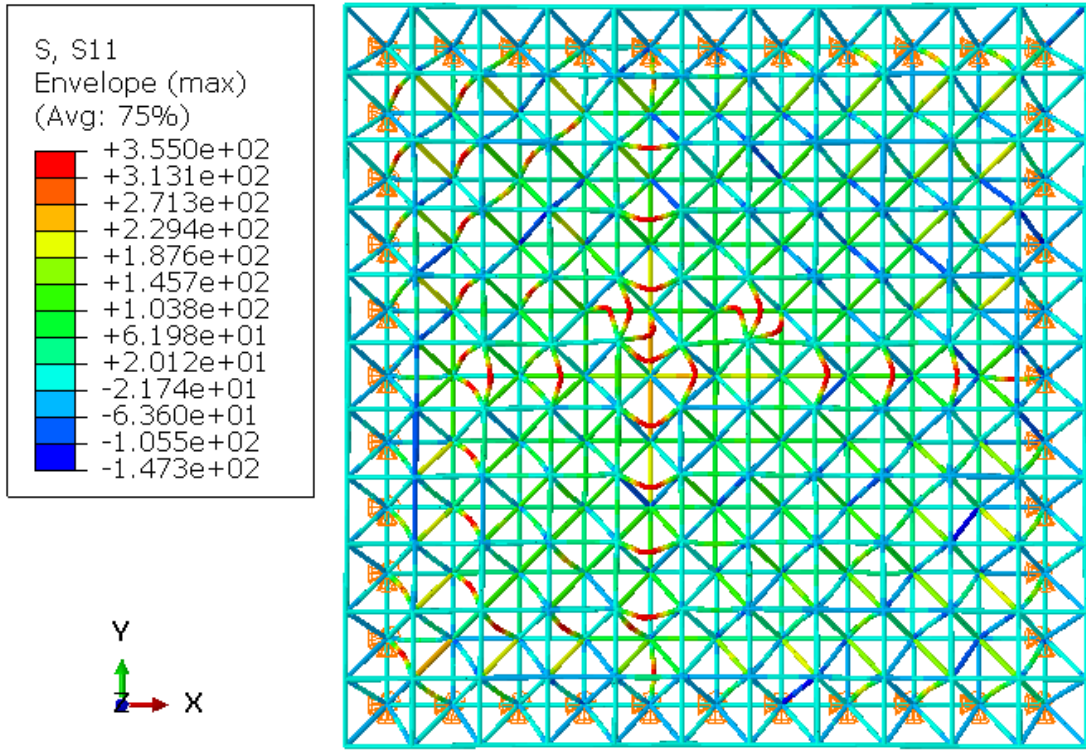
Şekil 4.20. Model B'ye ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22, Model C'nin doğrusal olmayan analizler sonucunda sırasıyla kusursuz ve kusurlu durumlarındaki gerilme dağılımlarını göstermektedir.

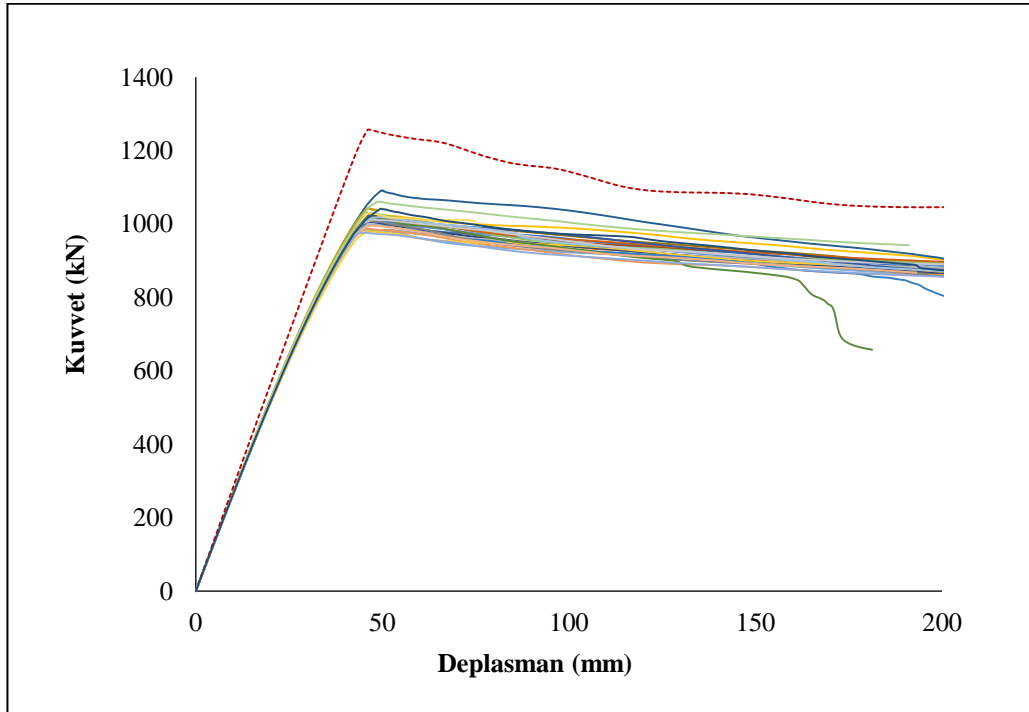
Model C'de doğrusal olmayan analiz sonucunda kusursuz ve kusurlu durumları için elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki tepe noktaları sistemin maksimum taşıyabileceği yük kapasitesini göstermektedir.



Şekil 4.21. Model C için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



Şekil 4.22. Model C için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



Şekil 4.23. Model C'ye ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri

Şekil 4.17, 4.20 ve 4.23'teki grafiklerde Model A, Model B ve Model C için rastgele oluşturulan başlangıç eğrilik kusurları ve bu kusurların gelişigüzel dağılımı sonucunda sistem kapasitelerinde farklı oranlarda azalmalar olduğu görülmektedir. Sistemlerin başlangıçta oluşan rijitlikleri birbirine yakın olmakta, belli bir yük değerinden sonra başlangıç eğrilik kusuru içeren modellerin rijitliklerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, başlangıç eğrilik kusurları içeren modellerde ikinci mertebe etkilerinin etkili olduğunu göstermektedir.

