

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Düzenli Gövde Boşluklu Çelik I Profillerin Yanal Stabilitelerinin Sonlu  
Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi

Mehmet Fethi ERTENLİ

MART 2015

**İnşaat Anabilim Dalında** Mehmet Fethi ERTENLİ tarafından hazırlanan DÜZENLİ GÖVDE BOŞLUKLU ÇELİK I PROFİLLERİN YANAL STABİLİTELERİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlhami DEMİR  
İnşaat Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Orhan DOĞAN \_\_\_\_\_  
Üye (Danışman) : Doç. Dr. İlker KALKAN \_\_\_\_\_  
Üye : Doç. Dr. Alper BÜYÜKKARAGÖZ \_\_\_\_\_

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Rahmetli Dedem Hoca Sıddık  
&  
Sevgili Aileme**

## ÖZET

### DÜZENLİ GÖVDE BOŞLUKLU ÇELİK I PROFİLLERİN YANAL STABİLİTELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

ERTENLİ, Mehmet Fethi

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Doç. Dr. İlker KALKAN

Mart 2015, 94 sayfa

Çelik yapıların inşasında çeliğin ekonomik olarak kullanılması yapının maliyetinin düşürülmesini sağlar. Böylece doğal kaynak olan demir cevherinin israfı da önlenir ve ülke ekonomisine de katkı sağlanmış olur. Maliyetten tasarruf sağlanırken yapı emniyetinin düşürülmesi mühendislik ilkeleri ile bağdaşmaz. Bu sebeple yapı güvenliğinden hiçbir şekilde taviz vermeden çelikten tasarruf etmeyi sağlayan petek kiriş sistemleri geliştirilmiştir.

Yanal burulmalı burkulma, çelik yapıların tasarım şartnamelerinde kirişlerin dayanımına ve doğrudan yapının güvenliğine etki eden durumlardan birisi olarak kabul görmektedir. Bu çalışmada sonlu elemanlar programı ile modellenen kirişlerin analizi sonucu elde edilen  $P_{cr}$  yükleri, dünyanın farklı bölgelerinde kabul gören şartnamelerden (AISC, AS, EuroCode) ve geçmiş çalışmalarda geliştirilmiş analitik formüllerden elde edilen kritik yük değerleri ile kıyaslanarak yanal burulmalı burkulma ifadelerinin tutarlılığı incelenmiştir.

Kuvvetli başlık-narin gövde kesitli çelik I profillerde gövdenin narinliği sebebiyle kesit gövdesinde buruşmalar ortaya çıkmaktadır. Geçmiş çalışmalar, zayıf gövde kesitli uzun açıklıklı kirişler için gövde buruşmalarının, kirişlerin yanal burkulma davranışını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmalar, gövde

narınlığının kirişlerde yerel burkulma ve yanal burulmalı burkulmanın kombine çalışıp kirişin yanal buruşmalı burkulmasına neden olduğunu belirtmiştir.

Sonlu elemanlar programı Abaqus CAE kullanılarak hücresel boşluklu çelik I profillerin yanal burulmalı burkulma davranışları tespit edilmiştir. Elastik analiz yapılan kirişlerin tümü basit mesnetli olarak teşkil edilmiştir. Yükleme, hücresel kirişlerin üst başlığına açıklık ortalarından kiriş eksenine dik olacak şekilde sonlu eleman ağı üzerindeki düğüm noktalarına düşey olarak etkilmiştir.

Yapılan çalışma neticesinde düzenli gövde boşluklu I kesitli çelik kirişlerin yanal burulmalı burkulma performansına etki eden birçok parametrenin olduğu görülmüştür. Genel olarak şartnamelerin stabilite hesaplarında gövde buruşmalarını dikkate almamasından dolayı şartnamelerden hesaplanan kritik yük değerleri, numerik analizler sonucu elde edilen değerlerin altında kalmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Hücresel Kiriş, Yanal Burulmalı Burkulma, Yerel burkulma, Yanal Buruşmalı Burkulma, Sonlu Eleman Analizi

## **ABSTRACT**

### **NUMERICAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF LATERAL STABILITY OF STEEL I-BEAMS WITH REGULAR WEB OPENINGS**

ERTENLİ, Mehmet Fethi

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, Ph. D. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker KALKAN

March 2015, 94 pages

Limiting the amount of material used in a steel construction contributes to the overall economy of a structure. This limited use also contributes to the national economy. The strength and behavior of a structure should not be altered majorly while improving the overall economy of construction. Cellular beam systems, which are designed to have adequate strength and ductility while limiting the amount of material in a beam, constitute a significant alternative to the conventional solid beams in steel construction.

Steel design specifications accept lateral torsional buckling as a primary mode of failure in steel beams. In I beams with stocky flanges and slender webs, web distortions generally take place before lateral torsional buckling (LTB), resulting in a combined buckling mode denoted as lateral distortional buckling (LDB). The present study aimed at investigating the lateral stability behavior of cellular steel beams with doubly-symmetric I-section, both numerically and analytically. The buckling load values obtained from finite element analyses were compared to the load estimates from the steel design codes and from analytical expressions developed in previous studies in the literature. The influence of LDB mode on the buckling loads of cellular beams was also examined.

The finite element analyses were conducted with the help of the finite element analysis program Abaqus CAE. In analyses, the beams were simply supported in and out of plane and subjected to uniform distributed loading across the span, applied at midwidth of the top flange.

The study showed that there are several parameters affecting the lateral stability of steel I-beams with regular web openings. The lateral stability behavior of cellular beams were found to be significantly influenced by web distortions. The analytical estimates from the LTB formulations in the codes generally remain below the numerical values since these formulations do not account for the reductions in the buckling loads due to the web distortions.

**Key Words:** Cellular beams, Lateral torsional buckling, Local buckling, Lateral distortional buckling, Numerical Analysis

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam Sayın Doç. Dr. İlker KALKAN'a, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Doç. Dr. Alper BÜYÜKKARAGÖZ'e ve Sayın Arş. Gör. Selçuk BAŐ'a teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her anında bana maddi ve manevi destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Düzenli Gövde Boşluklu Çelik Kirişler .....	1
1.1.1. Boşluklu Kirişlerin Tercih Edilmesi .....	1
1.1.2. Boşluklu Kirişlerin Avantajları.....	4
1.1.3. Gövdesi Boşluklu Kiriş Türleri.....	5
1.1.4. Boşluklu Kirişlerin Kullanımında Dikkat Edilmesi Gerekenler.....	6
1.1.5. Kesit Yüksekliğinin Arttırılmasının Sağladığı Avantajlar.....	6
1.2. Yanal Burulmalı Burkulma .....	9
1.2.1. Elastik yanal burulmalı burkulma .....	12
1.3. Yanal Buruşmalı (Distortional) Burkulma.....	13
<b>2. NÜMERİK VE ANALİTİK ÇALIŞMA</b> .....	17
2.1. Nümerik Çalışma .....	17
2.1.1. Modelleme Esasları .....	17
2.1.1.1. Sonlu Elemanlar Programı.....	17
2.1.1.2. Analizlerde Kullanılan Kirişler.....	17
2.1.1.3. Malzeme Özellikleri.....	19
2.1.1.4. Mesh Aralığının Belirlenmesi ve Meshleme İşlemi .....	20
2.1.1.5. Set Oluşturulması.....	20
2.1.1.6. Mesnet Koşullarının Belirlenmesi .....	21
2.1.2. Burkulma Analizinin Yapılması .....	23
2.1.2.1. Analizi yapılan kirişlerin bazılarının burkulma şekilleri .....	23
2.1.2.2. $P_{cr}$ Değerlerinin Bulunması.....	34

2.2. Analitik Çalışma.....	37
2.2.1. Analitik Çalışmada Kullanılan Şartnameler ve Diğer Formüller ...	38
<b>3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR.....</b>	<b>39</b>
3.1. Bulunan $P_{cr}$ Değerlerinin Kıyaslanması.....	42
3.2. Statik Analizin Yapılması.....	68
<b>4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>	<b>71</b>
4.1. Sonuçlar.....	71
4.2. Öneriler.....	73
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>74</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>77</b>
EK 1 Burkulma Şekilleri.....	77
EK 2 Yük-Yanal Deplasman Grafikleri.....	88

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Gövdesi boşluklu kirişlerin kesim ve kaynaklanması.....	3
1.2. Petek kirişlerin kesim oranları .....	4
1.3. Boşluklu kirişler tesisat borularının geçirilmesinde kolaylık sağlar .....	5
1.4. Dairesel boşluklu hücresel kiriş kesiti .....	5
1.5. Angelina Kirişi.....	6
1.6. Hexagonal Boşluklu Petek Kiriş Kesiti.....	6
1.7. Ara levha ekli petek kiriş (sekizgen).....	6
1.8. I profil kesitindeki gerilme dağılışı .....	7
1.9. I profil ve petek kirişler arasındaki mukavemet momenti artışı .....	8
1.10. Sabit moment etkisindeki kirişin yanal burulmalı burkulma davranışı .....	10
1.11. Yanal burulmalı burkulma dayanımının serbest açıklıkla değişimi.....	11
2.1. Dairesel boşluklu I profillerin kesit detayları.....	17
2.2. Abaqus ile boyutlandırılan kiriş kesiti .....	19
2.3. Mesh işlemi yapılan kiriş örneği .....	20
2.4. Abaqus\CAE programında x-y-z yönleri .....	21
2.5. Kirişlerin mesnetleme ve yükleme yapılan durumları .....	22
2.6. Basit mesnetli kiriş.....	22
2.7. IPEO400-10 m .....	24
2.8. IPEO400-25 m .....	24
2.9. IPEO400-50 m .....	24
2.10. IPEO400-75 m .....	25
2.11. IPEO400-100 m .....	25
2.12. IPEO450-10 m .....	25
2.13. IPEO450-25 m .....	26
2.14. IPEO450-50 m .....	26
2.15. IPEO450-75 m .....	26
2.16. IPEO450-100 m .....	27
2.17. IPEO500-10 m .....	27
2.18. IPEO500-25 m .....	27
2.19. IPEO500-50 m .....	28

2.20. IPEO500-75 m .....	28
2.21. IPEO500-100 m .....	28
2.22. IPEO550-10 m .....	29
2.23. IPEO550-25 m .....	29
2.24. IPEO550-50 m .....	29
2.25. IPEO550-75 m .....	30
2.26. IPEO550-100 m .....	30
2.27. IPEO600-10 m .....	30
2.28. IPEO600-25 m .....	31
2.29. IPEO600-50 m .....	31
2.30. IPEO600-75 m .....	31
2.31. IPEO600-100 m .....	32
2.32. IPEO750-10 m .....	32
2.33. IPEO750-25 m .....	32
2.34. IPEO750-50 m .....	33
2.35. IPEO750-75 m .....	33
2.36. IPEO750-100 m .....	33
3.1. .IPEO400 $P_{cr}/l$ grafiği .....	39
3.2. .IPEO450 $P_{cr}/l$ grafiği .....	40
3.3. .IPEO500 $P_{cr}/l$ grafiği .....	40
3.4. .IPEO550 $P_{cr}/l$ grafiği .....	41
3.5. .IPEO600 $P_{cr}/l$ grafiği .....	41
3.6. .IPEO750 $P_{cr}/l$ grafiği .....	42
3.7. .IPEO400 kirişi Abaqus ve Şartnameler .....	45
3.8. .IPEO450 kirişi Abaqus ve Şartnameler .....	46
3.9. IPEO500 kirişi Abaqus ve Şartnameler .....	46
3.10. IPEO550 kirişi Abaqus ve Şartnameler .....	47
3.11. IPEO600 kirişi Abaqus ve Şartnameler .....	47
3.12. IPEO750 kirişi Abaqus ve Şartnameler .....	48
3.13. IPEO400 kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m) .....	49
3.14. IPEO450 kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m) .....	49
3.15. IPEO500 kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m) .....	50
3.16. IPEO550 kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m) .....	50

3.17. IPEO600 kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m) .....	51
3.18. IPEO750 kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m) .....	51
3.19. IPEO400 kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m) .....	52
3.20. IPEO450 kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m) .....	52
3.21. IPEO500 kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m) .....	53
3.22. IPEO550 kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m) .....	53
3.23. IPEO600 kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m) .....	54
3.24. IPEO750 kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m) .....	54
3.25. IPEO400 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar.....	58
3.26. IPEO450 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar.....	58
3.27. IPEO500 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar.....	59
3.28. IPEO550 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar.....	59
3.29. IPEO600 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar.....	60
3.30. IPEO750 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar.....	60
3.31. IPEO400 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m) .....	61
3.32. IPEO450 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m) .....	62
3.33. IPEO500 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m) .....	62
3.34. IPEO550 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m) .....	63
3.35. IPEO600 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m) .....	63
3.36. IPEO750 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m) .....	64
3.37. IPEO400 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m) .....	64
3.38. IPEO450 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m) .....	65
3.39. IPEO500 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m) .....	65
3.40. IPEO550 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m) .....	66
3.41. IPEO600 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m) .....	66
3.42. IPEO750 kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m) .....	67
3.43. 10m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği .....	68
3.44. 25m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği .....	69
3.45. 50m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği .....	69
3.46. 75m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği .....	70
3.47. 100m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği.....	70

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Dairesel Boşluklu I Profillerin Boyutları .....	18
2.2. Kirişlerin elastik yanal burulmalı burkulmaya başladıkları uzunluklar .....	18
2.3. IPE O 400 buckle analiz sonuçları .....	34
2.4. IPE O 450 buckle analiz sonuçları .....	35
2.5. IPE O 500 buckle analiz sonuçları .....	35
2.6. IPE O 550 buckle analiz sonuçları .....	36
2.7. IPE O 600 buckle analiz sonuçları .....	36
2.8. IPE O 750 buckle analiz sonuçları .....	37

## SİMGELER DİZİNİ

E	Çeliğin elastisite modülü
$f_y$	Çeliğin akma dayanımı
J	Burulma sabiti
$I_x$	Kesitin x eksenine (kuvvetli eksen) göre atalet momenti
$I_y$	Kesitin y eksenine (zayıf eksen) göre atalet momenti
$S_x$	Kesitin x eksenine (kuvvetli eksen) göre mukavemet momenti
G	Rijitlik modülü
$h_o$	Başlıkların ağırlık merkezleri arasındaki mesafe
$r_{ts}$	Ana eksen yanal burulmalı burkulma sınır durumu için $L_r$ 'nin belirlenmesinde kullanılan etkili dönme yarıçapı
c	$L_r$ nin belirlenmesinde kullanılan bir sabit, simetrik I profiller için $c=1$
$\sigma$	Gerilme
$\epsilon$	Birim şekil değiştirme
$\epsilon_e$	Çubuğun enine şekil değiştirme oranı
$\nu$	Poisson oranı
M	Moment
$M_{cr}$	Kirişin yanal burulmalı burkulma yapmadan taşıyabileceği maksimum moment
$M_{crb}$	Elastik veya inelastik yanal burulmalı burkulma altındaki kritik moment
$M_{crd}$	Elastik veya inelastik yanal buruşmalı burkulma altındaki kritik moment
$M_p$	Plastik moment
$M_{ob}$	Serbest açıklık boyunca üniform eğilme momentine karşılık gelen referans elastik yanal burulmalı burkulma momenti

$M_{od}$	Serbest açıklık boyunca üniform eğilme momentine karşılık gelen referans elastik yanal buruşmalı burkulma momenti
$GJ$	Burulma rijitliği
$GJ_e$	Efektif (azaltılmış) burulma rijitliği
$EI_w$	Çarpılma rijitliği
$EI_{we}$	Efektif (azaltılmış) çarpılma rijitliği
$EI_y$	Yanal eğilme rijitliği
$P_{cr}$	Kirişin yanal burulmalı burkulma yapmadan taşıyabileceği maksimum yük
$P$	Tekil kuvvet
$L$	Kiriş uzunluğu
$L_b$	Yanal destekler arasındaki mesafe
$L_{rb}$	İnelastik LTB'nin sınır durumu için serbest açıklık sınırı
$L_{rd}$	İnelastik LDB'nin sınır durumu için serbest açıklık sınırı
$W_x$	Mukavemet momenti
$a$	Başlıkların ağırlık merkezleri arasındaki mesafe
$f_f$	Bir başlığın enkesit alanı
$\sigma_{em}$	Elemanın emniyetle taşıyabileceği gerilme değeri



## KISALTMALAR DİZİNİ

AISC-LRFD 2005	American Institute of Steel Construction (Specification for Structural Steel Buildings)
EuroCode 3	Avrupa Şartnamesi (Design of steel structures)
AS 4100	Australian Standard (Steel Structures)
LB	Yerel Burkulma (Local Buckling)
LTB	Yanal Burulmalı Burkulma (Lateral Torsional Buckling)
LDB	Yanal Buruşmalı Burkulma (Lateral Distortional Buckling)

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Düzenli Gövde Boşluklu Çelik Kirişler

Dünyada çelik yapılar oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. Ülkemizde de çelik yapı inşaatları gün geçtikçe artmaktadır.

Çelik yapıların maliyeti, özellikle ülkemiz koşullarında, fazla olmasına rağmen imalatı hızlıdır ve montaj sonrası yapı hemen kullanıma hazırdır. İmalat süresinden kazanılan zaman örneğin bir sanayi yapısı için (fabrika) üretime daha erken geçilmesi demektir. Binanın yapım aşamasında betonarme bir yapıya oranla maliyetli olması bu fabrikanın üretim ile sağlayacağı kârın yanında dikkate değer bir miktar değildir. Ayrıca çelik yapılar demontaj-montaj yapılabilmesine de olanak sağlar.

Düzenli gövde boşluklu çelik kirişler yapılarda emniyetten taviz vermeden çelikten tasarruf etmeye imkan sağlar. Gövde boşluklarının çelik malzemesinden tasarruf sağlamasının yanında binanın zati ağırlığının ve maliyetinin düşürülmesine de katkısı vardır. Petek kiriş olarak da adlandırılan düzenli gövde boşluklu kirişler dünyada ve ülkemizde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tür kirişlerin özellikle sanayi tipi yapılarda tercih edildiğini görmekteyiz.

### 1.1.1. Boşluklu Kirişlerin Tercih Edilmesi

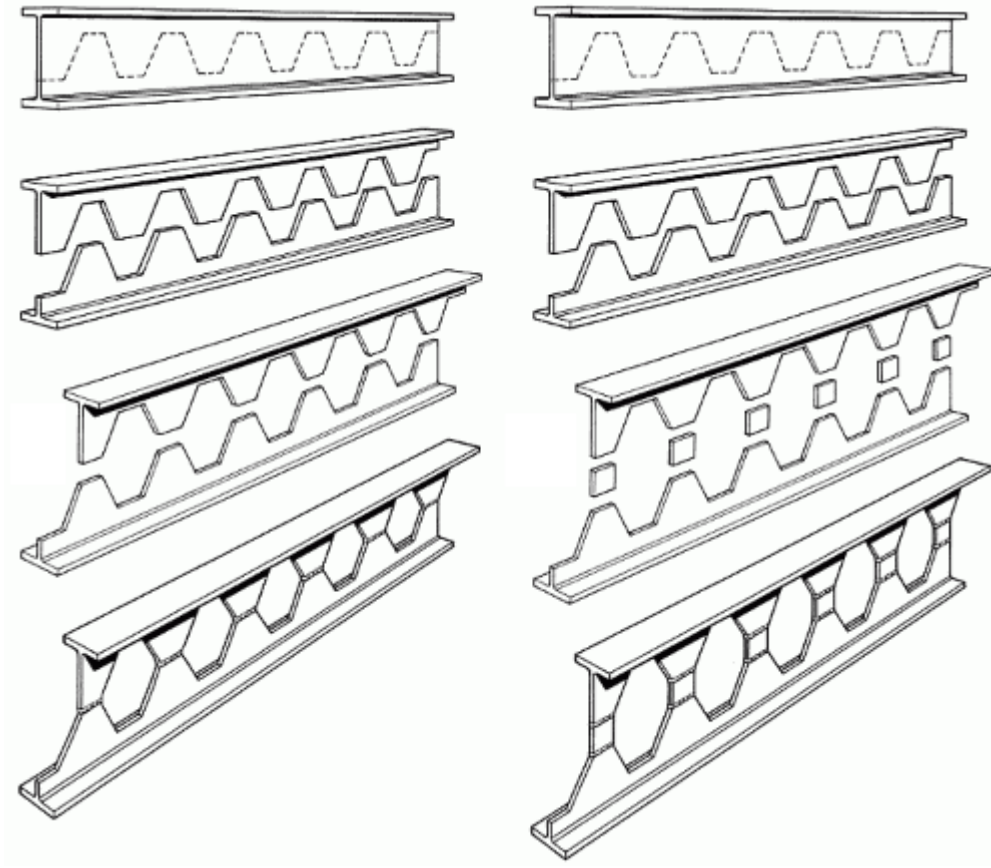
Kirişler; iskelet sistemleri oluşturan çerçevelerin kolon ya da duvar gibi düşey elemanlarını bağlayacak şekilde yatay ya da eğik düzenlenen, döşeme ve kullanım alanı yüklerini kolonlara aktaran taşıyıcı elemanlardır. Çelik yapıda kirişler, üzerilerine etkiyen yüke, geçtikleri açıklıklara, yapı içindeki tesisatın geçirilme şekline bağlı olarak dolu, boşluklu ya da kafes gövdeli olarak düzenlenmektedir.

Açıklıklar büyüdükçe çelik kirişlerin dolu gövdeli düzenlenmesi kiriş yüksekliğini ve ağırlığını artırır. Bu durum mühendisliğin ekonomiklik ilkesi ile uyuşmaz. Gelişmiş

lkelerde büyük açıklıklı ve büyük yükseklikli binaların taşıyıcı sistemlerinde elik elemanların ekonomik olarak kullanılması amacıyla petek kiriş sistemleri uygulanmaktadır. Kiriş gövdesini boşluklu olarak düzenlemek kirişi hafifletir. Petek kiriş kullanımı, hali hazırda profil tablolarında bulunan I Őekilli profillerinden daha yüksek mukavemetli kirişler elde edilmesine olanak vermektedir. Ayrıca boşluklu kirişler yapının tesisat borularının geçirilmesine de imkan sağlar.

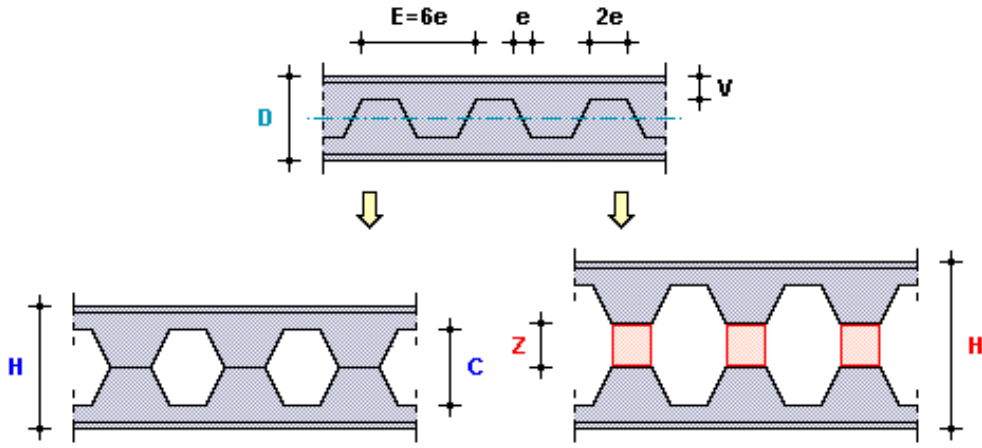
Gövde boşluklarının altı köşeli ve petek görünüşlü olmaları nedeniyle, bu tür kirişlere genel olarak petek kiriş adı verilmektedir. Ancak gövde boşluklarında, teknolojik gelişmelerin etkisiyle, değişik Şekiller de kullanılmaktadır. Petek kirişlerin gövde boşlukları ihtiyaç durumlarına ve estetik kaygılara bağlı olarak dikdörtgen, kare, altıgen, sekizgen ve daire olabilmektedir. Gövde boşlukları, ihtiyaç halinde, kiriş yüksekliğini arttırmak amacıyla kullanılan ara levhalar nedeniyle, sekiz köşeli görünümünde de olabilir. Boşluklu kirişler Almanca'da "Wabentrger", İngilizce'de "Open-Web Expanded Beam, Cellular Beam" Şeklinde anılmaktadır.

Petek kirişler H veya I tipi profillerin gövdesi boyunca zig-zaglı olarak kesilmesi sonucu oluşan iki parçanın kaydırılıp uç bölgelerinden istenildiğinde ek parça kullanılarak Şekil 1.1. deki gibi kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda imal edilirler. Petek kirişler genellikle düzgün yayılı yüklerin taşınmasında ve aktarılmasında kullanılmaktadır.



**Şekil 1.1.** Gövdesi boşluklu kirişlerin kesim ve kaynaklanması [1]

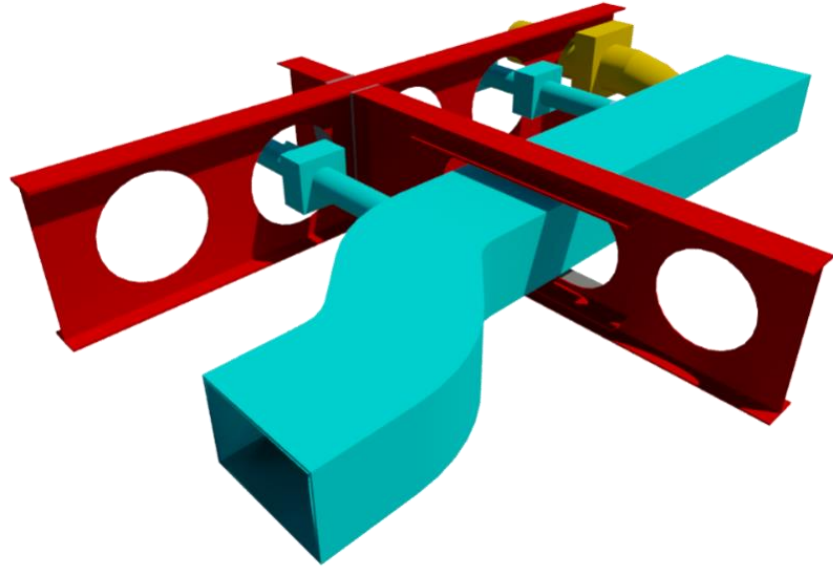
Boşluklu gövdeli kirişlerde kesim işlemi belirli bir ölçü ve oran ile yapılır. Kesimden sonra kiriş yüksekliğini artırmak için araya ek parça yerleştirilebilir. (Şekil 1.2.) [2]  
Bu durumda kiriş yüksekliği eklenen parça yüksekliği kadar arttırılmış olur.



**Şekil 1.2.** Petek kirişlerin kesim oranları [2]

### 1.1.2. Boşluklu kirişlerin avantajları;

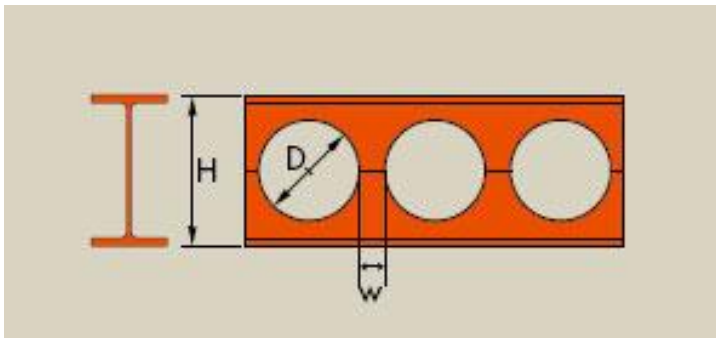
- Düşey eğilme rijitliğini artırır.
- Normal kesitli kirişlere göre aynı ağırlıkta olmasına rağmen kesit ataletleri daha büyüktür.
- Kısa açıklıklardan uzun açıklıklara kadar birçok kullanım alanı vardır.
- Çok katlı yapılarda kiriş gövdelerindeki boşluklar boru geçişine izin verdiği için tesisat işleri kolaylaşır (Şekil 1.3).
- Beton tabliyesi dahil toplam döşeme derinliği azaltılmış olur.
- Zarif görünüşleri sayesinde kirişlerin görünmesinin kaçınılmaz olduğu durumlarda tercih edilebilirler.
- Aynı kg/m ağırlıkta daha yüksek eğilme mukavemeti sağlayabilir,
- İstenilen yapı yüksekliğini geniş ölçüde sağlama imkanı verir,
- Boşluklu yapıya sahip olması boya yapılacak yüzeyi azaltmaktadır. [3]



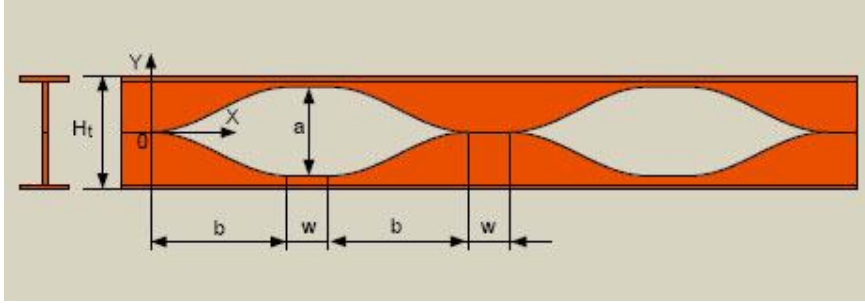
**Şekil 1.3.** Boşluklu kirişler tesisat borularının geçirilmesinde kolaylık sağlar [4]

### 1.1.3. Gövdesi Boşluklu Kiriş Türleri

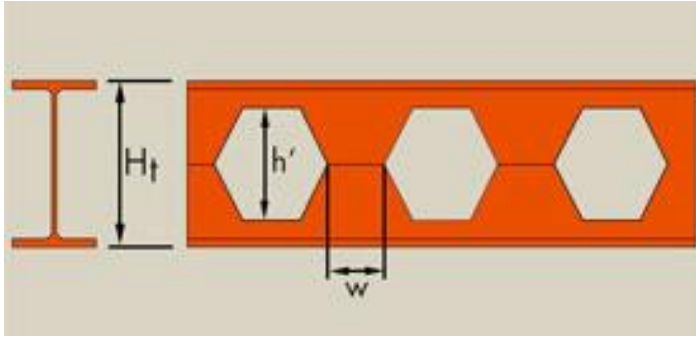
Gövde boşluklu kiriş türleri Şekil 1.4-1.7’de gösterilmektedir.



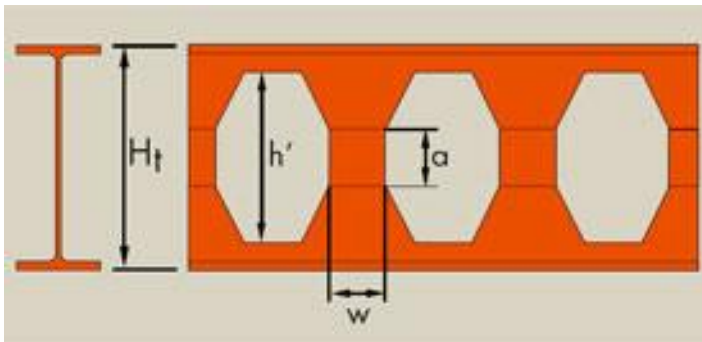
**Şekil 1.4.** Dairesel boşluklu hücresel kiriş kesiti



Şekil 1.5. Angelina kirişi



Şekil 1.6. Hexagonal boşluklu petek kiriş kesiti



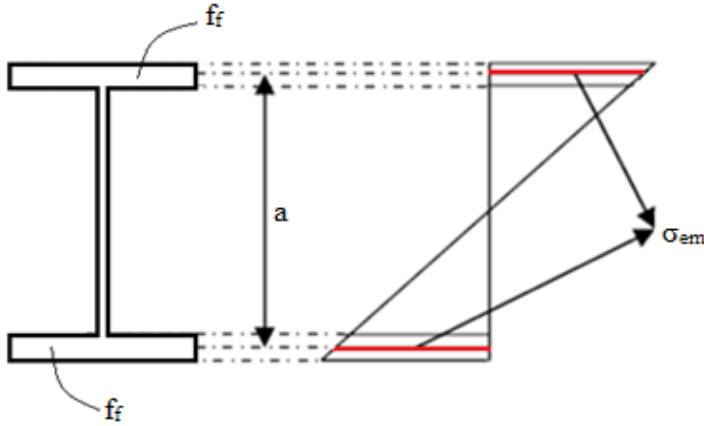
Şekil 1.7. Ara levha ekli petek kiriş (sekizgen)

#### 1.1.4. Boşluklu kirişlerin kullanımında dikkat edilmesi gereken;

- Gövdede bulunan geniş boşluklar sebebiyle dolu gövdeli olan kirişlere göre farklı yapısal davranışlar gösterirler.
- Noktasal yüklerin belirgin olduğu durumlarda kullanımına dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Boşlukların köşegenli olduğu durumlarda (altıgen, sekizgen boşluklu vs.) boşluk köşelerinde oluşan gerilme birikmeleri dinamik yüklerin bulunduğu yerlerde kullanımına dikkat etmek gereklidir. Bu durumda dairesel gözlü petek kiriş kullanımı değerlendirmek daha uygun olabilir.

#### 1.1.5. Kesit yüksekliğinin arttırılmasının sağladığı avantajlar

Kiriş kesitinin yüksekliğinin arttırılması kirişin moment taşıma kapasitesini ve kesit ataletini artırır.



Şekil 1.8. I profil kesitindeki gerilme dağılışı



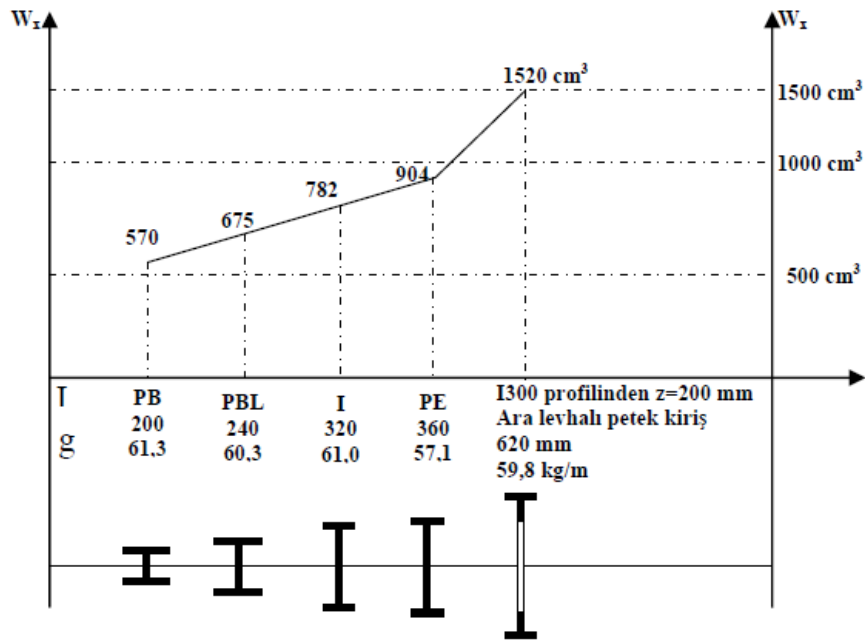
Bir profilin emniyetle taşıyabileceği moment yaklaşık olarak:

$$M \approx a \times f_f \times \sigma_{em} \quad (1.1)$$

Burada  $\sigma_{em}$  başlığın ortalama emniyet gerilmesini ifade etmektedir.

Yukarıda verilen yaklaşık formülde  $a$  mesafesi büyütülürse kirişin taşıyabileceği moment değeri de artacaktır. Zaten petek kirişlerin üretilme amacı da kiriş yüksekliğinin büyütülerek kirişin taşıyabileceği momentin artırılmasıdır.

Metre/boy ağırlıkları yaklaşık olarak aynı olan petek kirişlerin yalnızca  $a$  mesafesinin artması sonucu mukavemet momentinde meydana gelen artış Şekil 1.9. da açık ve net olarak görülebilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi ara levha kullanılan kirişte  $a$  yüksekliğindeki artışa bağlı olarak  $W_x$  değeri diğer profillere oranla bariz şekilde artmıştır. [5]

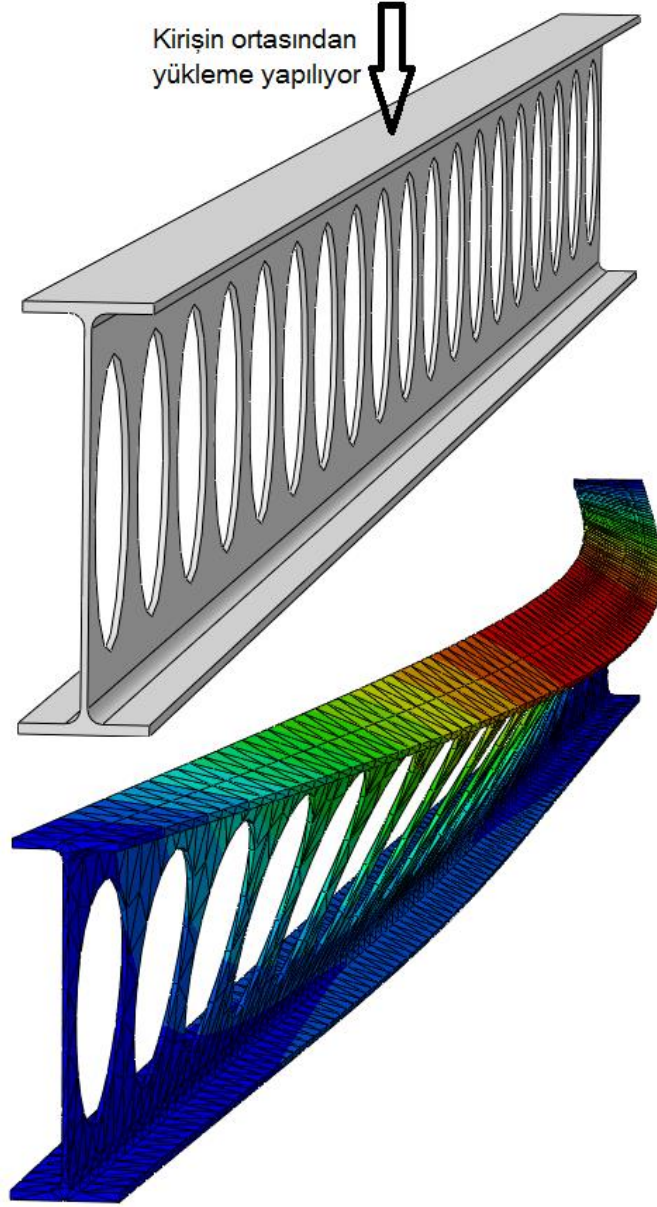


Şekil 1.9. I profil ve petek kirişler arasındaki mukavemet momenti artışı [5]

## 1.2. Yanal Burulmalı Burkulma

Eğilme etkisi altındaki yapı elemanlarından kirişler, ekonomiklik sağlamak amacıyla, yüklemenin yapıldığı ekseninin (kuvvetli eksen) rijitliği, diğer eksene (zayıf eksen) göre daha büyük enkesitte olacak şekilde yerleştirilirler. Bu elemanlar, yanal yer değiştirmeye ve dönmeye karşı tutulu değilse, zayıf eksenleri etrafındaki eğilme ve burulma dayanımları yetersiz kalabilir ve yanal burulmalı burkulma ile göçmeye maruz kalabilirler.

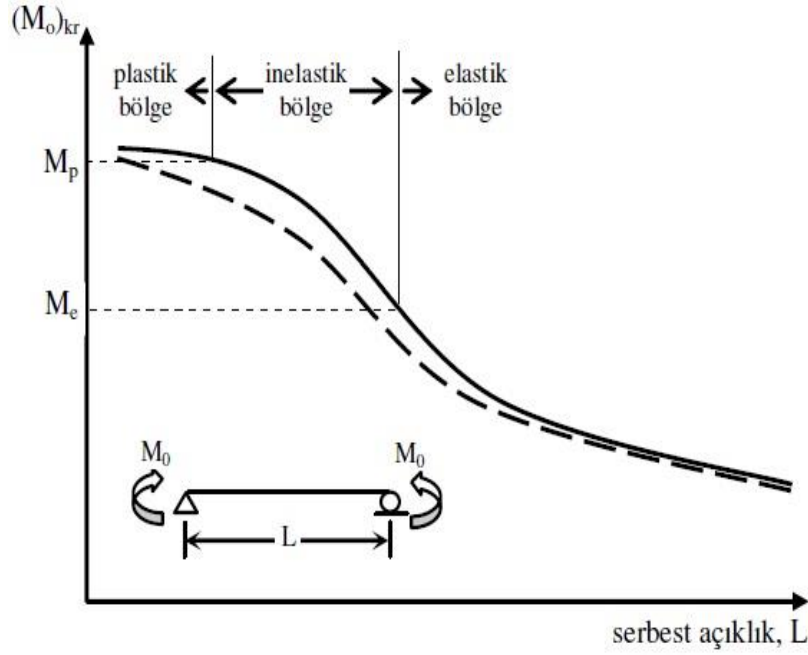
Yanal burulmalı burkulma, kritik bir moment değerinden sonra elamanın yatay ve düşey doğrultuda ötelenmesi ile birlikte enkesitin dönmesi şeklinde meydana gelir. [6] Bu olay eğilme etkisine maruz kalan tüm çelik elemanlarda görülebilir. Bu durum yapılan araştırmalar sonucu elde edilen teorik formüller ile eğilme etkisi altındaki I, H vs. gibi açık enkesitli elemanların analizinde göz önüne alınmaktadır.



**Şekil 1.10.** Sabit moment etkisindeki kirişin yanal burulmalı burkulma davranışı

Kuvvetli eksenini etrafında eğilmeye maruz kalan I kesitli profiller gibi, ince cidarlı düzlem elemanlardan oluşan açık enkesitli kirişlerde de yanal burulmalı burkulma görülme olasılığı yüksektir. Yanal burulmalı burkulma, yük taşıma kapasitesinin başlangıçta sabit olan değerinin, büyük şekil değiştirmelere ve akmaya bağlı olarak azalması ile açıklanır. Yanal burulmalı burkulma, yanal harekette serbest açıklığı kısaltacak şekilde yerleştirilen mesnetlerle veya burulma rijitliği yüksek kesitlerin kullanımıyla önlenir.