30 farklı kusur dağılımı için mesnetlenme koşulları dikkate alınarak incelenen Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlere ait yük taşıma kapasiteleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir. Çizelge 4.11'de ise bu kapasitelerin maksimum, minimum ve ortalama değerleri ile eğrilik kusurlarından kaynaklı kapasite azalım oranları gösterilmektedir. Bu çizelgeye göre Model A'ya ait sistemlerdeki kapasite azalım oranları %20-%28.7 aralığında iken Model B'ye ait sistemlerde bu oranlar %20-%26.3 ve Model C'ye ait sistemlerde de %13.2-%22.3 oranında kapasite düşüşü gerçekleşmiştir. Model C'nin yük taşıma kapasitesinin Model A ve Model B'nin yük taşıma kapasitelerine oranla daha az miktarda azalma göstermesi, mesnet sayısının artmasının sistemlerin başlangıç eğrilik kusurlarına olan hassasiyetini azaltması şeklinde açıklanabilir. Ayrıca, Şekil 4.17, 4.20 ve 4.23'te görüldüğü üzere Model C'ye ait sistemlerin Model A ve Model B'ye ait sistemlere kıyasla, kusursuz sisteme göre daha sünek davranış gösterdiği anlaşılmaktadır. Her modele ait maksimum ve minimum kapasite azalım oranları arasındaki farktan yola çıkılarak Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin yük taşıma kapasitesinin, başlangıç eğrilik kusurlarının dağılımından etkilendiği sonucuna varılabilir. Mesnetlenme durumlarına göre başlangıç eğrilik kusuru olan sistemlerden dört tarafı sabit mesnetli Model C, köşe mesnetli Model A ve iki kenardan mesnetli Model B'ye göre taşıma kapasitesinde daha iyi performans göstermektedir.

Çizelge 4.10. Kusurlu yapı modellerinin kapasite değerleri

Farklı Kusur Dağılımlarına Göre Yapılan Analizler NO	Model A	Model B	Model C
	Kusurlu Modellerin Kapasiteleri (kN)	Kusurlu Modellerin Kapasiteleri (kN)	Kusurlu Modellerin Kapasiteleri (kN)
1	940,4	928,1	1024,9
2	944,8	959,5	986,0
3	993,4	996,6	1028,1
4	958,8	944,4	999,0
5	1005,9	966,5	986,3
6	958,6	966,8	1091,4
7	988,1	979,2	1023,6
8	927,0	961,8	1017,1
9	980,8	983,9	1021,9
10	993,9	961,8	1005,9
11	961,8	961,2	1022,7
12	1025,6	975,4	983,1
13	954,1	977,0	987,7
14	940,0	989,4	998,8
15	976,7	997,4	980,5
16	913,3	984,2	1008,6
17	1005,0	948,5	1031,8
18	973,1	971,3	1012,8
19	918,0	965,1	1016,9
20	976,1	963,7	1008,5
21	996,8	973,9	1042,5
22	934,2	997,1	1022,6
23	1008,7	936,2	1021,0
24	995,2	960,2	1019,3
25	983,4	940,9	995,0
26	991,0	984,4	1011,8
27	957,1	1005,5	1030,2
28	936,2	956,5	976,0
29	954	984,3	1060,7
30	965	1004,5	1041,6

Çizelge 4.11. Mesnetlenme durumlarına göre kapasite değerleri ve azalım oranları

Modeller	Sistem Kapasite Değerleri (kN)			Kapasite Azalım Oranları (%)			
	Kusursuz Model	Kusurlu Model			Maks.	Min.	Ort.
		Maks.	Min.	Ort.			
Model A	1280	1025	913	936	28,7	20,0	23,4
Model B	1259	1006	928	971	26,3	20,0	23,0
Model C	1257	1091	976	1116	22,3	13,2	21,0

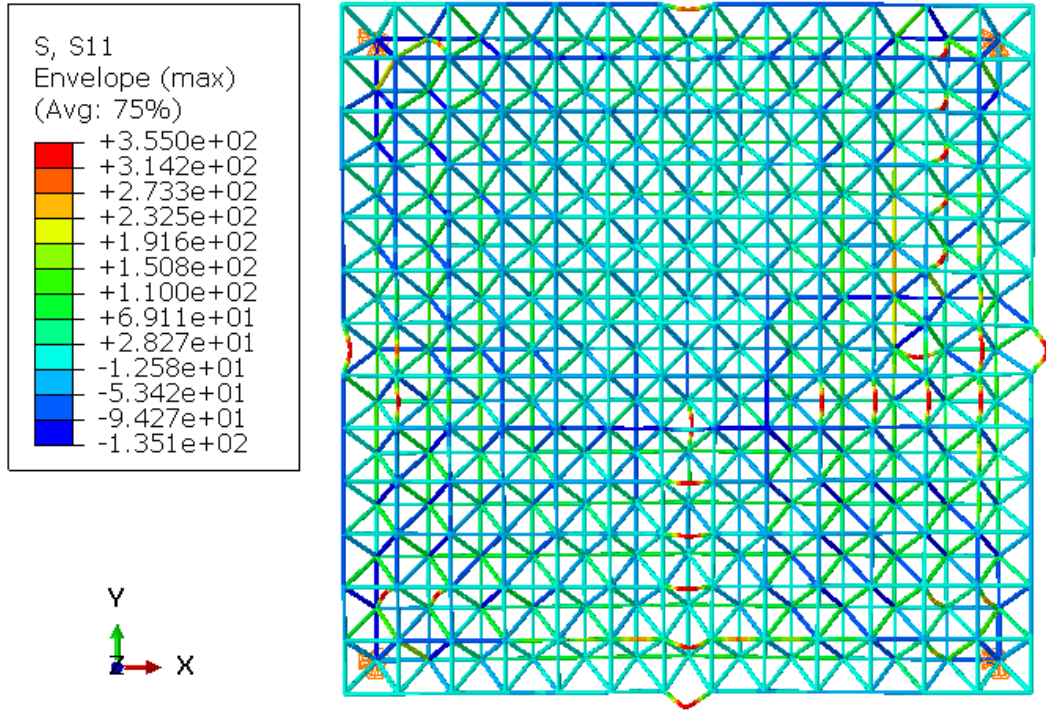
4.2.2. Modül Sayısının Etkisi

DÇKUKSler’de başlangıç eğrilik kusurunu modül sayısı dikkate alınarak araştırmak amacıyla Kısım 3.6’da geometri özellikleri ve tasarım kriterleri açıklanan modeller dikkate alınmıştır. Model D, Model E ve Model F yapı modelleri sırasıyla 12x12, 10x10 ve 8x8 modül sayısına sahip, köşelerde sabit mesnetlenmiş sistemlerdir. Bu yapı modellerine ait geometrik özellikleri Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

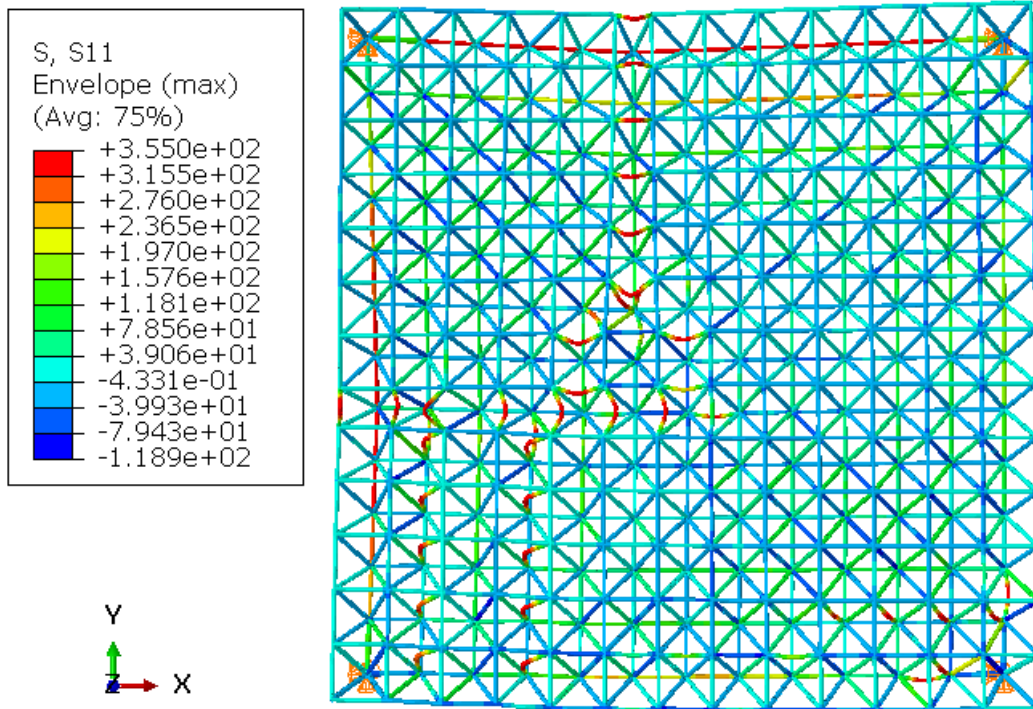
Yapı modellerinin üst katmanındaki düğüm noktalarına düşey artımlı yükleme yapılmıştır. Yükleme kapasitesine ulaştıktan sonra yapı önemli yük kaybına ulaşmaya kadar devam ettirilmiştir. Bütün modellerin yük deplasman grafikleri çizilmiştir.

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25, Model D’nin doğrusal olmayan analizler sonucunda sırasıyla kusursuz ve kusurlu durumlarındaki gerilme dağılımlarını göstermektedir.

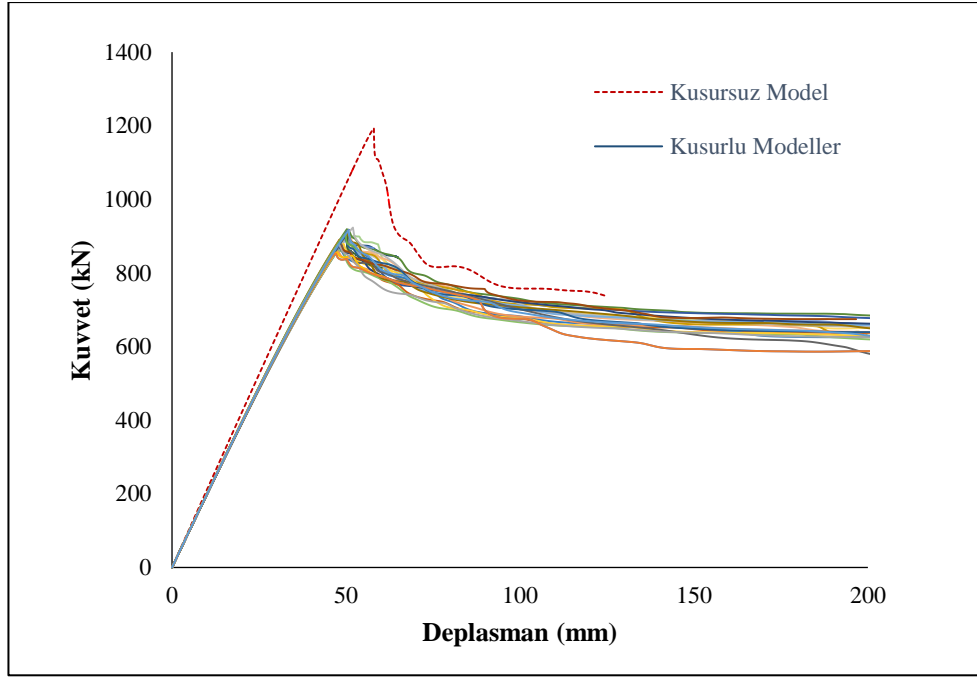
Model D’de doğrusal olmayan analiz sonucunda kusursuz ve kusurlu durumları için elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 4.26’de gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki tepe noktaları sistemin maksimum taşıyabileceği yük kapasitesini göstermektedir.