Yanal burkulma dayanımını etkileyen en önemli değişkenler, yanal mesnetler arasındaki mesafe ve enkesit geometrisidir. Yükün şekli ve yeri, elemanın sınır koşulları, malzeme özellikleri, artık gerilmeler, geometrik önkusurlar ve enkesitteki süreksizlikler de yanal burulma dayanımını etkilemektedir. Yanal burulmalı burkulma davranışının serbest açıklığa göre değişimi Şekil 1.11 de grafiksel olarak sunulmuştur.



**Şekil 1.11.** Yanal burulmalı burkulma dayanımının serbest açıklıkla değişimi [7]

Çizelgedeki kalın çizgi, kusursuz geometrideki basit mesnetli kiriş için kritik yük değerlerini göstermektedir. Kesikli çizgi ise geometrik önkusur söz konusu olduğu durum içindir. Bu davranış 3 bölgede incelenebilir. [7]

- I. Uzun kirişlerde etkin olan, elastik burkulma,
- II. Kirişin en azından bir kısmının akma gerilmesine ulaştığında stabilite kaybının görüldüğü inelastik burkulma,
- III. Burkulmanın plastik momentten sonra gerçekleşeceği kadar kısa kirişlerde görülen plastik burkulma,

Bu tez çalışmasında hücresele kirişlerin yanıl burulmalı burkulma analizi yapılmıştır. Yapısal tasarımda stabilitenin önemi dikkate alınmıştır.

### 1.2.1. Elastik Yanal Burulmalı Burkulma

Timoshenko ve Gere çözümlerinde referans momenti ( $M_{ocr}$ ) formül (1.2) deki şekilde tanımlanmıştır.

$$M_{ocr} = \frac{\pi}{L_{br}} \times \sqrt{E \times I_y \times G \times J} \times \sqrt{1 + W^2} \quad (1.2)$$

W değeri formül (1.3) den hesaplanmaktadır.

$$W = \frac{\pi}{L_{br}} \times \sqrt{\frac{E \times C_w}{G \times J}} \quad (1.3)$$

Nethercot ve Rockey tarafından yapılan çalışma ile kirişlerin elastik yanıl burulmalı burkulma yapmadan taşıyabileceği kritik moment ( $M_{cr}$ ) formül (1.4) de tanımlanmıştır.

$$M_{cr} = C_m \times M_{ocr} \quad (1.4)$$

Burada  $C_m$  yükleme ve mesnet koşullarına bağılı olarak belirlenen bir katsayı

$$C_m = \frac{A_m}{B_m} \quad (1.5)$$

$$A_m = 2,95 - 1,143 \times W^2 + 4,070 \times W \quad (1.6)$$

$$B_m = 1,0$$

$M_{cr}$  değeri hesaplandıktan sonra kirişe yanal burulmalı burkulma yapmadan yüklenebilecek maksimum yük formül (1.7) den hesaplanabilir. Burada unutulmaması gereken nokta hesaplanan  $P_{cr}$  değerinin, şekil 1.10 daki gibi kirişin ortasından yüklenen konsantre yük değeri olduğudur.

$$P_{cr} = 4 \times \frac{M_{cr}}{L} \quad (1.7)$$

İ. Kalkan ve A. Büyükkaragöz [8] 2004 yılında yaptıkları çalışmalarında bir kirişin elastik veya inelastik yanal burulmalı burkulma altındaki kiritik momentini formül (1.8) deki gibi tanımlamışlardır.

$$M_{crb} = \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \rightarrow L_b \leq L_{rb}; \Rightarrow M_p \times \left[ 0,7 + \frac{0,3 \times \left[ 1 - 0,7 \times \frac{M_p}{\alpha_m \times M_{ob}} \right]}{0,61 - 0,3 \times \beta_m + 0,07 \times \beta_m^2} \right] \leq \min(\alpha_m M_{ob}, M_p) \\ \text{if } \rightarrow L_b > L_{rb}; \Rightarrow \frac{C \times \pi}{L} \times \sqrt{E \times I_y \times GJ \times \left[ 1 + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \times \frac{E \times I_w}{GJ} \right]} \end{array} \right\} \quad (1.8)$$

### 1.3. Yanal Buruşmalı (Distortional) Burkulma

Düzlemde yüklenen çelik I kirişlerde, profilin başlık ve gövde narinliklerine bağlı olarak lokal burkulmalar ve yanal burulmalı burkulmalar görülür.

Yanal burulmalı burkulma (LTB), kiriş kesitinin yanal yönde ötelendiği ve gövdede buruşmalar olmadan rijit yapı gibi döndüğü bir eğilme burkulma modudur. Lokal burkulmalar (LB) ise kirişin tümünden yanal sapsması ve dönmesi olmaksızın kısa mesafede başlık ve/veya gövdenin burkulmasıdır. [8] LTB ve LB sırasıyla, uzun ve kısa açıklıklı kirişlerin karakteristik burkulma modlarıdır. Kuvvetli başlıklı, zayıf gövdeli orta uzunluklu kirişlerde, kirişin tüm yanal deformasyonu LTB ve LB bir kombinasyon oluşturarak gövde buruşmalarına (web distortions) neden olabilir. Bu olaya literatürde yanal buruşmalı burkulma (LDB) denmektedir.

Kiriş kesitinin ötelenmesi ve dönmesi başlık mesnetleri tarafından engellendiğinde sınırlanmış buruşmalı burkulma (RDB) denilen LDB'nin yaygın bir türü oluşur. RDB etkisi genellikle çelik ve betonun kompozit kullanıldığı kirişlerde karşılaşılan bir durumdur.

Roberts ve Jhita [9] enerji yöntemini kullanarak çift simetrik çelik I profilli kirişlerin yanal burulmalı burkulma, lokal burkulma ve buruşmalı burkulma modlarını analiz etmişlerdir. Gövde kalınlığı artıka başlık kalınlığı oranının da arttığını, gövde buruşmalarının artmasından dolayı narin bir kirişin kritik yükünde azalmalar olduğunu tespit etmişlerdir. Kesitin kısa olduğu kuvvetli I kirişlerde buruşmalı burkulma ve lokal burkulmalar nadiren oluşmuş, kesitin gövde yüksekliği arttıkça distortional burkulmanın da baskın hale geldiğini belirtmişlerdir.

Bradford [10] çelik I kirişlerin elastik ve inelastik buruşmalı burkulması konulu çalışmasında, kuvvetli flanş-narin gövdeli kısa I kirişlerde elastik yanal burulmalı burkulma altında elastik buruşmalı burkulma gerilmesinin önemli ölçüde düştüğünü belirtmiştir. Çelik I kirişin burkulma dayanımındaki azalmalar gövde buruşmaları nedeniyle inelastik burkulmada elastik burkulmaya göre daha az olduğunu göstermiştir. Bu durumu gövde buruşmaları etkisini ortadan kaldırmak için inelastik burkulmada çeliğin akmaya meyil etmesiden dolayı olduğu şeklinde açıklamıştır. Ayrıca Bradford ve Trahair [11] tarafından geliştirilen sonlu elemanlar metodunu kullanarak, Bradford [10] uç mesnetlerinin derecesinin azalması ile gövde buruşmalarının artmasından dolayı bir çelik I kirişin burkulma dayanımının azalmasını bulmuştur.

Pi ve Trahair [12] gövde buruşmaları LDB de bir çelik kirişin dönme rijitliğinin azaltığını bildirmiştir. Sonra sonlu elemanlar programını kullanarak gövde buruşmalarından dolayı rijitliğindeki azalmaların dikkate alınması gerektiğini ve ayrıca kuvvetli flanşlı bir I kirişin buruşmalı burkulma momentini hesapladığında dönme rijitliğinde azalmalar olduğunu göstermiştir.

Tek açıklıklı çelik monoray I kirişlerin elastik yanal buruşmalı burkulması üzerinde çalışan Trahair'ın [13] çalışmasında I kirişin burkulma direncindeki düşüşün

başlıkların kuvvetli hale gelmesiyle arttığı belirtilmiştir. Trahair yaptığı sonlu elemanlar analizi ile çelik I kirişlerin burkulma direncinin alt başlık yüklenmesi durumunda kayma merkezi yüklemesi ve üniform eğilmeye göre büyük ölçüde buruşmalardan etkilendiğini göstermiştir. Burkulma direncindeki bu azalmaları uç mesnetlerde üst başlık mesnetleri ve gövde güçlendiricilerinin bulunması durumunda azaldığını tespit etmiştir.

Zirakian ve Showkati [14] tarafından yapılan orta açıklıkta tekil yüklemeye maruz bırakılmış basit mesnetli fabrikasyon çelik I kirişlerin buruşmalı burkulma deneylerinde, üst flanş orta açıklık etrafında RDB elde etmek için ve yükleme noktası ile uç mesnetler arasında desteklenmemiş açıklıkta LDB elde etmek için orta açıklıkta etkili bir yan destek ile elemanları mesnetlemiştir. Numunelerin narinliklerini inelastik burkulma kontrol edilsin diye AISC/LRFD'nin plastik ve elastik narinlik sınırları arasında seçmişlerdir. Orta açıklıkta ve açıklığın dörtte bir noktalarındaki gerilme ölçümleri sayesinde Zirakian ve Showkati [14] kirişlerin buruşmalı burkulma (distorsional buckling) ile göçmelerini gösteren gövde buruşmalarını doğrulamayı başarmışlardır. Sonrasında kirişlerin testlerde maksimum ölçülen burkulma yükleri AISC/LRFD [15] ve AS 4100 [16] ye göre tasarım yükü tahminleri ile karşılaştırmışlar ve her iki şartnamenin değerlerini de uzun kirişler için düşük inelastik davranışlarla sağladığını ve kısa kirişler için yüksek inelastik davranış tahminlerinin güvenilemez olduğunu tespit etmişlerdir.

Bradford ve Wee [17] uç noktalarında mesnetlere oturan açıklık ortası veya açıklığın üç noktasından yüklenmiş, sıcak haddelenmiş sekiz çelik I kirişi test ettikleri çalışmalarında üst flanş seviyesinde yanal sınırlayıcı mesnetlerin olmaması bir yanal distorsional modda kirişin burkulmasına neden olmuştur. Bradford [18] tarafından geliştirilen inelastik sonlu elemanlar metodundan elde edilen yük tahminleri ile kullanılan test verilerinden Modified [19], Southwell [20], ve Massey [21] tekniklerinden yola çıkılarak hesaplanan yüklerle iyi bir uyum içinde olduğunu görmüşlerdir. [8] Tahminler ve nümerik yükler üçüncü yüklemeye kıyasla açıklık ortasına konsantre yükleme durumunda daha yakın bir ilişki olduğu görülmüştür.[8] Bradford ve Wee [17] ayrıca numunelerin test yüklerinin AS4100 [16] ve BS5950 [22] şartname çözümlerinin kirişin üç noktadan yüklenmesi durumunda burkulma yükleri



tahminlerin üstünde olmasına rağmen açıklık ortasından tekil yükleme durumunda şartname çözümlerinin altında kaldığını belirtmişlerdir.

İ. Kalkan ve A. Büyükkaragöz [8] çift simetrik çelik I kirişlerin yanal buruşmalı burkulma modunda web buruşmaları etkisini analitik ve sayısal olarak araştırmışlardır. Bu çalışmaların Bradford [10], Pi ve Trahair [23] ve Nethercot ve Trahair [24]'in çalışmalarını temel alarak çift simetrik çelik I profilli kirişlerin yanal burkulma momentlerini tahmin için alternatif denklemler geliştirmişlerdir. Bu denklemlerin hem elastik hem de inelastik sınırlar için geçerli olduğunu belirtmişlerdir.

İ. Kalkan ve A. Büyükkaragöz [8] 2004'te yaptıkları çalışmalarında; bir kirişin elastik veya inelastik yanal buruşmalı burkulma altındaki kritik momentini ( $M_{crd}$ ) formül (1.9)'daki şekliyle açıklamışlardır.

$$M_{crd} = \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \rightarrow L_b \leq L_{rb}; \Rightarrow M_p \times \left[ 0,7 + \frac{0,3 \times \left[ 1 - 0,7 \times \frac{M_p}{\alpha_m \times M_{od}} \right]}{0,61 - 0,3 \times \beta_m + 0,07 \times \beta_m^2} \right] \leq \min(\alpha_m M_{od}, M_p) \\ \text{if } \rightarrow L_b > L_{rb}; \Rightarrow \frac{C \times \pi}{L} \times \sqrt{E \times I_y \times GJ_e \times \left[ 1 + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \times \frac{E \times I_{we}}{GJ_e} \right]} \end{array} \right\} \quad (1.9)$$

İ. Kalkan ve A. Büyükkaragöz [8] analiz ettikleri kirişlerde burkulma momentindeki azalmaların gövde narinliği arttığında gövdedeki buruşmaların (distortion) da artmasından dolayı olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları sonlu elemanlar analizi sonucu bulunan burkulma momenti değerleri AISC-LRFD [25] ve EC3 [26]'e göre kıyaslandığında AS4100 [16] şartnamesindeki LTB çözümleri burkulma momenti tahminleri ile daha yakın bir uyum içinde olduğunu ifade etmişlerdir.

## 2. NÜMERİK VE ANALİTİK ÇALIŞMA

### 2.1. Nümerik Çalışma

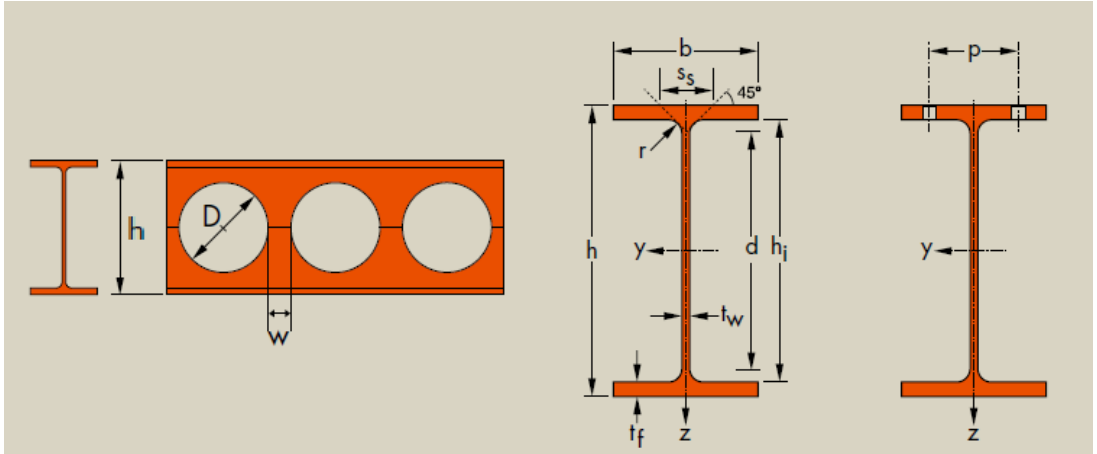
Sonlu elemanlar programıyla hüresel kirişler modellenmiştir. Yapılan analizler ile modellenen kirişlerin burkulma anına gelmeden hemen önce taşıyabildikleri maksimum yükler hesaplanmıştır. Bulunan  $P_{cr}$  yükleri kirişlerin orta noktalarından düşey doğrultuda etkilmiştir. Bu yükleme sonucunda yaptıkları yanal deplasman değerleri hesaplanmıştır.

#### 2.1.1. Modelleme Esasları

##### 2.1.1.1. Sonlu Elemanlar Programı

Bu tez çalışmasında petek kirişlerin modellenmesi için sonlu elemanlar programı olarak ABAQUS/CAE 6.12 [27] programı kullanılmıştır.

##### 2.1.1.2. Analizlerde Kullanılan Kirişler



Şekil 2.1. Dairesel boşluklu I profillerin kesit detayları [28]

**Çizelge 2.1.** Dairesel boşluklu I profillerin boyutları [28]

<b>KİRİŞ</b>	<b>h (mm)</b>	<b>b(mm)</b>	<b>t<sub>w</sub> (mm)</b>	<b>t<sub>f</sub> (mm)</b>	<b>r(mm)</b>	<b>D(mm)</b>	<b>w (mm)</b>
<b>IPEO400</b>	599,1	182	9,7	15,5	21	420	105,00
<b>IPEO450</b>	677,7	192	11,0	17,6	21	475	118,75
<b>IPEO500</b>	751,9	202	12,0	19,0	21	525	131,25
<b>IPEO550</b>	828,5	212	12,7	20,2	24	580	145,00
<b>IPEO600</b>	906,7	224	15,0	24,0	24	630	157,50
<b>IPEO750</b>	1144,2	268	15,6	25,4	17	790	197,50

Bu tez çalışmasında incelenmek üzere, Arcelor firmasına [28] ait çizelge 2.1. deki düzenli dairesel gövde boşluğuna sahip 6 tip profil kullanılmıştır.

Çizelge 2.1. de yer alan profiller için Amerikan şartnamesi AISC-LRFD 2005 te yer alan formül (2.1) ile kirişlerin elastik davranış göstererek yanal burulmalı burkulma yaptığı uzunluk ( $L_r$ ) değerleri hesaplanmıştır.

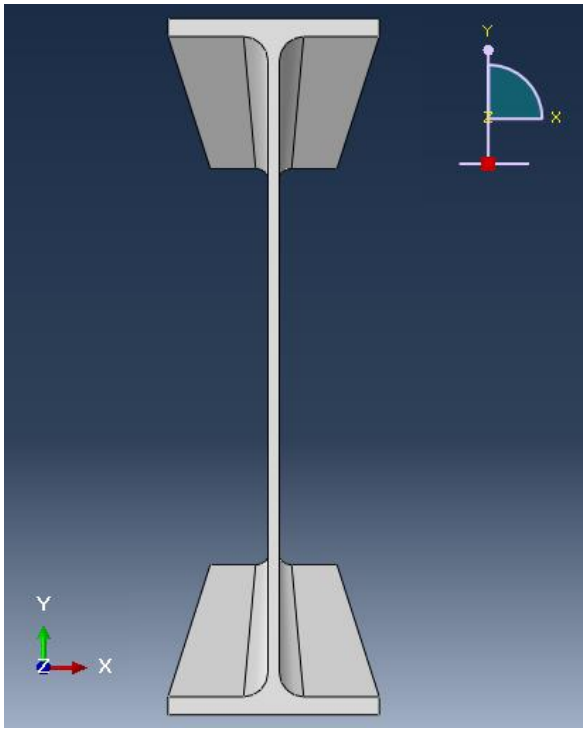
$$L_r = 1,95 \times r_{ts} \times \frac{E}{0,7 \times f_y} \times \sqrt{\frac{J \times c}{S_x \times h_0}} \times \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6,76 \times \left( \frac{0,7 \times f_y}{E} \times \frac{S_x \times h_0}{J \times c} \right)^2}} \quad (2.1)$$

**Çizelge 2.2.** Kirişlerin elastik yanal burulmalı burkulmaya başladıkları uzunluklar

<b>Profil Adı</b>	<b>L<sub>r</sub> (m)</b>
IPEO400	4,68
IPEO450	4,90
IPEO500	5,10
IPEO550	5,30
IPEO600	5,66
IPEO750	6,55

Bu formül sonucunda en yüksek kiriş olan IPEO750 için  $L_r$  değeri 6,55m olarak bulunmuştur. Her kesit aynı uzunluklar için hesaplanacaktır. Bu nedenle her bir tip kiriş Abaqus CAE programında boyutlandırılarak 10 m den başlamak suretiyle 100 m ye kadar kiriş uzunlukları 5'er metre artırılarak 19 ayrı uzunlukta kiriş oluşturulmuştur. Modellerin gerçeğe yakın sonuçlar vermesi amacıyla solid elemanlar kullanılmıştır.

Abaqus ile boyutlandırılan kesitlerde flanş köşeleri, gövde davranışına etkisi olmadığı için yuvarlatılmamıştır. Ancak gövde ile flanşın birleştiği yerlerin pahlı olarak geçişi gövde davranışı açısından önem arz ettiği için bu kısımlar yuvarlatılarak geçilmiştir.



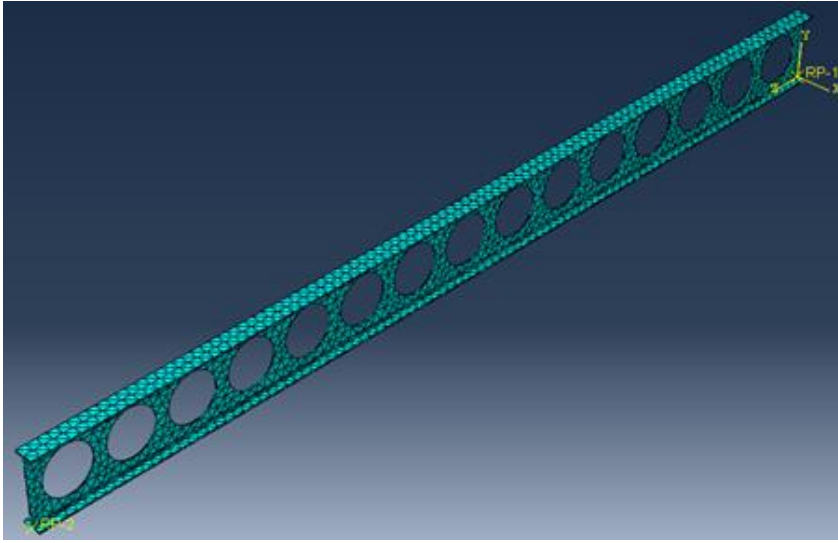
**Şekil 2.2.** Abaqus ile boyutlandırılan kiriş kesiti

### 2.1.1.3. Malzeme Özellikleri

Kirişler çelik kiriş olarak teşkil edilmiş ve elastik analiz yapılmıştır. Bu sebeple çeliğin elastik özelliklerinden elastisite modülü  $E=2 \times 10^5$  MPa ve poisson oranı  $\nu=0,3$  olarak programa girilmiştir.

#### 2.1.1.4. Mesh Aralığının Belirlenmesi ve Meshleme İşlemi

Sonlu elemanların kullanıldığı analitik modellemelerde eleman sıklığı ve düzeni analiz sonuçlarını etkileyen temel faktörlerden biridir. Bu nedenle sonlu eleman ağının sıklığı ve düzeni en uygun sonucu verecek ve mesh aralığı her eleman da ortak olacak şekilde, kullanılan bilgisayarın performansı da göz önünde bulundurularak 100mm olarak belirlenmiştir. Meshleme işlemi yapılarak her bir kirişte 100mm x 100mm boyutlarında sonlu eleman ağı oluşturulmuştur.



Şekil 2.3. Mesh işlemi yapılan kiriş örneği

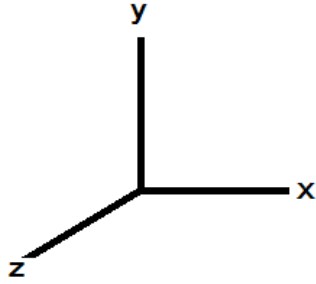
#### 2.1.1.5. Set Oluşturulması

Set, Abaqus programında model üzerinde herhangi bir noktaya veya noktalara isim verilerek analiz sonucunda o noktalar ile ilgili değerleri görebilmemizi sağlayan bir modüldür. Bu nedenle set oluşturulması analizler sonucunda deplasman değerlerini okuyabilmemiz açısından önemlidir. Kirişler açıklık ortasında tekil yüklemeye maruz bırakılmıştır. Yükleme sonucu maksimum sehim yine kirişin orta noktasında ortaya çıkacağından kirişlerin orta kısımlarındaki node'lar seçilerek “Yük” adlı bir set

oluşturulmuştur. Ayrıca mesnet koşullarının belirlenmesinde kolaylık sağlaması açısından mesnetlenecek yerlerde “Hareketli” ve “Sabit” adlı setler oluşturulmuştur.

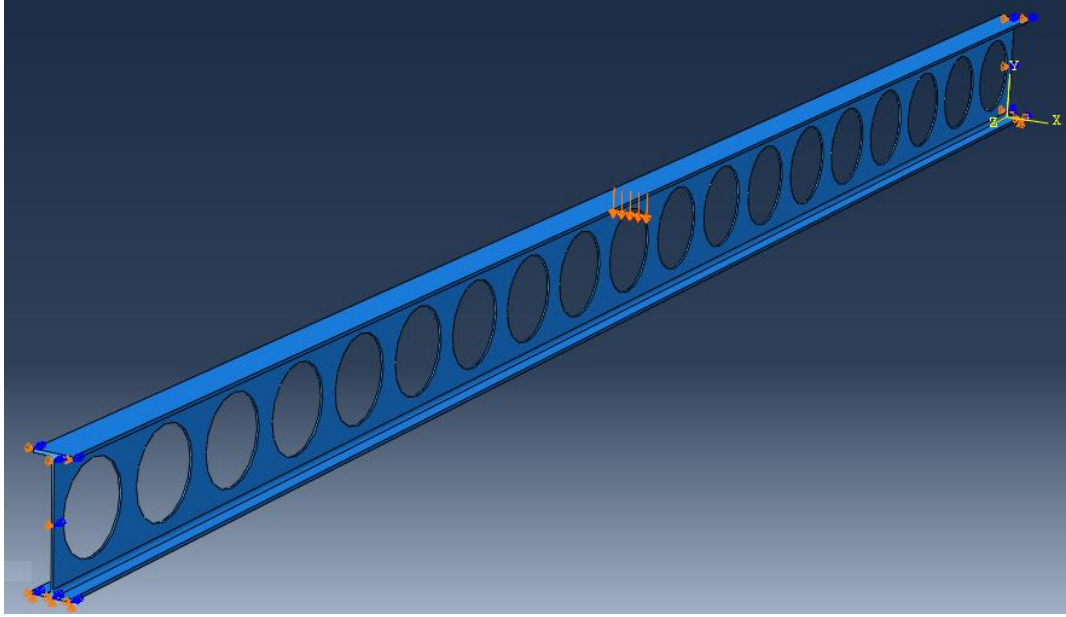
#### 2.1.1.6. Mesnet Koşullarının Belirlenmesi

Abaqus programında modellenen elemanlar için x yatay, y düşey ve z elemanın eksenini boyunca olan yönleri ifade etmektedir. Şekil 2.4.te bu yönler gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Abaqus/CAE Programında x-y-z yönleri

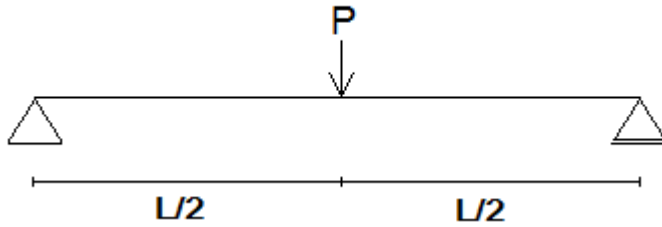
Basit kiriş mesnet koşullarının tanımlanması amacıyla kirişler biri sabit diğeri hareketli iki mesnet üzerine yerleştirilmiştir. Bu amaçla alt başlık uçları y doğrultusunda ötelenmeye karşı tutulmuştur. Aynı zamanda x yönünde ötelenmenin engellenmesi için bu yönde de tutulmuştur. Bununla birlikte sabit olan mesnet, z yönünde de ötelenmeye karşı sınırlanmıştır, hareketli olan mesnet, bu doğrultuda serbest bırakılmıştır. Yine alt başlık uçlarına yerleştirilen sabit ve hareketli mesnetlerin kiriş eksenini boyunca dönmesinin engellenmesi için z ekseninde dönmeye karşı sınırlandırılmışlardır. Bu şekilde kiriş sonları burulmaya karşı tutulmuştur. Kirişin z doğrultusundaki ötelenmeleri mesnet noktalarında tutulmayarak, kirişin çarpılma deformasyonlarına izin verilmiştir. Bu şekilde çarpılma etkisi hesaba katılmamıştır. Ayrıca yanal burulmalı burkulmanın net olarak görülmesi için kiriş uçları kesit boyunca mesnetlerle x yönünde harekete ve z yönünde dönmeye karşı sınırlandırılmıştır. Şekil 2.5.de boyutlandırılan bir elemanın yükleme ve mesnetlenme durumu gösterilmektedir.



**Şekil 2.5.** Kirişlerin mesnetleme ve yükleme yapılan durumları

Kirişlerin yüklenmesi oluşturulan sonlu eleman ağı üzerindeki node'ların üzerine yapılmıştır. IPEO400, IPEO450, IPEO500, IPEO550 ve IPEO600 kesitlerinin yüklenmesi için açıklık ortasındaki 5 node seçilmiş, IPEO750 kesitinin yüklenmesi için ise yine açıklık ortasındaki 7 node seçilmiştir.

Mesnet koşullarını doğrulamak için kesitlerden birkaçı için deplasmanlar aşağıdaki formül (2.2) ile kuramsal olarak hesaplanmış ve analitik sonuçlar ile kıyaslanmıştır.



**Şekil 2.6.** Basit mesnetli kiriş

$$\Delta = \frac{P \times L^3}{48 \times E \times I} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki formül (2.2) ile 30m açıklıklı IPEO400 kirişinin 30mm sehim yapması için gereken tekil kuvvet 6261.33 N olarak hesaplanmıştır. Bu kuvvet Abaqus ile oluşturduğumuz modele yüklendiğinde oluşan yer değiştirme değeri 29,63 mm olarak elde edilmiştir. Aynı formül ile 50m IPEO750 kirişinin 20mm sehim yapması için gereken tekil kuvvet 8469.5 N olarak hesaplanmıştır. Analitik modele bu kuvvet uygulandığında kirişin yaptığı sehim 20,6 mm olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere basit mesnet koşulları yer değiştirme bakımından yeterli yaklaşıklıkla sağlanabilmiştir.

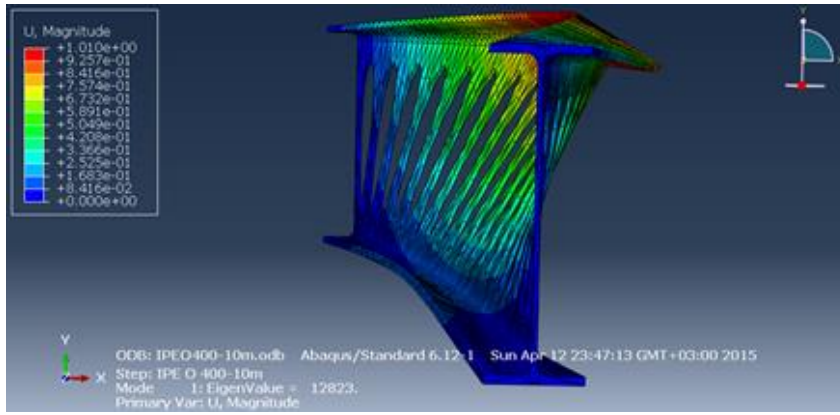
### **2.1.2. Burkulma Analizinin Yapılması**

Mesnet koşulları da belirlenen kirişlerin eigenvalue değerlerinin belirlenmesi için Buckle Analiz yapılmıştır. Bunun için programda Steps linkinden prosedür türü “Linear Perturbation” olarak belirlenmiş ve analiz listesinden “buckle” seçilmiştir. Kirişlere 1 birimlik yükleme verilerek burkulma analizi yapılmıştır.

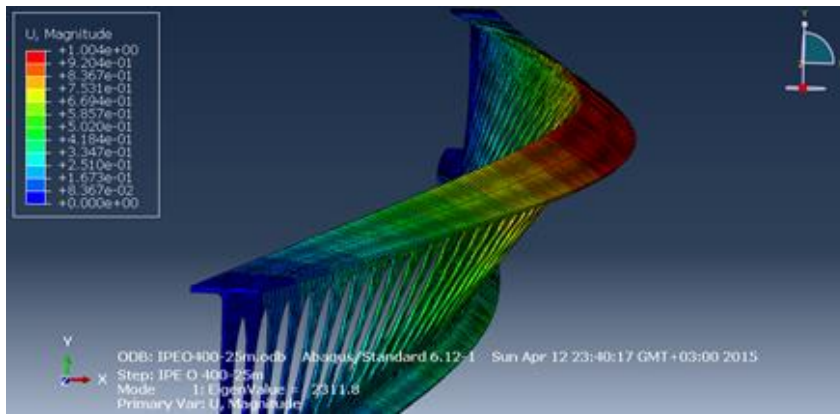
#### **2.1.2.1. Analizi Yapılan Kirişlerin Bazılarının Burkulma Şekilleri**

Burkulma analizi yapılan kirişlerin bazılarına ait burkulma durumları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. (Şekil 2.7-2.36) Analizi yapılan diğer kirişlere ait burkulma şekilleri ekler kısmında verilmiştir. (Bkz. EK 1)