Şekil 4.24. Model D için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



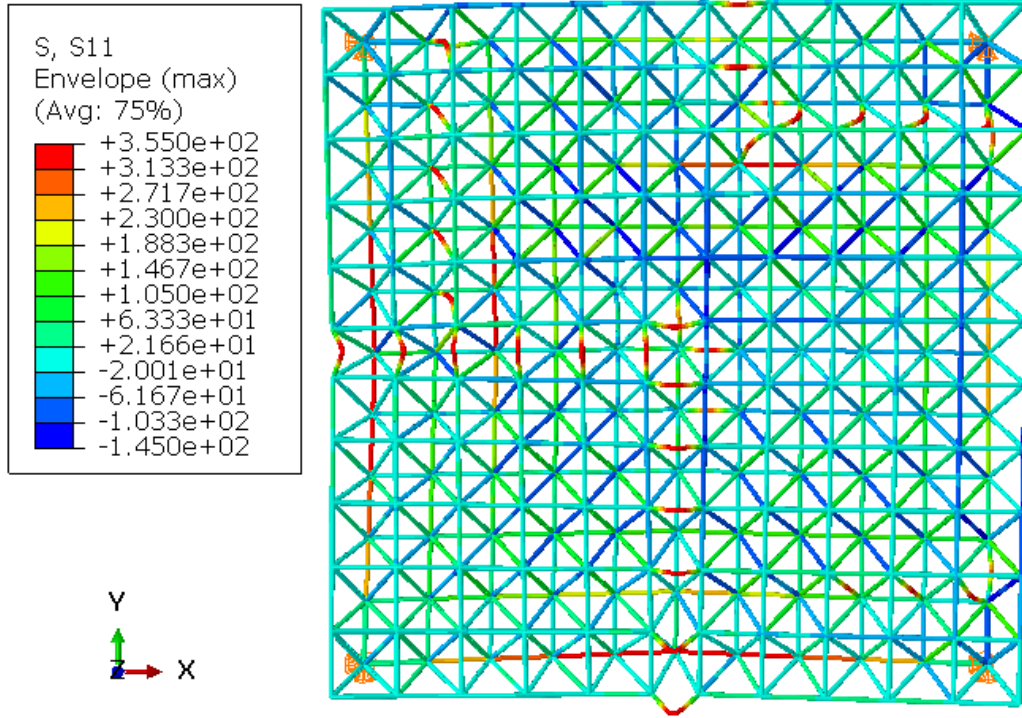
Şekil 4. 25. Model D için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



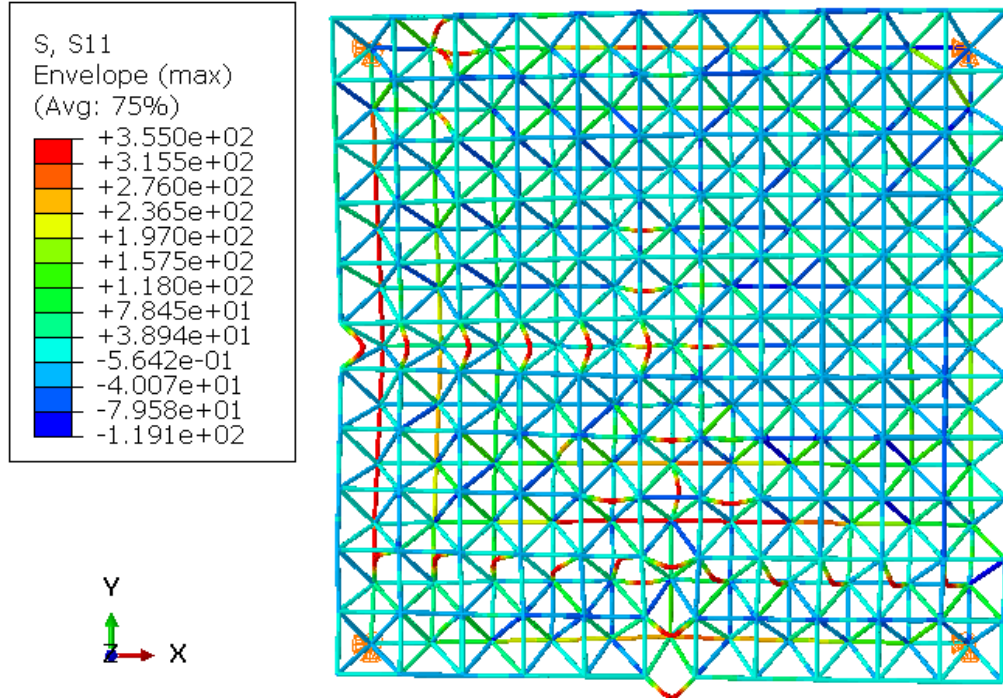
Şekil 4.26. Model D'ya ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28, Model E'nin doğrusal olmayan analizler sonucunda sırasıyla kusursuz ve kusurlu durumlarındaki gerilme dağılımlarını göstermektedir.

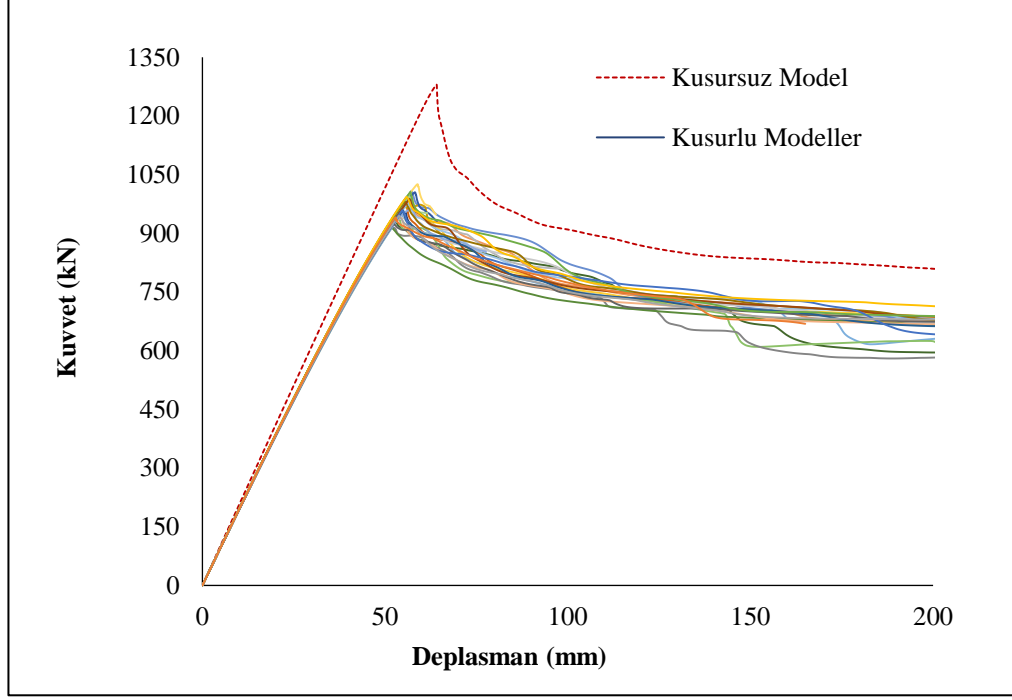
Model E'de doğrusal olmayan analiz sonucunda kusursuz ve kusurlu durumları için elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 4.29'da gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki tepe noktaları sistemin maksimum taşıyabileceği yük kapasitesini göstermektedir.



Şekil 4.27. Model E için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



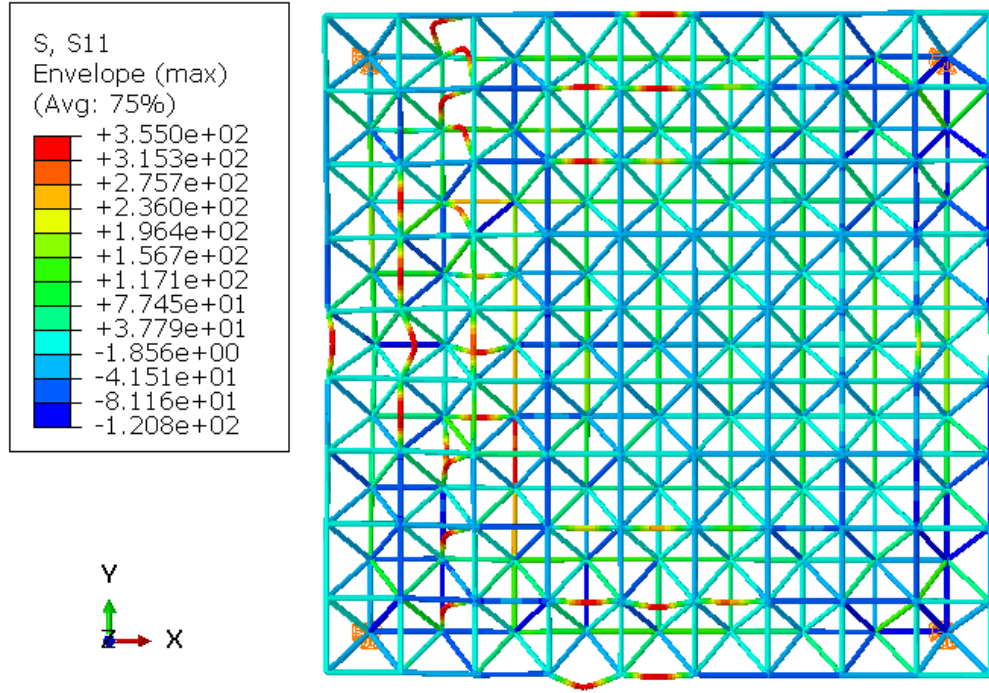
Şekil 4.28. Model E için kusurlu durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



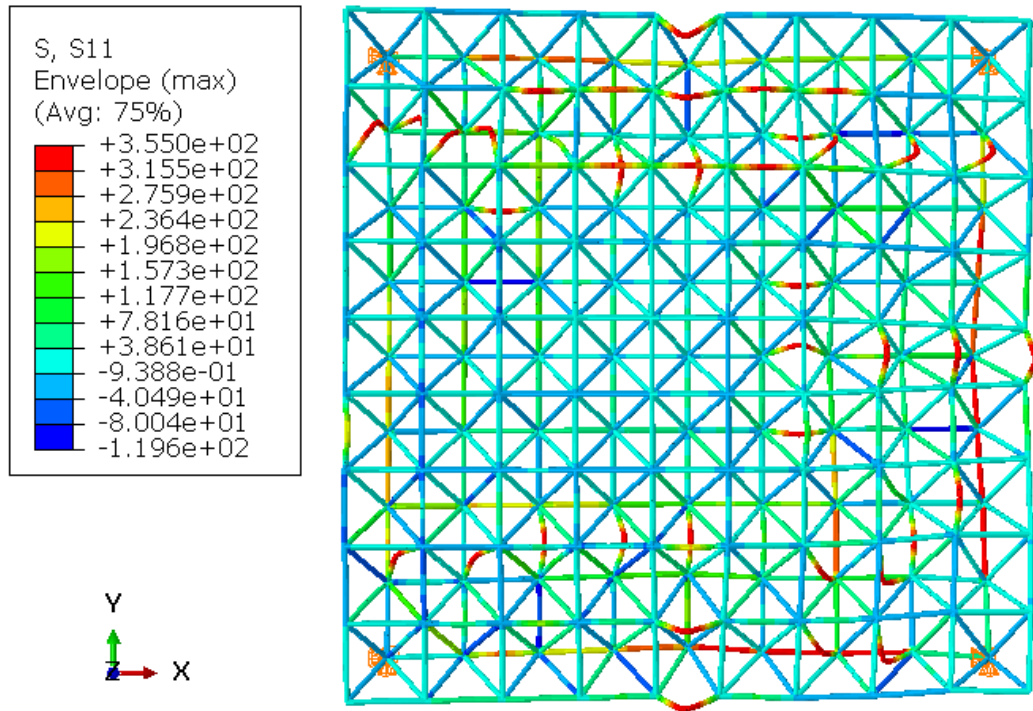
Şekil 4.29. Model E'ya ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31, Model F'nin doğrusal olmayan analizler sonucunda sırasıyla kusursuz ve kusurlu durumlarındaki gerilme dağılımlarını göstermektedir.