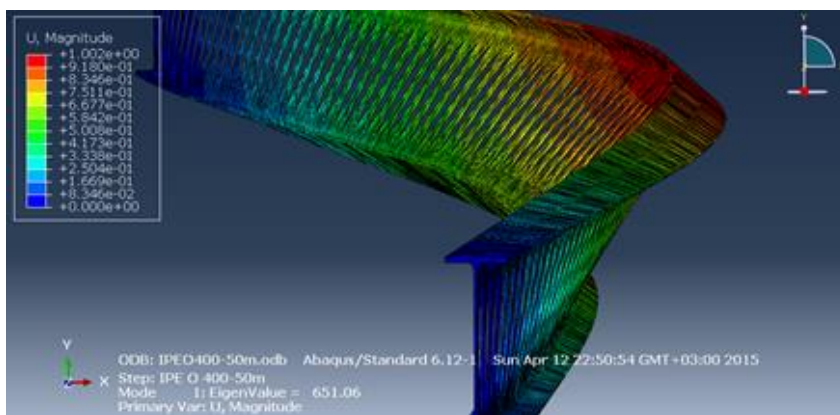




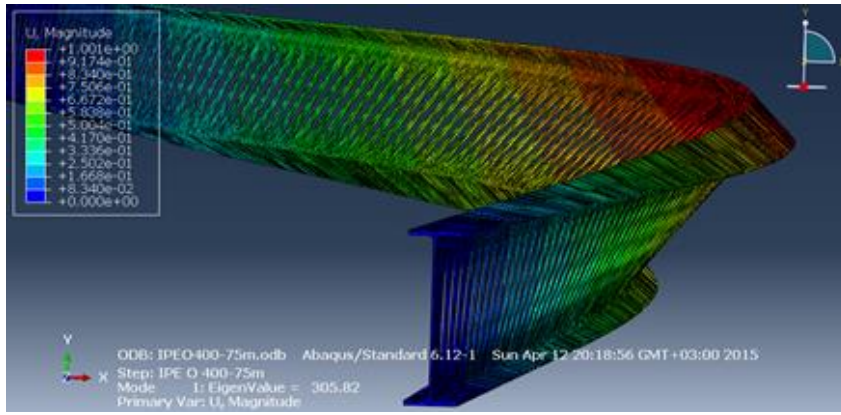
Şekil 2.7. IPEO400-10m



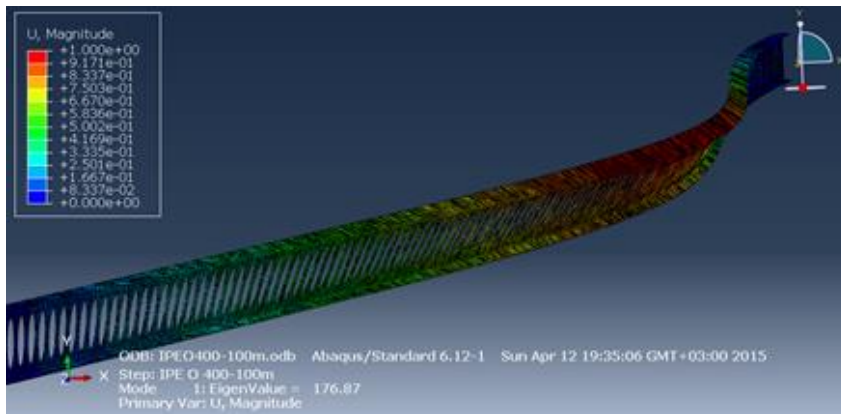
Şekil 2.8. IPEO400-25m



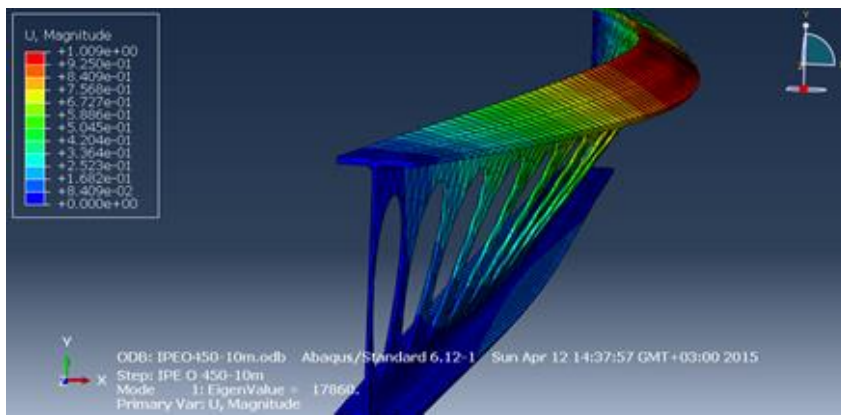
Şekil 2.9. IPEO400-50m



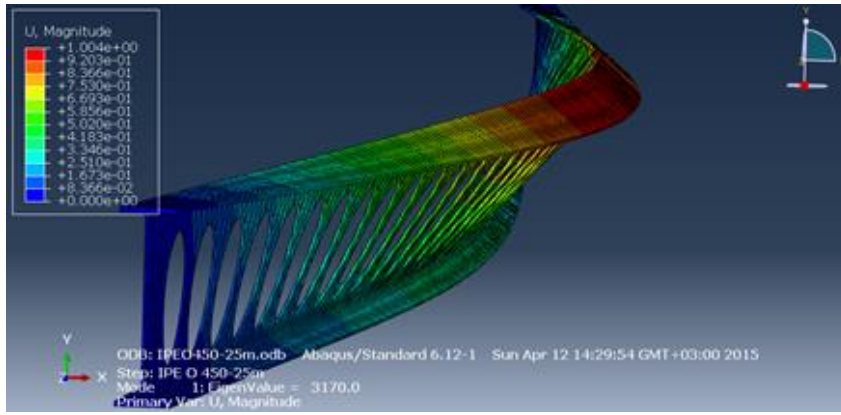
Şekil 2.10. IPEO400-75m



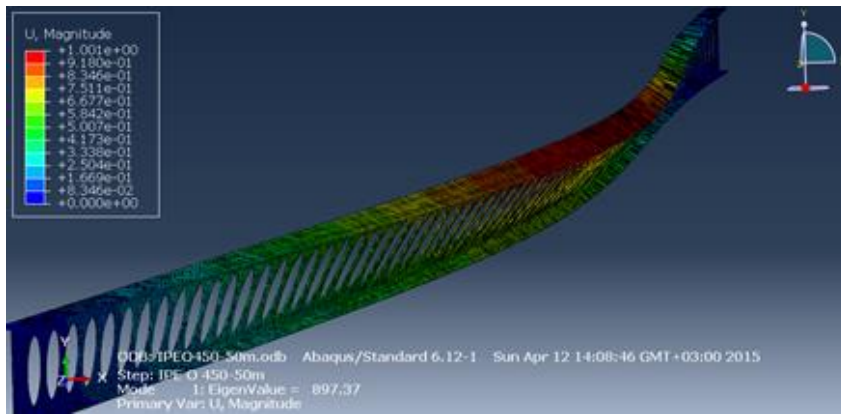
Şekil 2.11. IPEO400-100m



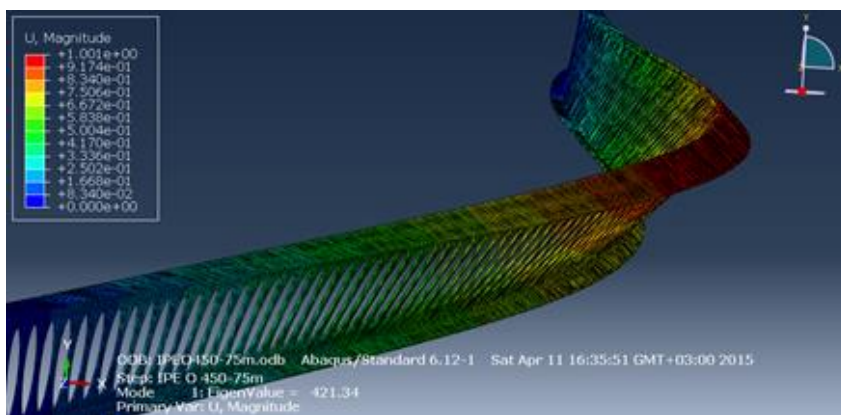
Şekil 2.12. IPEO450-10m



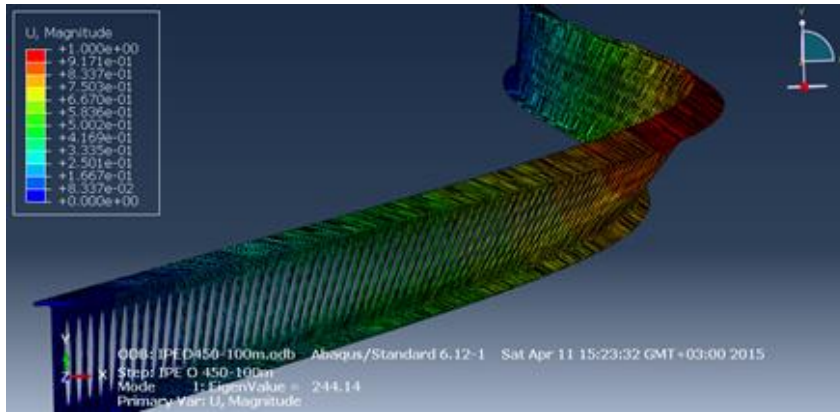
Şekil 2.13. IPEO450-25m



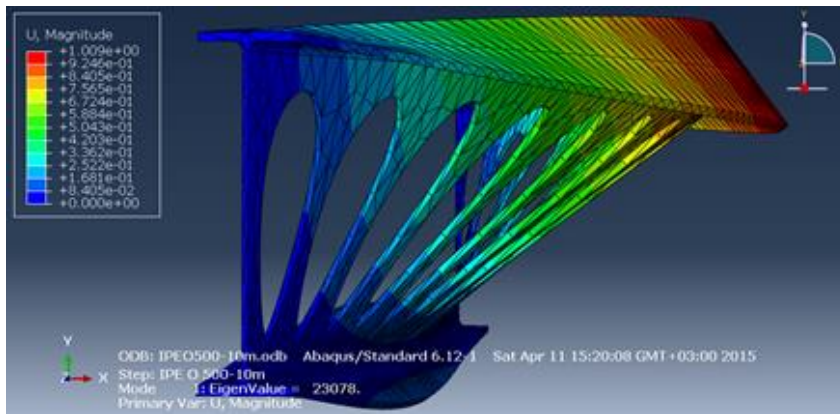
Şekil 2.14. IPEO450-50m



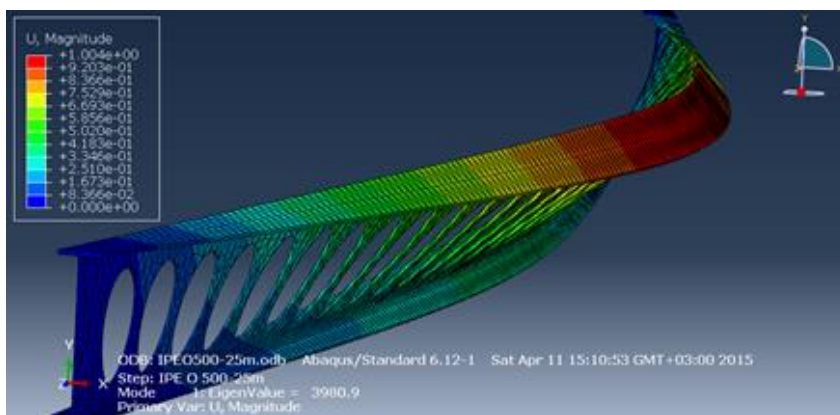
Şekil 2.15. IPEO450-75m



Şekil 2.16. IPEO450-100m

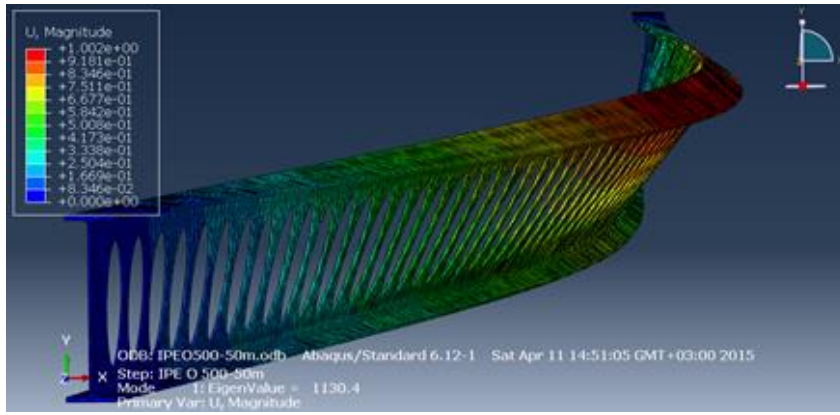


Şekil 2.17. IPEO500-10m

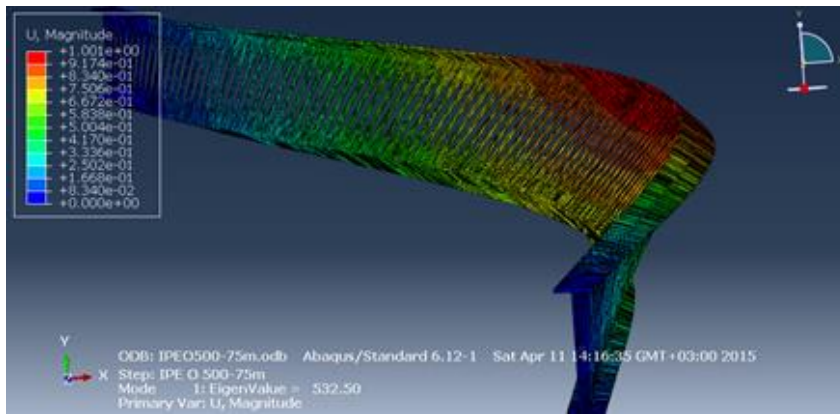


Şekil 2.18. IPEO500-25m

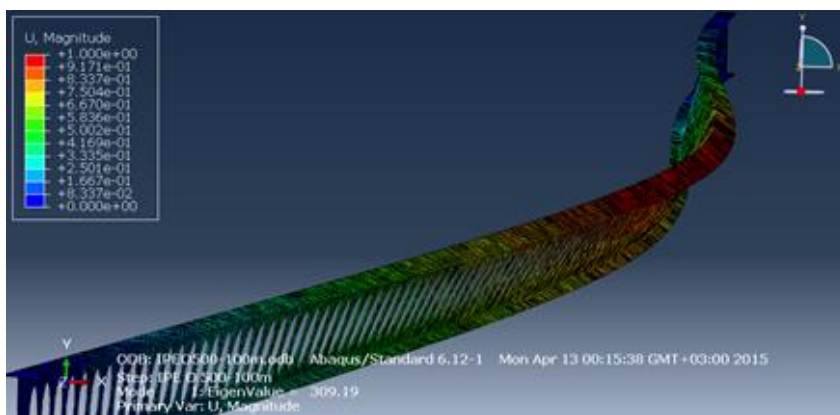




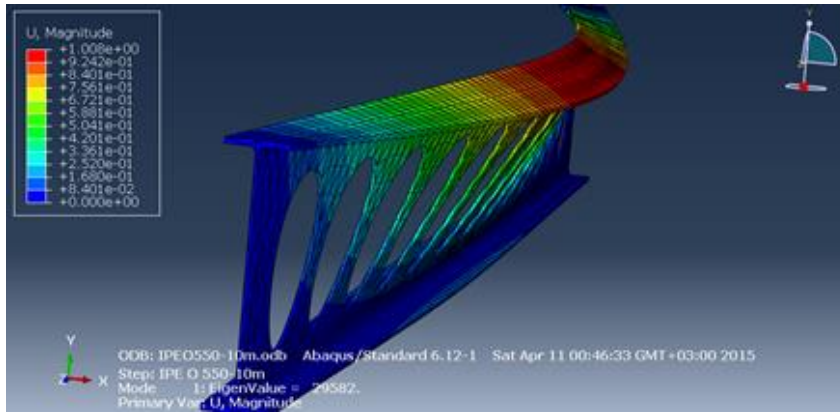
Şekil 2.19. IPEO500-50m



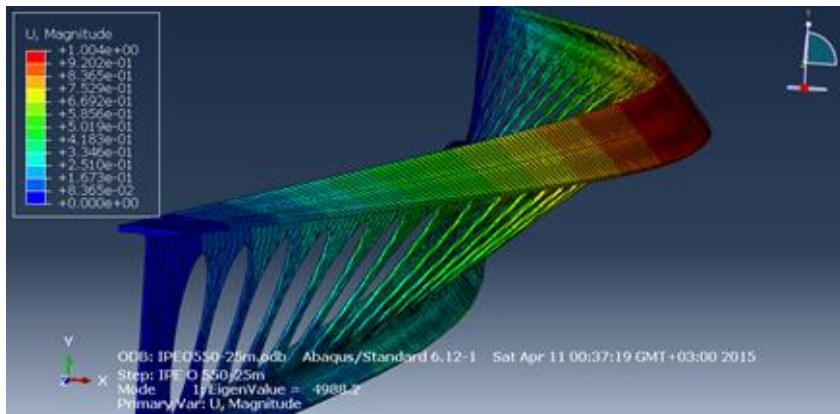
Şekil 2.20. IPEO500-75m



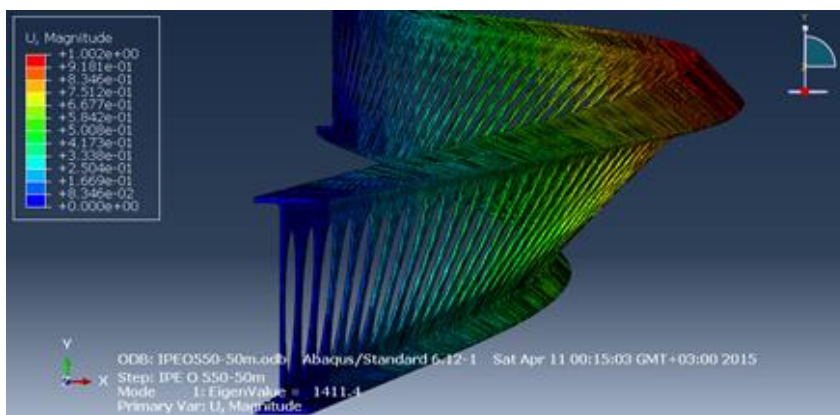
Şekil 2.21. IPEO500-100m



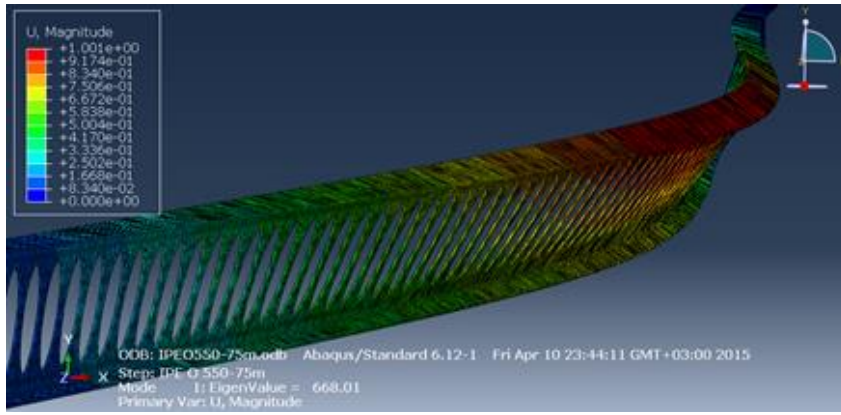
Şekil 2.22. IPEO550-10m



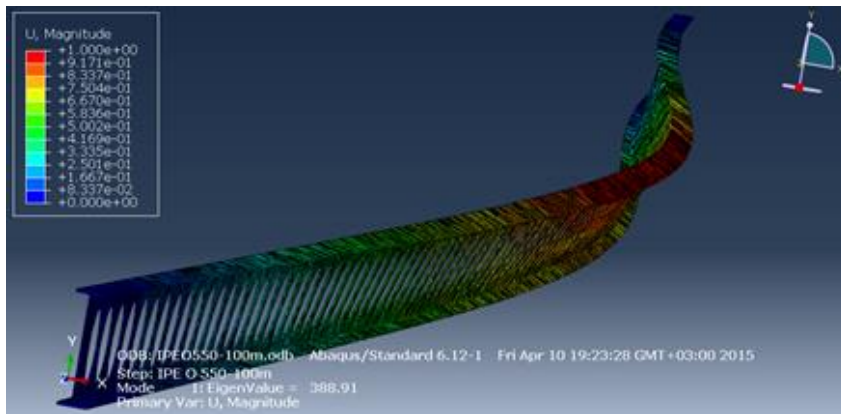
Şekil 2.23. IPEO550-25m



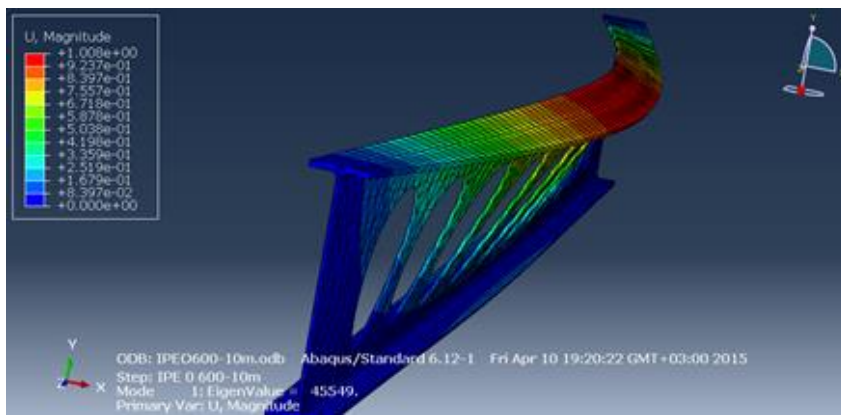
Şekil 2.24. IPEO550-50m



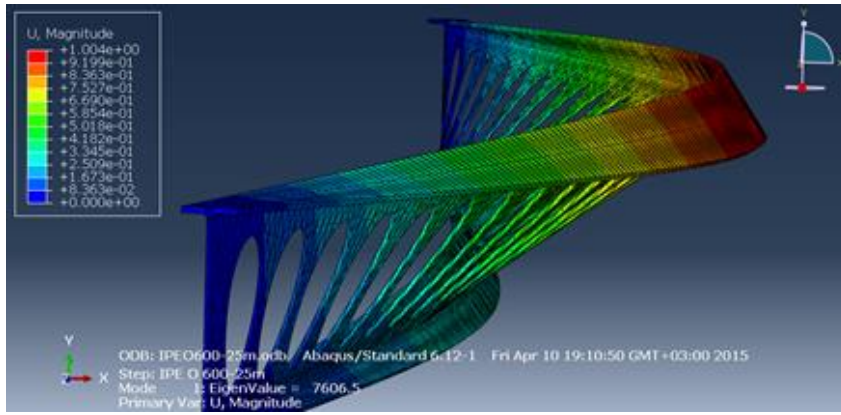
Şekil 2.25. IPEO550-75m



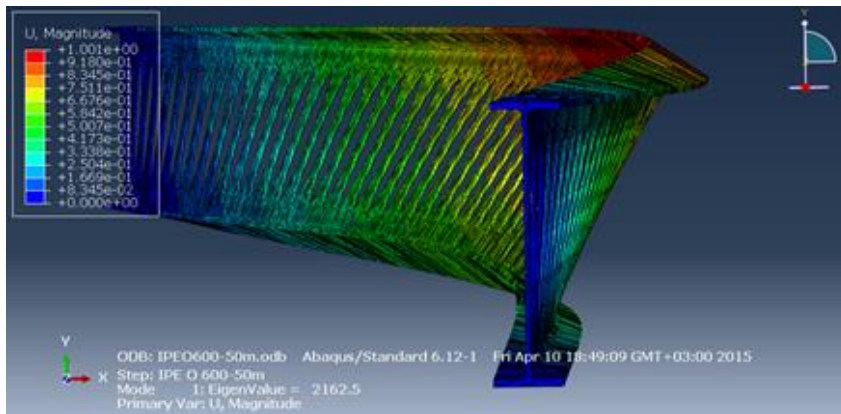
Şekil 2.26. IPEO550-100m



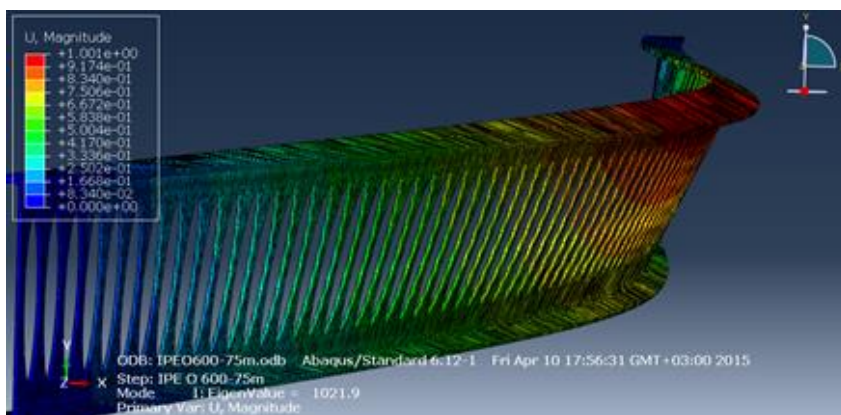
Şekil 2.27. IPEO600-10m



Şekil 2.28. IPEO600-25m

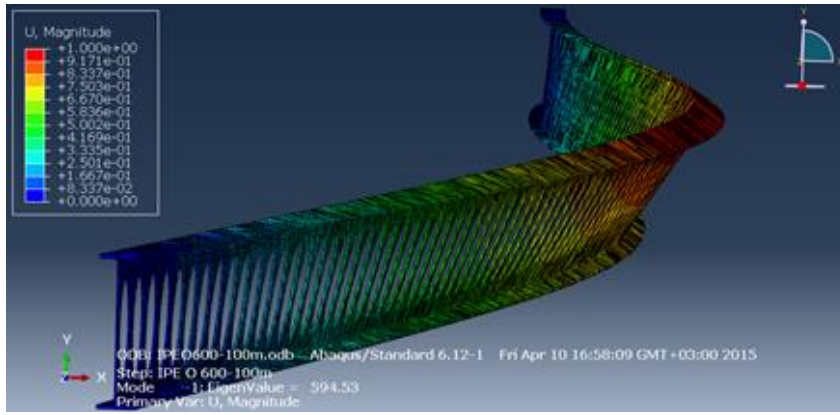


Şekil 2.29. IPEO600-50m

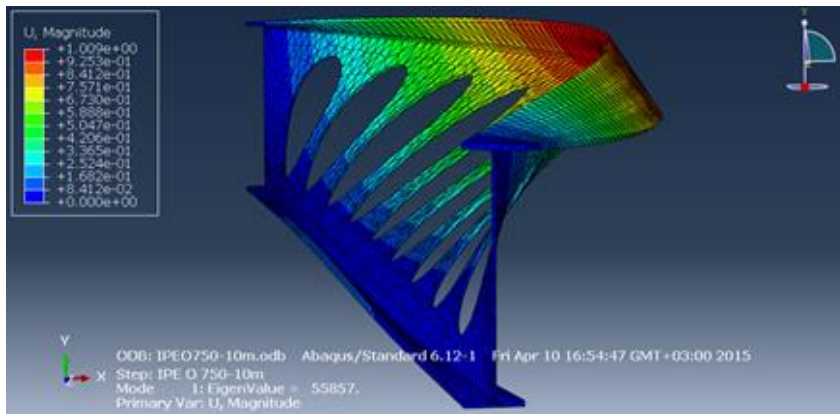


Şekil 2.30. IPEO600-75m

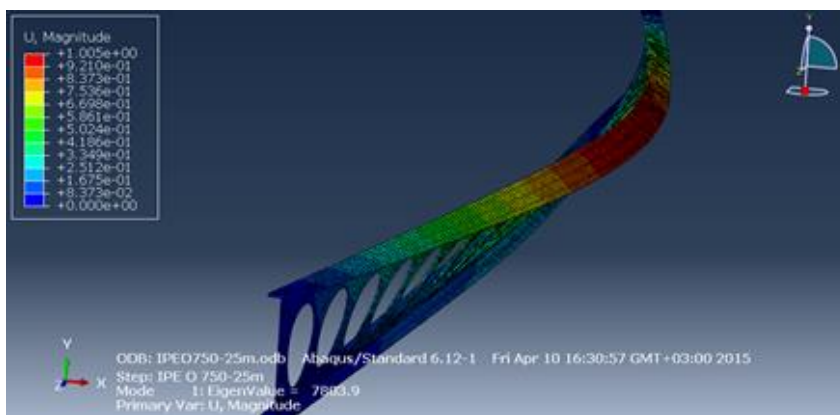




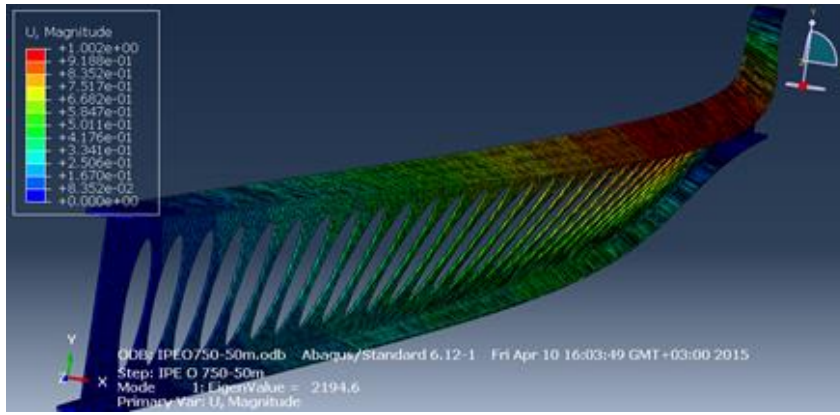
Şekil 2.31. IPEO600-100m



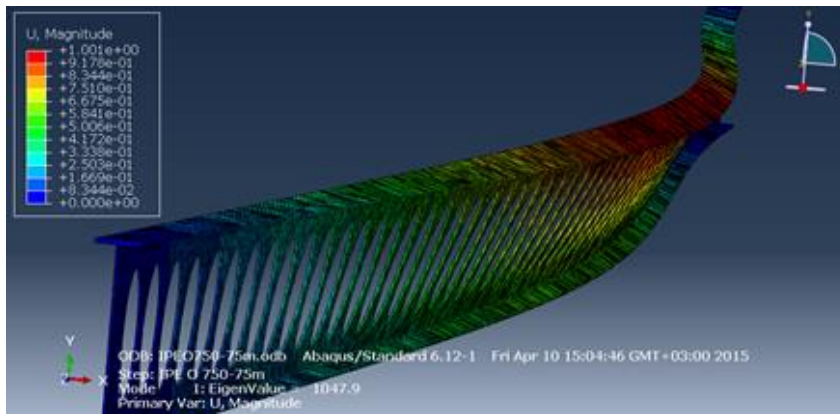
Şekil 2.32. IPEO750-10m



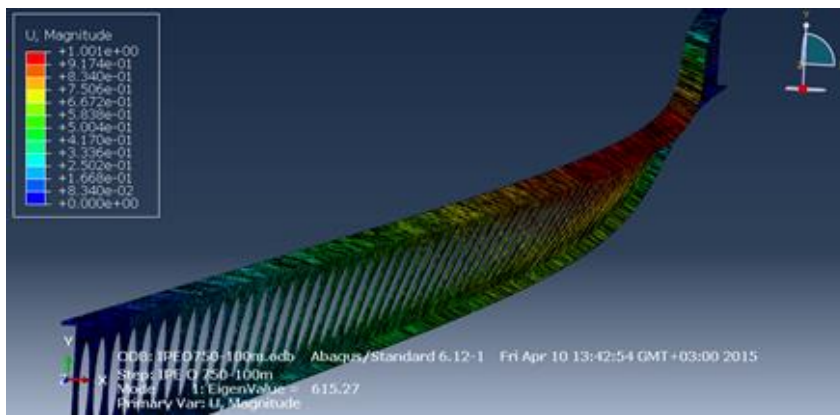
Şekil 2.33. IPEO750-25m



Şekil 2.34. IPEO750-50m



Şekil 2.35. IPEO750-75m



Şekil 2.36. IPEO750-100m

Şekillere dikkat edilecek olursa kirişlerin birçoğunda üst başlığın alt başlıktan daha fazla döndüğü görülmektedir. Yani burkulma esnasında gövdede buruşmalar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, kirişlerin birçoğunda yanal burulmalı burkulma değil, yanal buruşmalı burkulma gerçekleşmiştir.