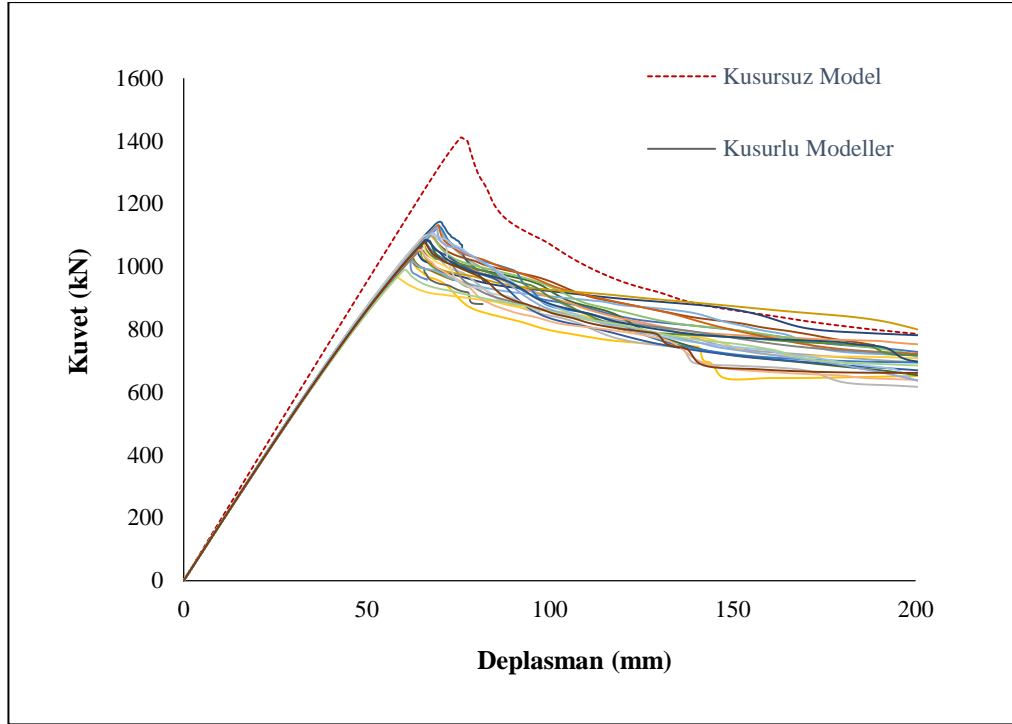
Model F'de doğrusal olmayan analiz sonucunda kusursuz ve kusurlu durumları için elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki tepe noktaları sistemin maksimum taşıyabileceği yük kapasitesini göstermektedir.



Şekil 4.30. Model F için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



Şekil 4.31. Model F için kusursuz durumda doğrusal olmayan analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı



Şekil 4.32. Model F'ye ait kusursuz ve kusurlu sistemlerin kuvvet-deplasman grafikleri

Modül sayısı etkisine göre oluşturulan Model D, Model E ve Model F için ayrı ayrı yapılan 30 adet analiz sonucunda bulunan kusurlu modellerin kapasite değerleri Çizelge 4.12'de gösterilmektedir. Bu sistemlerin maksimum ve minimum kapasite değerleri, ortalama kapasite değerleri, kusursuz modellerin sistem kapasiteleri ve kusurlu modellerin kusursuz modellere göre yük taşıma kapasitelerinde oluşan azalma oranları ise Çizelge 4.13'te gösterilmektedir. Modül sayısı ile eleman uzunluklarının ters orantılı olduğu düşünüldüğünde, modül sayıları ile eleman uzunlukları ters orantılı olarak değişecektir. Narinliklerin sabit tutulması öngörüldüğünden elemanların kesitleri farklı seçilerek sabit narinlik oranı korunmuştur. Bu durumlara bağlı olarak elemanların yük taşıma kapasitelerinde çok küçük miktarlarda değişiklikler gözlenmiştir. Çizelge 4.12'ye göre Model D, Model E ve Model F'nin maksimum yük taşıma kapasitelerinde sırasıyla %28.5, %28.7, %31.3 ve minimum %22.6, %20.0, %19.0 oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Bu değerlerin ortalamalarının ise sırasıyla % 25.0, %23.4, %24.0 olduğu görülmektedir. Bu oranlardan da anlaşılacağı üzere, yapıların farklı modül sayısına sahip

olmasının Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin başlangıç kusur etkisini bariz bir şekilde etkilemediği görülmektedir.

Çizelge 4.12. Kusurlu yapı modellerinin kapasite değerleri

Farklı Kusur Dağılımlarına Göre Yapılan Analizler NO	Model D	Model E	Model F
	Kusurlu Modellerin Kapasiteleri (kN)	Kusurlu Modellerin Kapasiteleri (kN)	Kusurlu Modellerin Kapasiteleri (kN)
1	900,4	940,4	1130,0
2	901,3	944,8	1021,9
3	881,4	993,4	1083,5
4	896,0	958,8	1075,4
5	909,9	1005,9	1143,1
6	908,3	958,6	1108,8
7	895,0	988,1	1028,2
8	918,7	927,0	1026,6
9	901,6	980,8	1048,6
10	907,2	993,9	1090,4
11	906,0	961,8	1024,0
12	890,5	1025,6	1102,3
13	871,1	954,1	1065,2
14	861,2	940,0	969,2
15	916,9	976,7	1028,4
16	883,8	913,3	1103,1
17	923,3	1005,0	1129,3
18	858,6	973,1	1132,9
19	908,7	918,0	1051,1
20	911,5	976,1	1058,0
21	872,5	996,8	1083,6
22	907,0	934,2	1068,6
23	877,8	1008,7	1108,3
24	882,4	995,2	1053,7
25	895,9	983,4	1104,4
26	905,5	991,0	1076,9
27	855,6	957,1	1125,5
28	877,8	936,2	990,5
29	853,2	954	1085,6
30	900,4	940,4	1078,6