### 2.1.2.2. $P_{cr}$ Değerlerinin Bulunması

Bulunan eigenvalue değerleri node sayısı ile çarpılarak kirişlerin  $P_{cr}$  değerleri hesaplanmıştır. Bulunan  $P_{cr}$  değeri her bir kirişin hangi yük altında burkulduğunu ifade etmektedir.

Aşağıdaki çizelgelerde (Çizelge 2.3-2.8) bulunan analiz sonuçları özetlenmiştir.

**Çizelge 2.3.** IPE O 400 Kirişinin Buckle Analiz Sonuçları

Uzunluk (m)	Eigenvalue	$P_{cr}$ (kN)
10	12823	64,115
15	5881,3	29,4065
20	3462,3	17,3115
25	2311,8	11,559
30	1668,4	8,342
35	1255,9	6,2795
40	984,32	4,9216
45	794,27	3,97135
50	651,06	3,2553
55	546,67	2,73335
60	465,11	2,32555
65	399,35	1,99675
70	348,13	1,74065
75	305,82	1,5291
80	270,67	1,35335
85	240,72	1,2036
90	216,41	1,08205
95	194,78	0,9739
100	176,87	0,88435

**Çizelge 2.4. IPE O 450 Kirişinin Buckle Analiz Sonuçları**

Uzunluk (m)	Eigenvalue	P <sub>cr</sub> (kN)
10	17860	89,3
15	8059,1	40,2955
20	4741,3	23,7065
25	3170	15,85
30	2288,5	11,4425
35	1720,3	8,6015
40	1350	6,75
45	1088,8	5,444
50	897,37	4,48685
55	752,99	3,76495
60	641,06	3,2053
65	550,27	2,75135
70	479,32	2,3966
75	421,34	2,1067
80	373,45	1,86725
85	332,33	1,66165
90	298,1	1,4905
95	269,25	1,34625
100	244,14	1,2207

**Çizelge 2.5. IPE O 500 Kirişinin Buckle Analiz Sonuçları**

Uzunluk (m)	Eigenvalue	P <sub>cr</sub> (kN)
10	23078	115,39
15	10189	50,945
20	5995,7	29,9785
25	3980,9	19,9045
30	2856,9	14,2845
35	2160,9	10,8045
40	1694,3	8,4715
45	1372,8	6,864
50	1130,4	5,652
55	946,93	4,73465
60	805,97	4,02985
65	693,86	3,4693
70	606,49	3,03245
75	532,5	2,6625
80	471,62	2,3581
85	420,07	2,10035
90	376,79	1,88395
95	341,05	1,70525
100	309,19	1,54595

**Çizelge 2.6.** IPE O 550 Kirişinin Buckle Analiz Sonuçları

Uzunluk (m)	Eigenvalue	P <sub>cr</sub> (kN)
10	29582	147,91
15	12988	64,94
20	7480,1	37,4005
25	4988,2	24,941
30	3571,3	17,8565
35	2711,1	13,5555
40	2120,4	10,602
45	1716,8	8,584
50	1411,4	7,057
55	1188,2	5,941
60	1013,9	5,0695
65	872,19	4,36095
70	761,41	3,80705
75	668,01	3,34005
80	592,92	2,9646
85	528,08	2,6404
90	474,82	2,3741
95	427,91	2,13955
100	388,91	1,94455

**Çizelge 2.7.** IPE O 600 Kirişinin Buckle Analiz Sonuçları

Uzunluk (m)	Eigenvalue	P <sub>cr</sub> (kN)
10	45549	227,745
15	19630	98,15
20	11435	57,175
25	7606,5	38,0325
30	5478,2	27,391
35	4150,2	20,751
40	3261,5	16,3075
45	2620,4	13,102
50	2162,5	10,8125
55	1818,8	9,094
60	1550,1	7,7505
65	1337	6,685
70	1161,2	5,806
75	1021,9	5,1095
80	905,48	4,5274
85	808,65	4,05025
90	726,48	3,6324
95	656,88	3,2844
100	594,53	2,97265

**Çizelge 2.8.** IPE O 750 Kirişinin Buckle Analiz Sonuçları

Uzunluk (m)	Eigenvalue	$P_{cr}$ (kN)
10	55857	390,999
15	22012	154,084
20	12168	85,176
25	7803,9	54,6273
30	5573,7	39,0159
35	4175,2	29,2264
40	3290,2	23,0314
45	2644,6	18,5122
50	2194,6	15,3622
55	1841,6	12,8912
60	1578	11,046
65	1360,7	9,5249
70	1184,5	8,2915
75	1047,9	7,3353
80	927,93	6,49551
85	832,71	5,82897
90	747,06	5,22942
95	678,01	4,74607
100	615,27	4,30689

Profillerin yüksekliği arttıkça atalet momentlerinde arttığı bilinmektedir. Ayrıca kullanılan profillerin sırasıyla IPEO400 den IPEO750ye kadar aynı uzunlukta olan kiriş modellerinin  $P_{cr}$  yüklerinin arttığı görülmüştür.

## 2.2. Analitik Çalışma

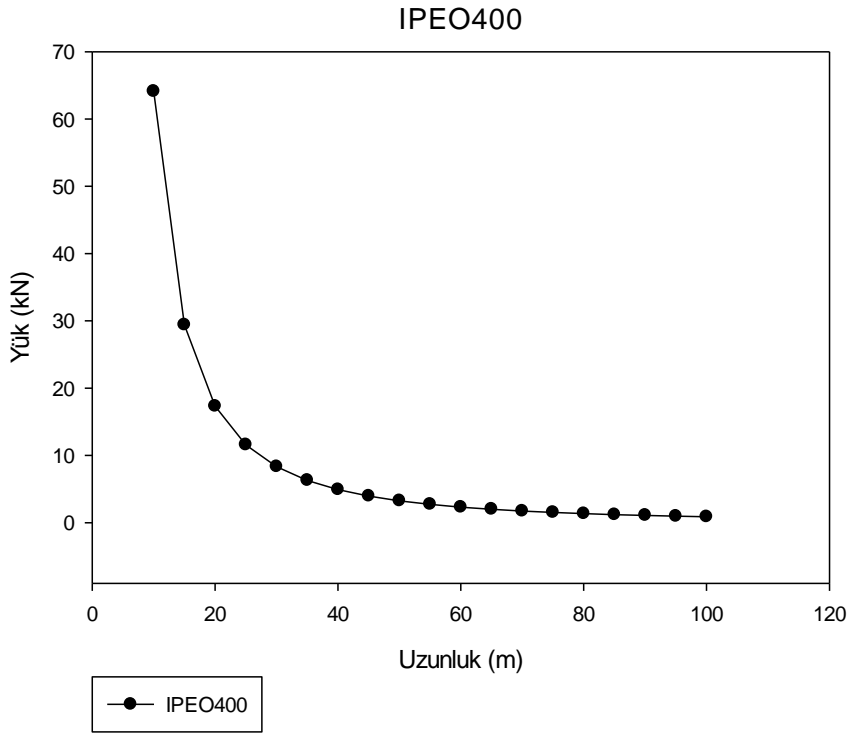
Yapılan nümerik çalışma sonucu elde edilen değerlerin kıyaslamasını yapabilmek amacıyla bazı şartnamelerdeki yanal burulmalı burkulma formülleri ve bugüne kadar çelik kirişlerin LTB ve LDB durumları ile ilgili yapılan bazı akademik çalışmalar sonucu elde edilen yanal burulmalı burkulma ve yanal buruşmalı burkulma formülleri analitik çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada söz konusu formüller Mathcad 14 [29] programına girilmiş ve  $P_{cr}$  değerleri hesaplanmıştır.

### **2.2.1. Analitik Çalışmada Kullanılan Şartnameler ve Diğer Formüller**

Abaqus ile yapılan çalışma sonucu elde edilen sonuçların kıyaslanması için Amerikan Çelik Şartnamesi (AISC-LRFD 2005), Avrupa Çelik Şartnamesi (EuroCode 3) ve Avusturalya Çelik Şartnamesi (AS 4100) ile Pi-Trahair'in Buruşmalı Burkulma Formülleri ve Elastik Burulmalı Burkulma Formülleri kullanılmıştır. Bu formüllere ait detaylar **3. Araştırma ve Bulgular** kısmında anlatılmıştır.

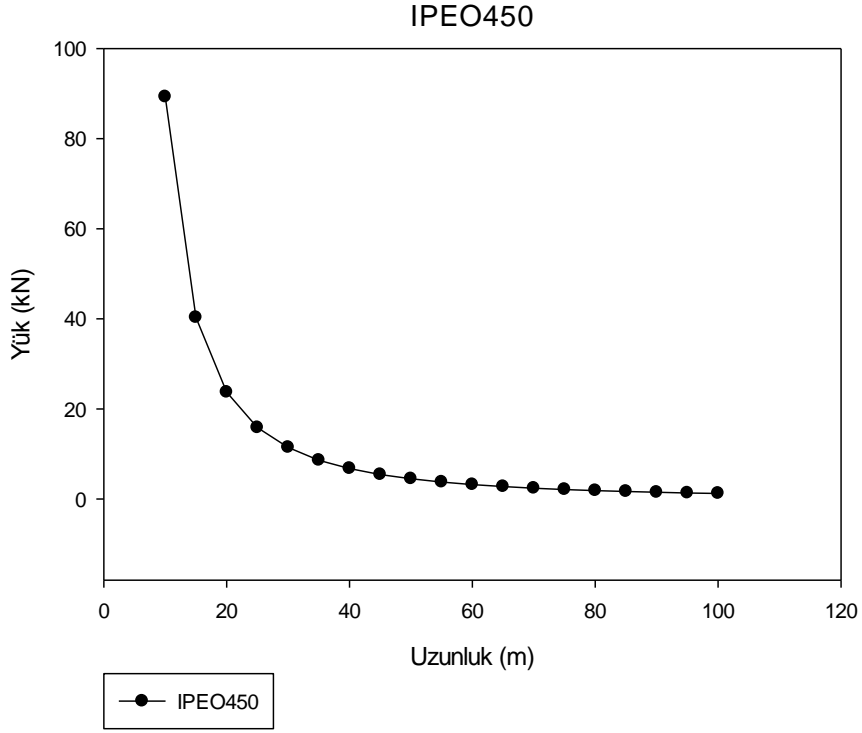
### 3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Abaqus ile yapılan yukarıda anlatılan analiz sonucu her kiriş için yanal buruşmalı burkulma yükleri bulunmuştur. Her bir kesitin uzunlukla değişen taşıma kapasiteleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir. (Şekil 2.36.-2-41)

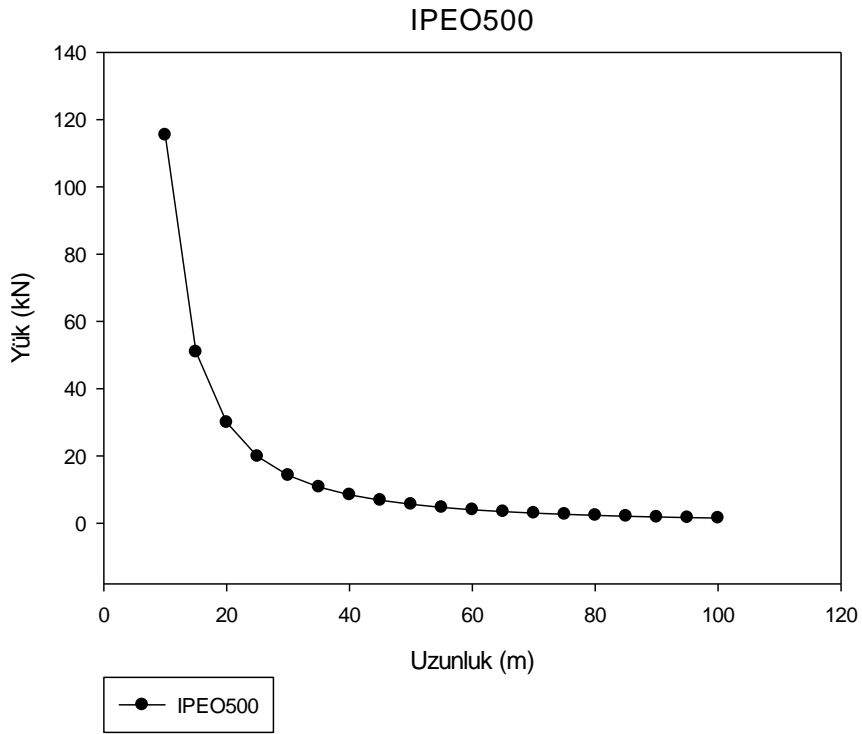


Şekil 3.1. IPE O 400  $P_{cr}/l$  Grafiği

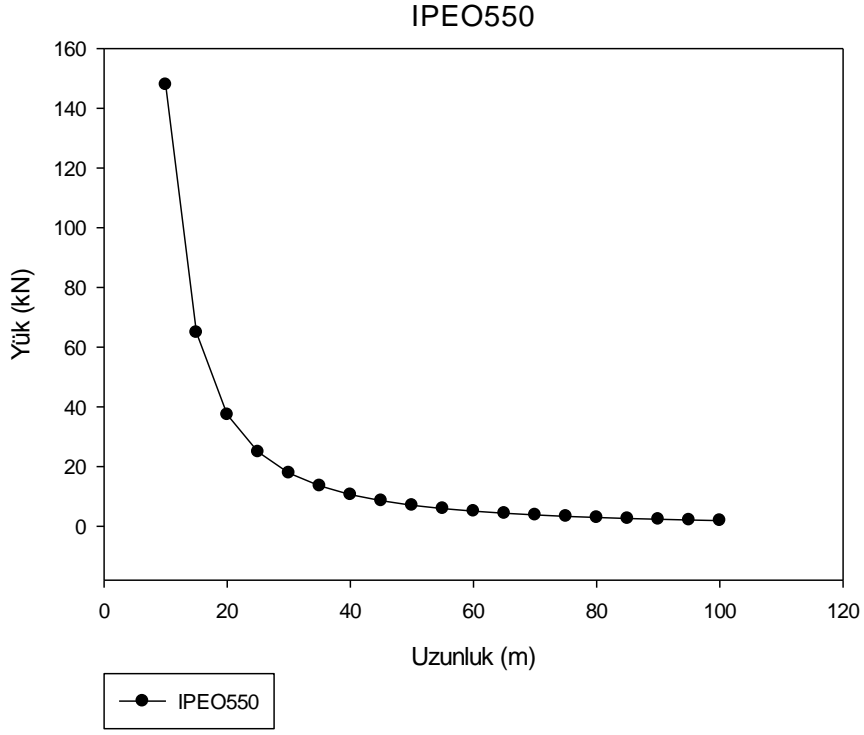




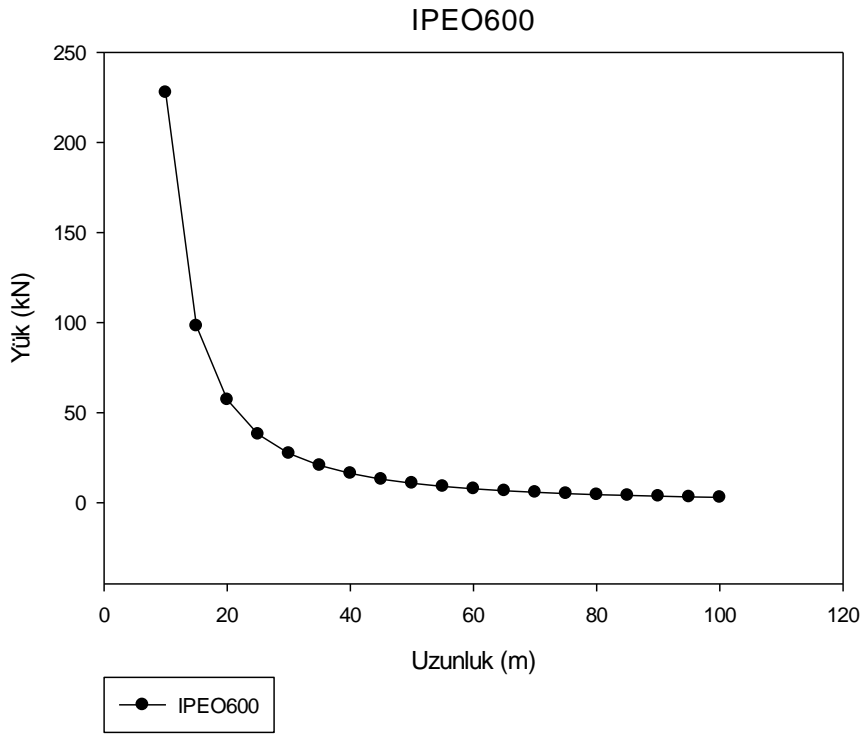
**Şekil 3.2.** IPE O 450  $P_{cr}/l$  Grafiği



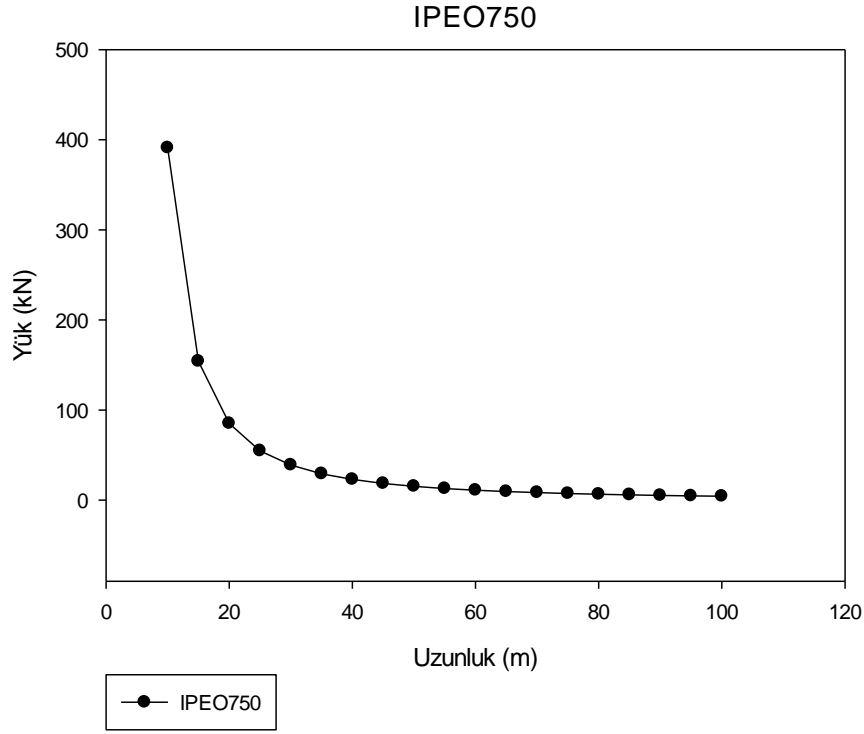
**Şekil 3.3.** IPE O 500  $P_{cr}/l$  Grafiği



**Şekil 3.4.** IPE O 550  $P_{cr}/l$  Grafiği



**Şekil 3.5.** IPE O 600  $P_{cr}/l$  Grafiği



**Şekil 3.6.** IPE O 750  $P_{cr}/I$  Grafiği

### 3.1. Bulunan $P_{cr}$ Değerlerinin Kıyaslanması

Abaqus programında boyutlandırdığımız kirişler yine aynı ölçülerde ve aynı malzeme özelliklerinde olacak şekilde Mathcad programında matematiksel olarak boyutlandırılmış ve çeşitli şartnamelerde yer alan formüller ve akademik çalışmalarla bulunan ampirik denklemler ile Mathcad [29] programında matematiksel olarak çözülmüştür.