Çizelge 4.13. Modül sayısına göre kapasite değerleri ve azalım oranları

Modeller	Sistem Kapasite Değerleri (kN)			Kapasite Azalım Oranları (%)			
	Kusursuz Model	Kusurlu Model		Maks.	Min.	Ort.	
		Maks.	Min.				Ort.
Model D	1193	923	853	893	28,5	22,6	25,0
Model E	1280	1025	913	936	28,7	20,0	23,4
Model F	1411	1143	969	1073	31,3	19,0	24,0

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerde gelişigüzel dağıtılmış başlangıç eğrilik kusurunun sistemin yük taşıma kapasitesine etkisi, mesnetlenme koşulları ve modül sayısı parametreleri dikkate alınarak incelenmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Geometride doğrusal olmayan analiz yapılırken, burkulma tetikleyici fiktif kusurlar belirli büyüklükte olmalıdır. Kusurların büyük olması sistem kapasitesini etkilerken, küçük olması burkulmayı tetiklememektedir.
2. Elemanlardaki başlangıç eğrilik kusurlarının Çift Katlı uzay kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesini %31 e kadar azalttığı görülmektedir.
3. Farklı mesnetlenme durumlarının, Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin başlangıç kusur etkisini değiştirmektedir. Dört kenardan mesnetlenmiş Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes sistemlerin yük taşıma kapasitesi, eleman başlangıç eğrilik kusurun mevcut olmasından daha az etkilenmektedir.
4. Narinlikler sabit tutulmak kaydıyla, modül sayısının, Düzlemsel Çift Katlı Uzay Kafes Sistemlerin başlangıç kusur etkisini bariz bir şekilde etkilemediği görülmektedir.
5. Kusurlu yapı modellerinde başlangıç rijitliği değişmemekte, belirli bir yük değerinden sonra kusurlu sistemlerin rijitliklerinin kusursuz sistemlere göre azaldığı görülmektedir.
6. Kusurlu yapı modellerinin rijitlikleri kusursuz yapı modellerinin rijitliğine göre belirli bir yük değerinden sonra azaldığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

ABAQUS, 2008a. Getting Started with ABAQUS: Interactive Edition. Version 6.8. (2008). Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA

Abaqus. 2017. Abaqus Analysis User's Guide, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA

Abaqus, 2016. Abaqus Analysis User's Guide, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA
<http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usb/default.htm?startat=pt04ch11s03aus68.html#usb-anl-aimperfection>

Adams, J. M., Zingoni, A. 2013. Collapse behaviour of double-layer grid structures in steel. *Master Thesis*, University of Cape Town, Department of Civil Engineering, Cap Town, 835–840.

Affan, A., Gmbh, M. R., Steinachslr, C. O., West, D. W. 1989. Initial Bar Tensions in Pin-Jointed Assemblies. *Intemational Journal of Space Structures*.

Affan, A. 1989. Collapse of double layer space grid structures, *Ph.D. Dissertation*, University of Cambridge, UK.

Affan, A., & Calladine, C. R. 2017. Initial Bar Tensions in Pin-Jointed Assemblies. *International Journal of Space Structures*, 4(1), 1–16

ASTM, 1971. Annual book of ASTM Standards. Part 4. American Society for Testing and Materials, 1916 Race Street, Philadelphia, Pa. (1971).

AISC 2005b. Steel Construction Manual, 13th ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

Alpsten, G.A. 1972. Variations in mechanical and cross-sectional properties of steel, Proc. Int. Conf. on Planning and Design of Tall Buildings, Vol. Ib, Lehigh University, Bethlehem, 775–805.

Analysis, design and realization of space frames: 1984. a state-of-the-art report. Bulletin of international association of Shell and spatial structures. Special issue, 15 (84/85)

Anonim, 2015. Çelik Halat Taşıyicili Tertibatlar. <https://www.yedigun.com/celik-halat-tertibatlar> (29.01.2020)

Anonim, 2010. A Double-layer Braced Barrel Vaults - Barrel Vault Space Frame. https://www.nicepng.com/ourpic/u2w7r5u2w7r5w7i1_a-double-layer-braced-barrel-vaults-barrel-vault/ (29.01.2020)

Anonim, 2019. State Farm Center, Illinois Renaissance. Illinois, <https://www.esdglobal.com/gallery/project/659-state-farm-center-illinois-renaissance-assembly-hall> (29.01.2020)

Anonim, 2010. Pneumatic Structural Sytems. <https://pneumaticstructuralsystems.wordpress.com/typical-uses/> (29.01.2020)

Arjun, N. 2019. Tensegrity Structures- Benefits and Applications in Civil Engineering. <https://theconstructor.org/structures/tensegrity-structures-benefits-applications/14181/> (29.01.2020)

Bell, A. G. 1901903. Tetrahedral Principle In Kite Structure. *National Geographic Magazine*. XIV (6).

Chilton, J. C. 2000. Space grid structures. Great Britain: Architectural Press, 180.

Chung Thi Thu Ho 2010. Analysis of Thermally Induced Forces in Steel Columns Subjected to Fire. *Master of Science*, University of Texas at Austin, Faculty of the Graduate School, USA.

Cüneyt Vatanserver, H. E. A. 2016. Uzay Kafes Çatı Sistemlerinin Artan Düşey Yükler Altında Doğrusal Olmayan Davranışı, Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, 83–92.

Dassault Systemes, 2010. to acquire Abaqus Inc for 413 mln usd cash. Forbes.com. Forbes. 17 May 2005. Retrieved 7 July 2010.

Dassault Systemes. 2013. Abaqus Analysis User’s Guide, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA

El-Sheikh, A.I. 1991. The effect of composite action on the behavior of space structures, *Ph.D. Dissertation*, Dissertation, University of Cambridge, UK.

El-Sheikh, A.I. (1995). Sensitivity of space trusses to member geometric imperfections. *Int. J. Space Struct.*, 10(2), 89-98.

El-Sheikh, A. 1997. Effect of member length imperfections on triple-layer space trusses, *Engineering Structures*, 19(7):, 540–550.

El-Sheikh, A.I. 2002. “Effect of geometric imperfections on single-layer barrel vaults”, *Int. J. Space Struct.*, Struct., 17(4), 271-283.

Fu, F., Parke, G. A. R. 2018. Assessment of the Progressive Collapse Resistance of Double-Layer Grid Space Structures Using Implicit and Explicit Methods. *International Journal of Steel Structures*, 18(3):

Smith, E.A. and Epstein, H. 1980. Hartford coliseum roof collapse: structural sequence and lesson learned”, Civil Eng., ASCE, 52(4), 59-62.

Galambos, T. V., Surovek, A. E. 2008. Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers. John Wiley & Sons, Inc., United State of America, 381.

Galambos, T. V. (ed.). 1998. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Chapter 8. New York: John Wiley and Sons.

Gerard, G. 1962. “Introduction to Structural Stability Theory”. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, USA.

Gordini, M., Habibi, M. R., Tavana, M. H., TahamouliRoudsari, M., Amiri, M. 2018. Reliability Analysis of Space Structures Using Monte-Carlo Simulation Method. *Structures*, 14(April 2017):, 209–219.

Hibbitt, Karlsson & Sorensen, E. 2007. Abaqus Version 6.13 Finit Element Program-Standard. User’s Manual,

Karpov, E.G., Stephen, N.G. and Liu, W.K. 2003. Initial tension in randomly disordered periodic lattices. *International Journal of Solids and Structures*, 40, (20), 5371-5388.

Martin, R., Delatte, N. J., Rachel Martin, Norbert J. Delatte 2001. Another Look at Hartford Civic Center Coliseum Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 15(1): 31–36.

Mwakali, J. R. 1990. The Collapse Behaviour of Double-Layer Space Trusses Incorporating Eccentrically Loaded Tee-Section Members. *PhD thesis*, University of Surrey,

Ramaswamy, G. S., Eekhout, M., Suresh, G. R. 2002. Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames. London, 243.

Salmon, C. G., Johnson, J. E., Malhas, F. A. 2010. Steel Structures Design and Behavior (C. 1), London, : Thomas Telford Ltd. Tarihinde adresinden erişildi (<https://www.pearson.com.au/products/S-Z-Salmon-Charles-G-Et-Al/Steel-Structures-Design-and-Behavior/9780131885561?R=9780131885561>)

Sheidaii, M. R., Gordini, M. 2015. Effect of Random Distribution of Member Length Imperfection on Collapse Behavior and Reliability of Flat Double-Layer Grid Space Structures. *Advances in Structural Engineering*, 18(9):, 1475–1485.

Subramanian, N. (Narayanan) 1999. Principles of space structures. New Delhi, India, 687 pp.

Smith, M. 2010a. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp.

Tall, L. and Alpste, G. A. 1969. On the scatter in yield strength and residual stresses in Steel Members. Final Report, IABSE Symposium on concepts of safety of structures and methods of design. London, pp. 151-163.

Tahamouli Roudsari, M., Gordini, M., Fazeli, H., Kavehei, B. 2017. Probability analysis of double layer barrel vaults considering the effect of initial curvature and length imperfections simultaneously. *International Journal of Steel Structures*, 17(3):, 939–948.

Timoshenko S.P., Gere J.M. 1961. Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, USA.

Tomonaga, K. 1971. Actually Measured Error in Fabrication of Kasumigaseki Buildings, Proceedings. 3rd Regional Conference of the ASCE-IABSE Joint Committee on the planning and Design of Tall Buildings. Tokyo, pp. 122-133.

Türker, H. T. 2004. Eleman Boylarındaki Küçük Kusurların Çelik Uzay Kafes Sistemlerinin Kapasitesine Etkisinin İrdelenmesi. 6. çelik yapılar sempozyumu, 455–464.

Vigil, J., O. Aghayere, A. 2018. Structural steel design. Prentice Hall, Ohio, 709.

Wada, A. and Wang, Z. 1992. Influence of uncertainties on mechanical behavior of a double-layer space truss”, *Int. J. Space Struct.*, 7(3), 223-235.

Wai-fah chen, Toshio Atsuta 2007. Theory of Beam-Columns, Volume 1: In-Plane Behavior and Design, J. Ross Publishing; Reprint edition.

Yadollahi, M. M., Gül, R., Polat, R., Yadollahi, B. M., Gül, M. S. 2011. The Effect of Initial Geometric Imperfection on the Load Bearing Capacity of Double Layer Barrel Vault Space Structures. 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, (May):, 25–28.

Zhao, J., Zhang, Y., Lin, Y. 2014. Study on mid-height horizontal bracing forces considering random initial geometric imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*. Res., 92, 55-66.

Zhou, Z., Meng, S.-P., Wu, J. 2009. Stability analysis of prestressed space truss structures based on the imperfect truss element. *International Journal of Steel Structures*, 9(3):, 253–260.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mojibullah NOORİ
Doğum Yeri ve Tarihi : Takhar 08/06/1993
Yabancı Dil : Türkçe, İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Abu Osman Taluqan-i Lisesi
Lisans : Mersin Üniversitesi
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

İletişim (e-posta) : mojob.noori2014@gmail.com

Yayımları :

Noori, M., Topaloğlu, N., Temşi, M., Türker, H. T. Başlangıç Eğrilik Kusurlarının Mesnetlenme Durumu ve Modül Sayısına Göre Düzlemsel Çift Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin Davranışına Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, Sayı 3, 2019.

Mustafa Temşil, Mojibullah Noori, Nurten Topaloğlu, Hakan T. Türker. Çift Katmanlı Uzay Kafes Sistemlerin Başlangıç Eğrilik Kusurları Dikkate Alınarak Doğrusal Olmayan Modellemesi. I. Uluslararası Bilim ve İnovasyon Kongresi, 26-29 Ağustos 2019, Pamukkale, Denizli/Türkiye