Yapılan bu analitik çalışmada AISC-LFRD 2005, EuroCode 3, AS 4100 şartnamelerindeki yanal burulmalı burkulma formülleri kullanılmıştır.

AISC-LRFD 2005'e göre yanal burulmalı burkulma

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y \times C_w}}{S_x}} \quad (3.1)$$

$$L_r = 1,95 \times r_{ts} \times \frac{E}{0,7 \times f_y} \times \sqrt{\frac{J \times c}{S_x \times h_0}} \times \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6,76 \times \left( \frac{0,7 \times f_y}{E} \times \frac{S_x \times h_0}{J \times c} \right)^2}} \quad (3.2)$$

$$M_{\max} = 1/4 \quad M_A = 1/16 \quad M_B = 1/8 \quad M_C = 3/16$$

$$R_m = 1,0$$

$$C_b = \frac{12,5 \times M_{\max}}{2,5 \times M_{\max} + 3 \times M_A + 4 \times M_B + 3 \times M_C} \times R_m \quad (3.3)$$

AISC-LRFD şartnamesi yanal burulmalı burkulma durumunu üç'e ayırmıştır

Eğer  $L_b < L_p$  ise yanal burulmalı burkulma yok

$$M_n = M_p \leq 1,5 \times M_y \quad (3.4)$$

Eğer  $L_p < L_b < L_r$  ise inelastik yanal burulmalı burkulma

$$M_n = C_b \times \left[ M_p - (M_p - M_r) \times \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (3.5)$$

Eğer  $L_b < L_r$  ise elastik yanal burulmalı burkulma

$$M_n = M_{cr} \leq M_p$$

$$M_{cr} = C_b \times \frac{\pi}{L_b} \times \sqrt{EI_y \times GJ + \left(\frac{\pi \times E}{L_b}\right)^2 \times I_y C_w} \leq M_p \quad (3.6)$$

EuroCode 3'e göre yanal burulmalı burkulma

$$\lambda_{LTE} = \sqrt{\frac{W_y \times f_y}{M_{cr}}} \quad (3.7)$$

$$\chi_{LT} = \min\left(\frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LTE}^2}}, 1\right) \quad (3.8)$$

$$f = 1 - 0,5 \times (1 - k_c) \times [1 - 2,0 \times (\lambda_{LTE} - 0,8)^2] \quad (3.9)$$

$$\chi_{LTmod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad (3.10)$$

$$M_{EC} = \chi_{LTmod} \times W_y \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.11)$$

AS 4100'e göre yanal burulmalı burkulma

$$Z_e = \min(Z_x, 1,5 \times S_x) \quad (3.12)$$

$$M_S = f_y \times Z_e \quad (3.13)$$

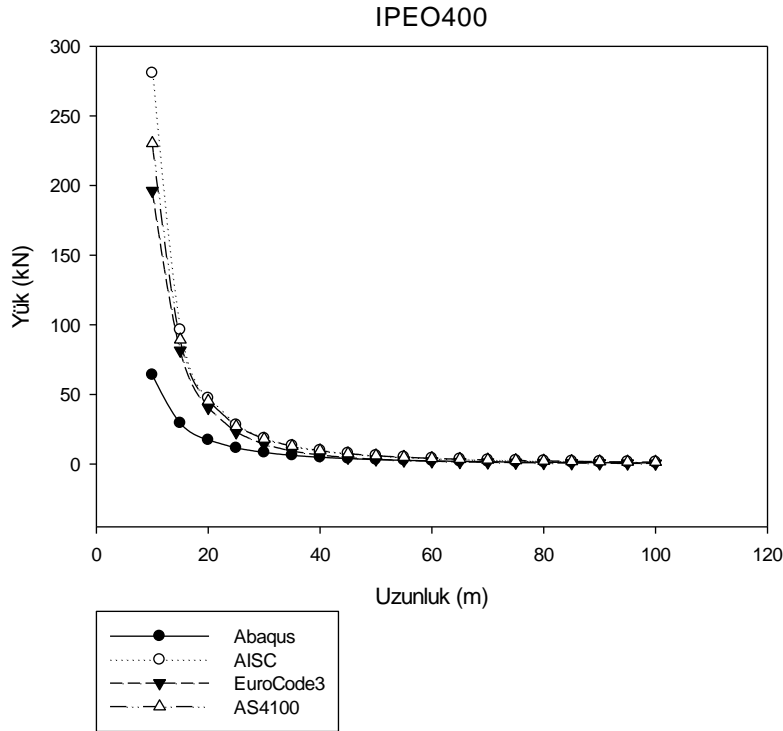
$$\alpha_m = \frac{1,7 \times M_{max}}{\sqrt{M_A^2 + M_B^2 + M_C^2}} \quad (3.14)$$

$$M_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \times E \times I_y}{L_e^2} \times \left[ G \times J + \left( \frac{\pi^2 \times E \times C_w}{L_e^2} \right) \right]} \quad (3.15)$$

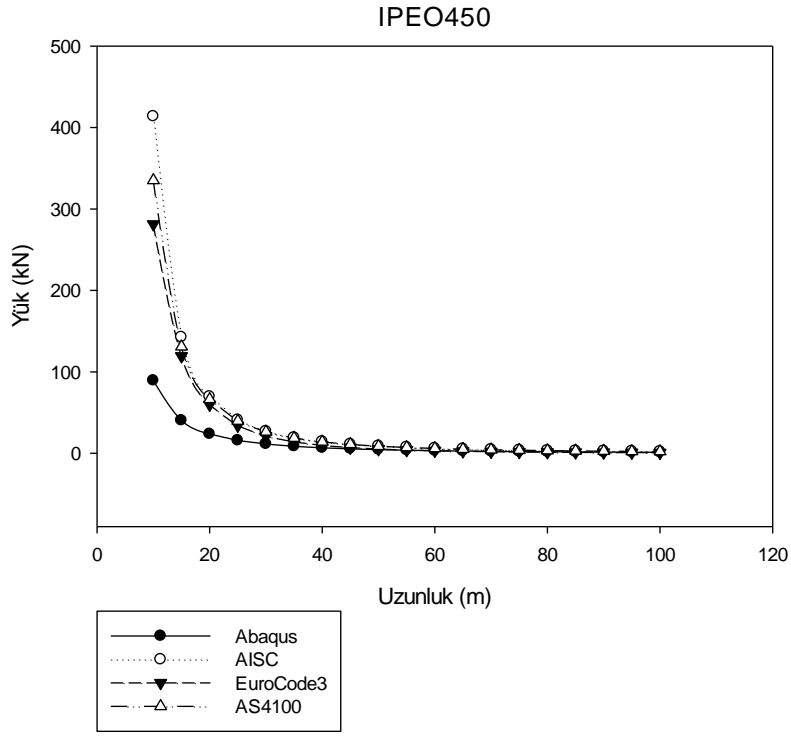
$$\alpha_s = 0,6 \times \left[ \sqrt{\left( \frac{M_s}{M_0} \right)^2 + 3} - \left( \frac{M_s}{M_0} \right) \right] \quad (3.16)$$

$$M_{AS} = \min(\alpha_m \times \alpha_s \times M_s, M_p) \quad (3.17)$$

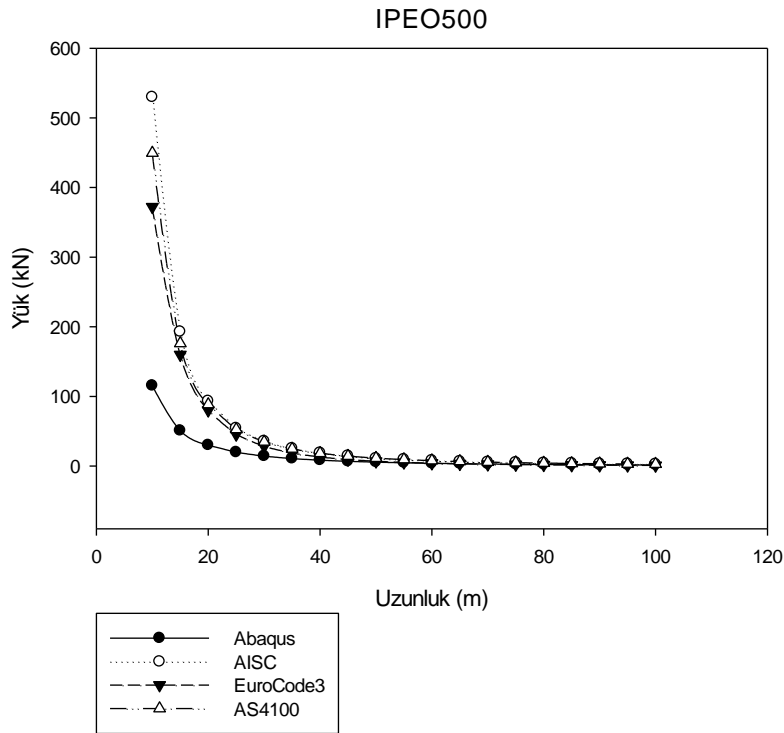
Yukarıda bazı şartnamelere ait yanal burulmalı burkulma momenti formülleri açıklanmıştır. Bu formüller ile elde edilen yanal burulmalı burkulma yükleri Abaqus programıyla elde edilen  $P_{cr}$  değerleri ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalara ait grafikler aşağıda verilmiştir. (Şekil 3.7-3.12)



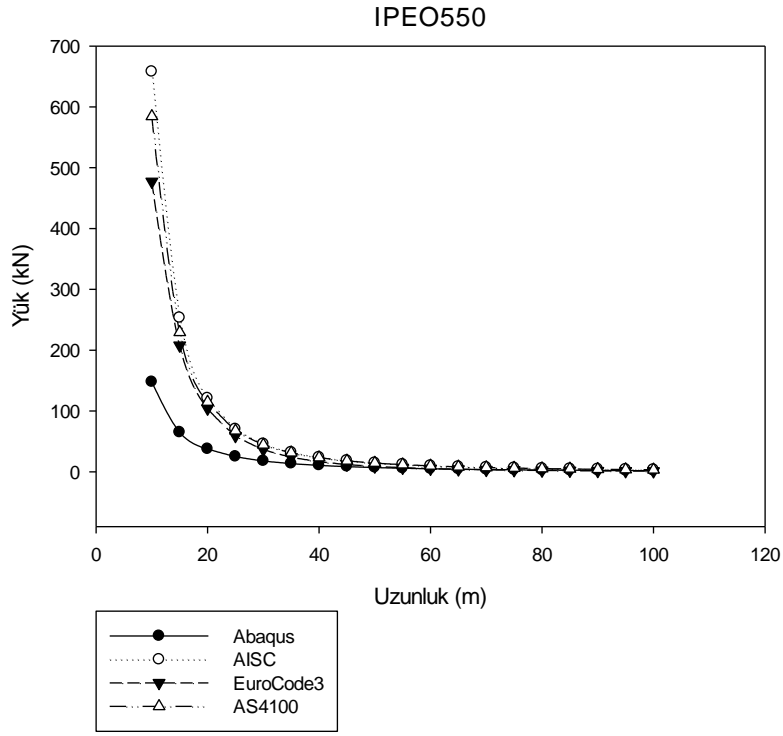
Şekil 3.7. IPE O 400 Kirişi Abaqus ve Şartnameler



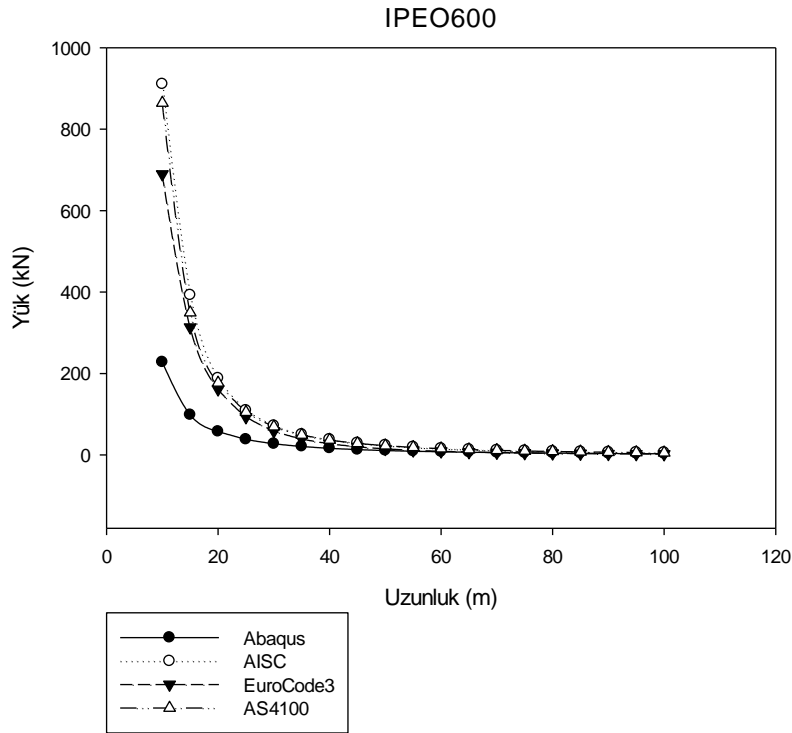
**Şekil 3.8.** IPE O 450 Kirişi Abaqus ve Şartnameler



**Şekil 3.9.** IPE O 500 Kirişi Abaqus ve Şartnameler

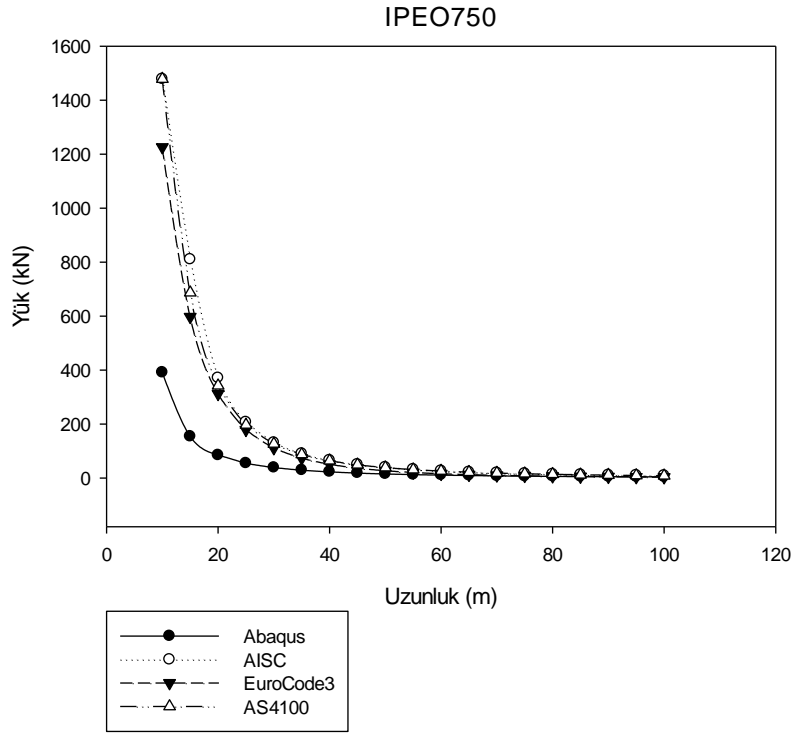


**Şekil 3.10.** IPE O 550 Kirişi Abaqus ve Şartnameler



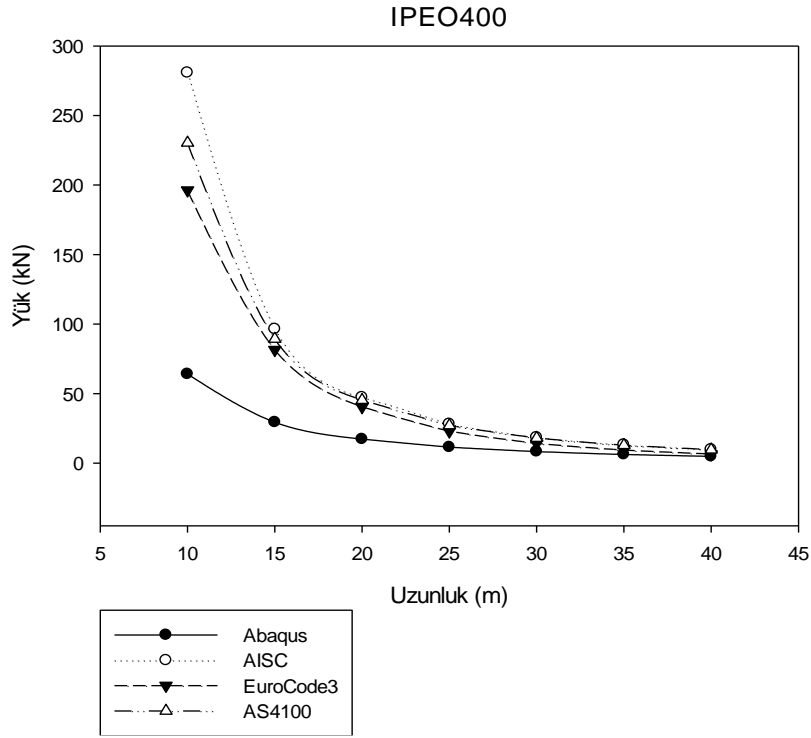
**Şekil 3.11.** IPE O 600 Kirişi Abaqus ve Şartnameler



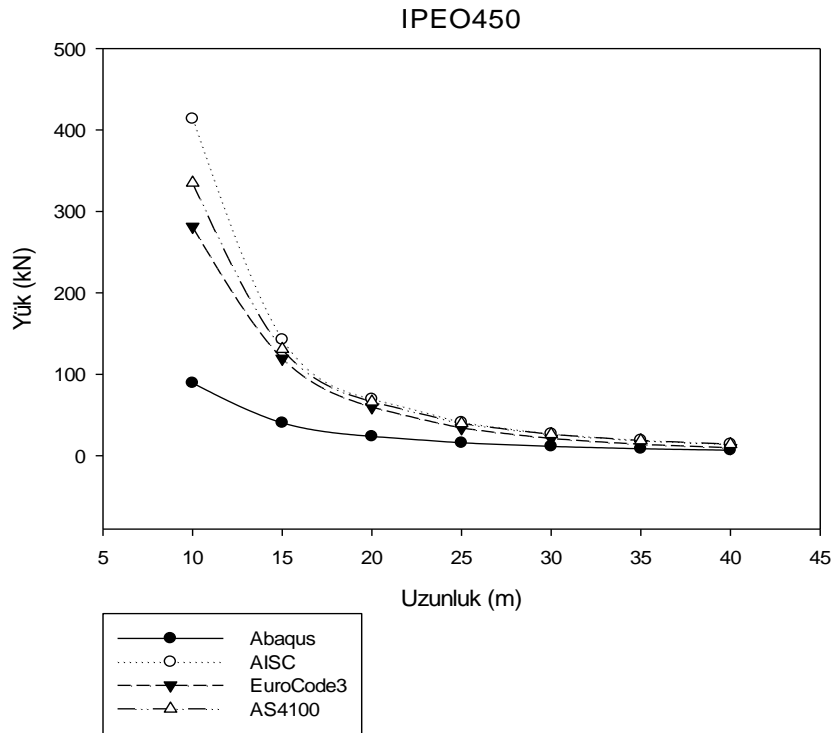


**Şekil 3.12.** IPE O 750 Kirişi Abaqus ve Şartnameler

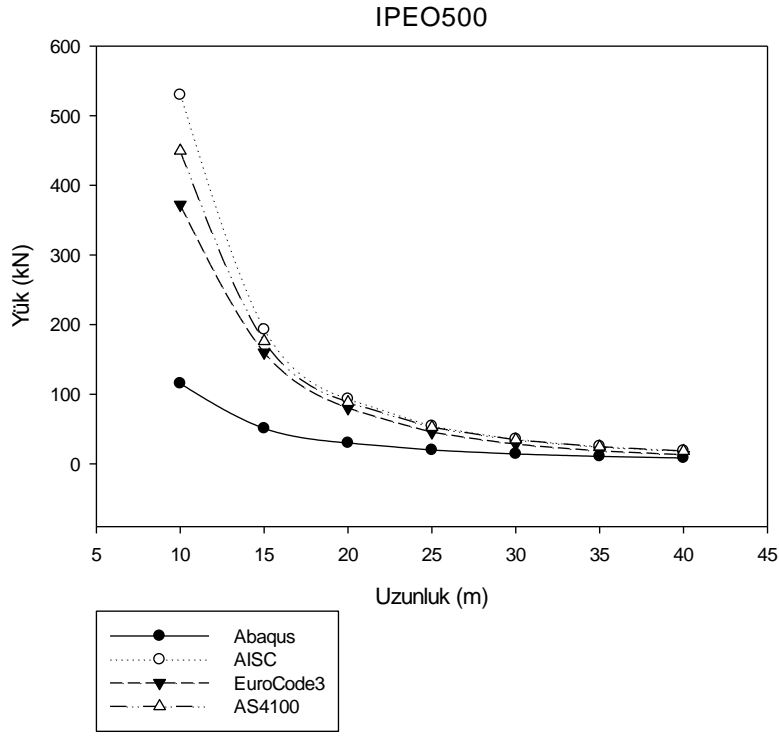
Yukarıda verilen kıyaslama grafiklerinin arasındaki farkların daha net görülebilmesi için 10m-40m ve 40m-100m arası uzunluklarındaki grafikler ayrıca aşağıda verilmiştir. (Şekil 3.13-3.24)



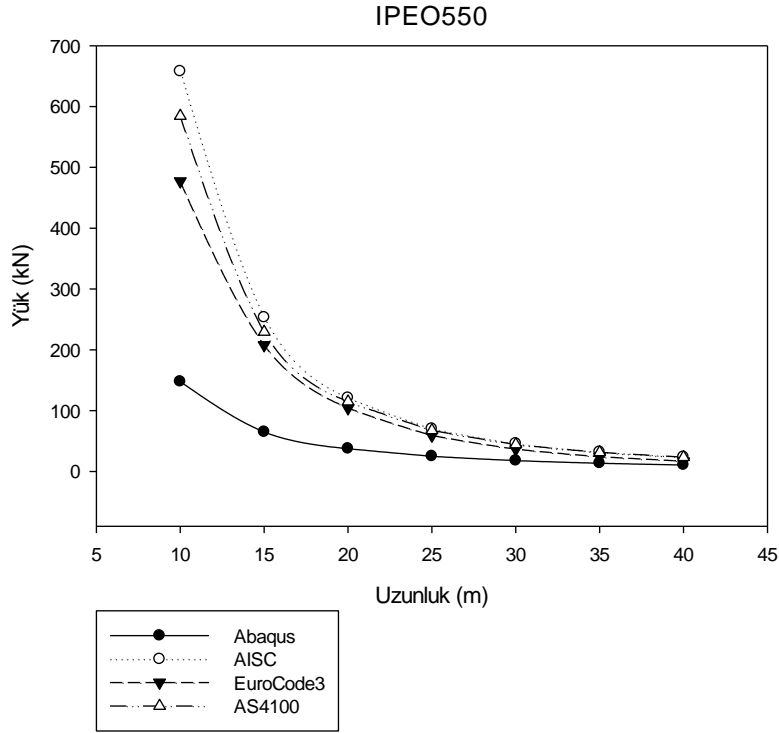
**Şekil 3.13.** IPE O 400 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m)



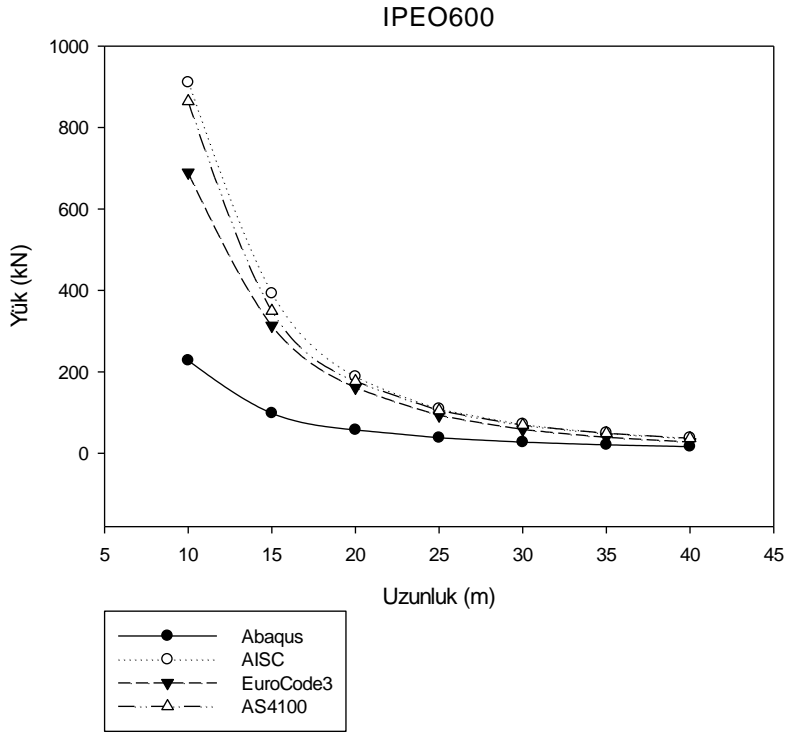
**Şekil 3.14.** IPE O 450 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m)



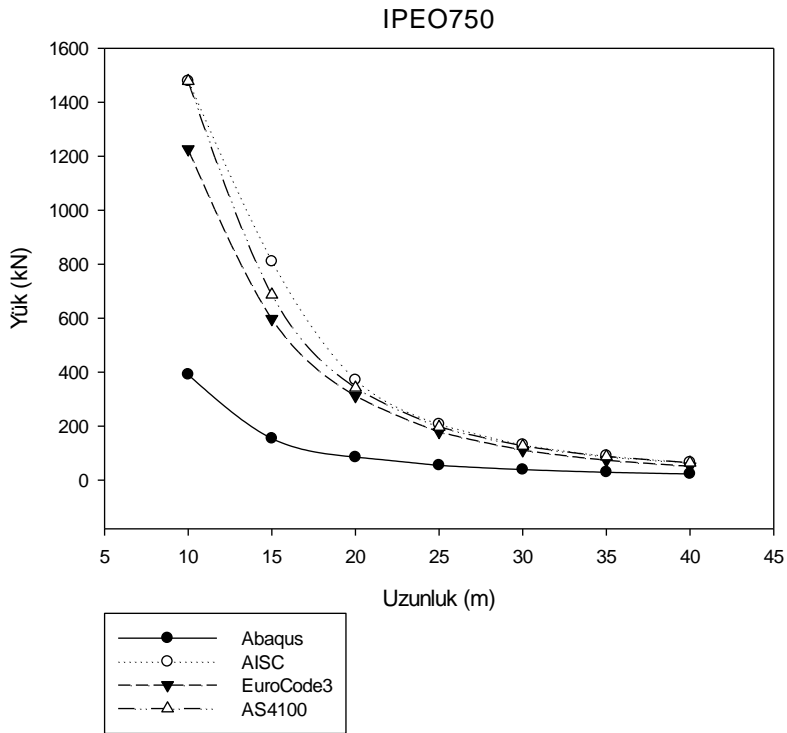
**Şekil 3.15.** IPE O 500 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m)



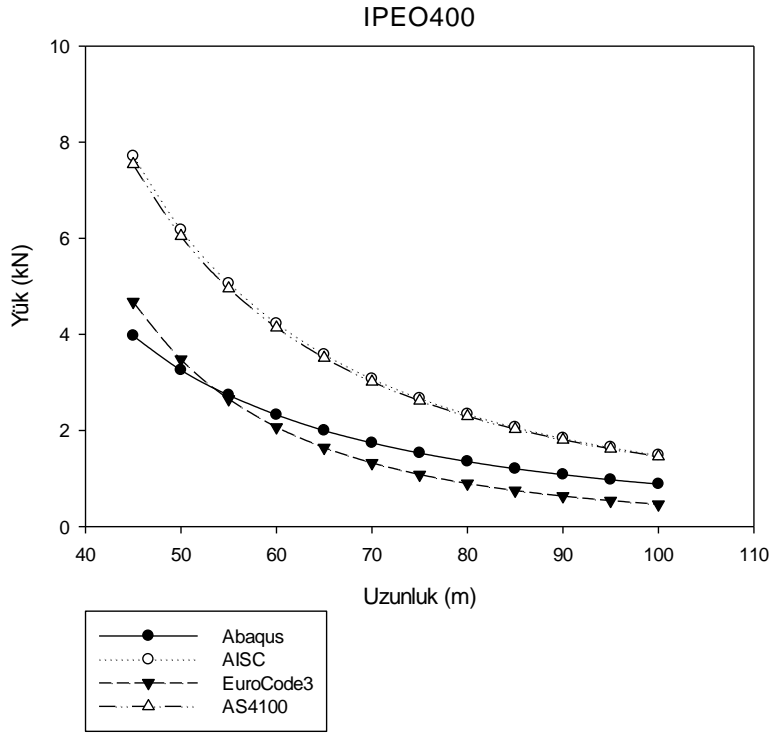
**Şekil 3.16.** IPE O 550 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m)



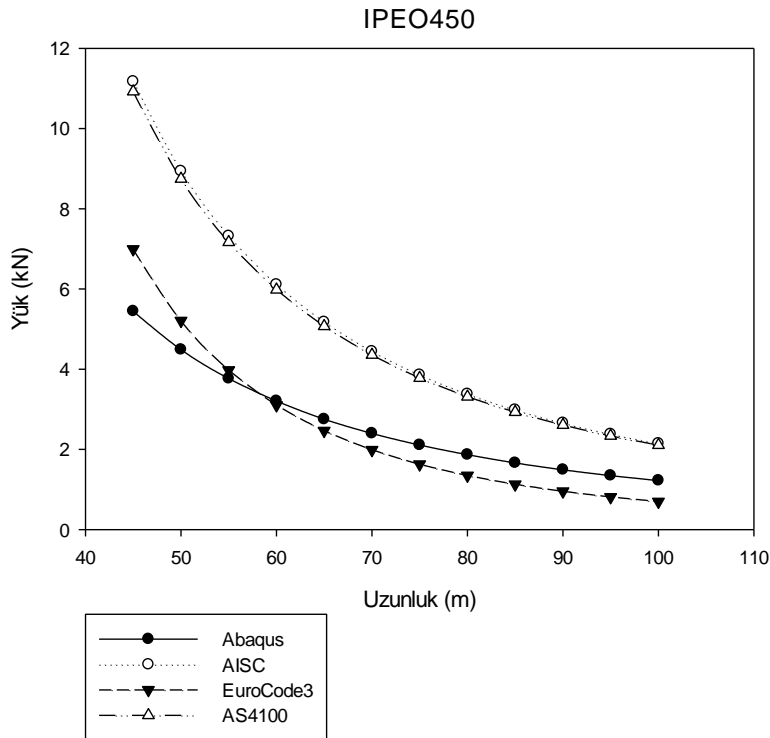
**Şekil 3.17.** IPE O 600 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m)



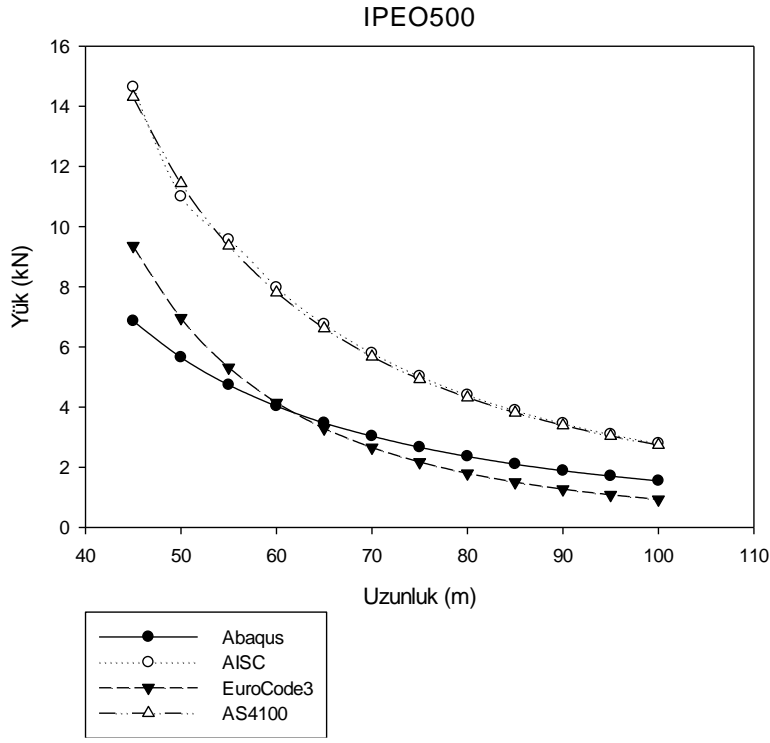
**Şekil 3.18.** IPE O 750 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (10m-40m)



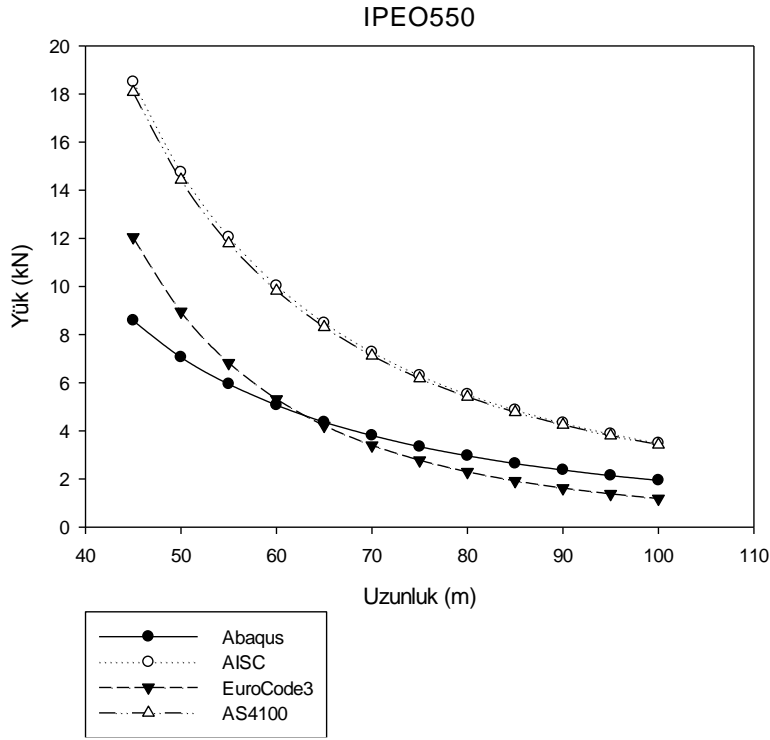
**Şekil 3.19.** IPE O 400 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m)



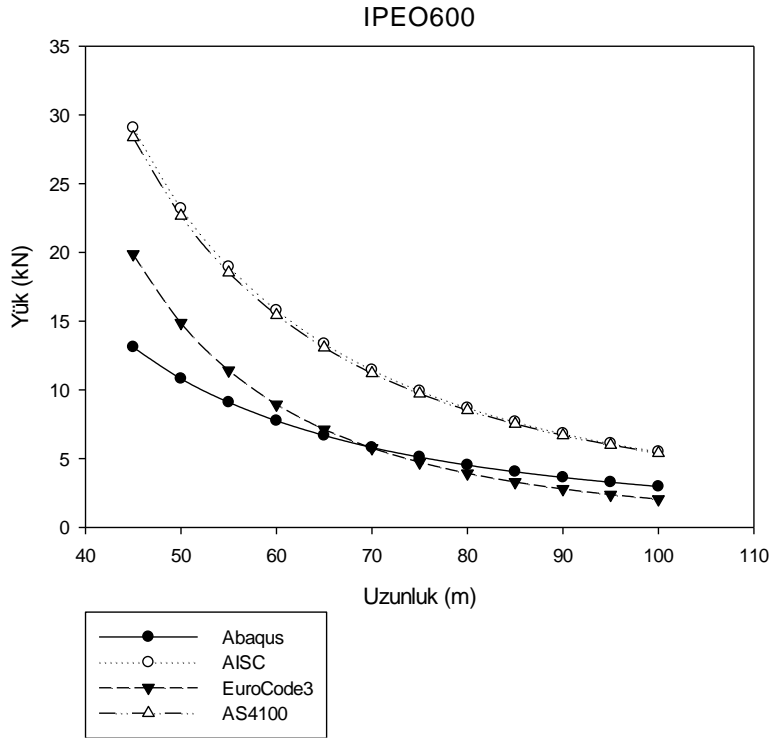
**Şekil 3.20.** IPE O 450 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m)



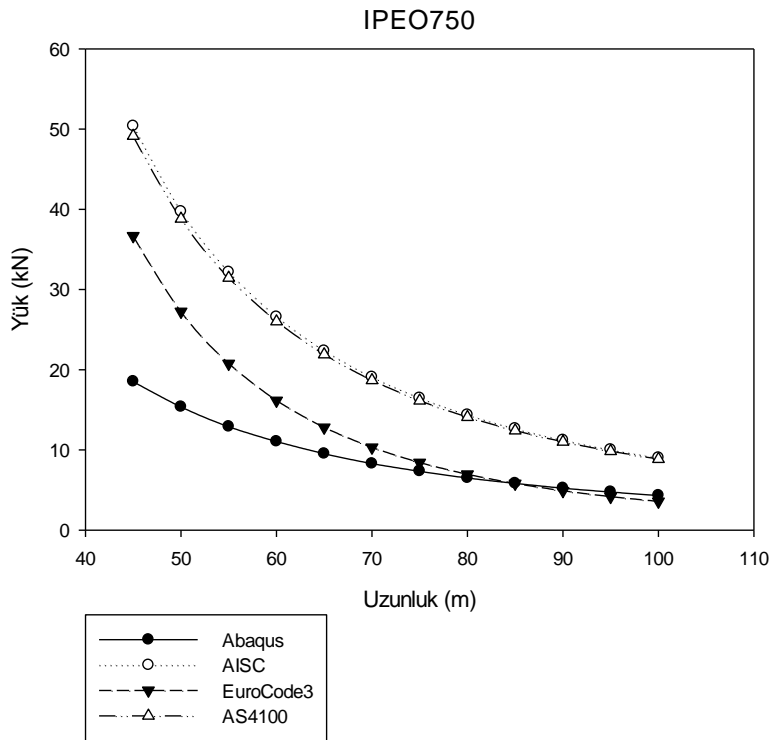
**Şekil 3.21.** IPE O 500 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m)



**Şekil 3.22.** IPE O 550 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m)



**Şekil 3.23.** IPE O 600 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m)



**Şekil 3.24.** IPE O 750 Kirişi Abaqus ve Şartnameler (45m-100m)

Grafiklerden görüldüğü üzere sonlu elemanlar programı ile yapılan analiz neticesinde bulunan  $P_{cr}$  yükleri aynı kesitler için şartnamelere göre hesaplanan değerlerin altında kalmıştır. Analiz edilen kirişler için kesit gövdesinin narinliğinden dolayı oluşan gövde buruşmaları kirişlerde yanal buruşmalı burkulmaya neden olmuştur. Şartnamelerin formüllerinde bu durum hesaba katılmamıştır. Bu sebeple analiz sonuçları şartname çözümlerine göre güvenli tarafta kalmıştır. Yapılan bu kıyaslama neticesinde en yakın değerlerin Eurocode 3 çelik şartnamesinin yanal burulmalı burkulma formülünden elde edildiği görülmüştür.

Şartname değerleri yanında bazı akademik çalışmaların sonucunda elde edilen formüllerle de her bir kiriş için  $P_{cr}$  değerleri hesaplanmıştır.

#### Elastic Lateral Torsional Buckling Solution

$$W = \frac{\pi}{L_{br}} \times \sqrt{\frac{E \times C_w}{G \times J}} \quad (3.18)$$

$$M_{ocr} = \frac{\pi}{L_{br}} \times \sqrt{E \times I_y \times G \times J} \times \sqrt{1 + W^2} \quad (3.19)$$

$$A_m = 2,95 - 1,143 \times W^2 + 4,070 \times W \quad (3.20)$$

$$B_m = 1,0$$

$$C_m = \frac{A_m}{B_m} \quad (3.21)$$

$$M_{cr} = C_m \times M_{ocr} \quad (3.22)$$

$$P_{cr} = 4 \times \frac{M_{cr}}{L} \quad (3.23)$$



Pi ve Trahair'in Distorsional Buckling Çözümü (1999)

$$D_W = \frac{E \times t_W^3}{12 \times (1 - \nu^2)} \quad (3.24)$$

$$GJ_f = G \left( \frac{1}{3} \times b_f \times t_f^3 \right) \quad (3.25)$$

$$GJ_e = \frac{2 \times GJ_f \times \left( \frac{12 \times D_W \times L_{br}^2}{\pi^2 \times d} \right)}{2 \times GJ_f + \frac{12 \times D_W \times L_{br}^2}{\pi^2 \times d}} \quad (3.26)$$

$$\frac{GJ_e}{G \times J} = 0,86 \quad (3.27)$$

$$W_e = \frac{\pi}{L_{br}} \times \sqrt{\frac{E \times C_W}{GJ_e}} \quad (3.28)$$

$$A_{me} = 2,95 - 1,143 \times W_e^2 + 4,070 \times W_e \quad (3.29)$$

$$B_{me} = 1,0$$

$$C_{me} = \frac{A_{me}}{B_{me}} \quad (3.30)$$

$$M_{PT} = \frac{C_{me} \times \pi}{L_{br}} \times \sqrt{E \times I_y \times GJ_e} \times \sqrt{1 + W_e^2} \quad (3.31)$$

$$P_{PT} = \frac{4 \times M_{PT}}{L} \quad (3.32)$$

Pi ve Trahair'in Distorsional Buckling Çözümü (2000)

$$r_{fw} = \min\left(\frac{t_f}{t_w}, 2\right) \quad (3.33)$$

$$EC_{we} = \frac{E \times C_w}{1 + r_{fw}^3 \times \left(\frac{d}{12 \times L_{br}}\right) \times \left(1 + \frac{b_f}{d}\right)} \quad (3.34)$$

$$W_{eR} = \frac{\pi}{L_{br}} \times \sqrt{\frac{EC_{we}}{GJ_e}} \quad (3.35)$$

$$A_{meR} = 2,95 - 1,143 \times W_{eR}^2 + 4,070 \times W_{eR} \quad (3.36)$$

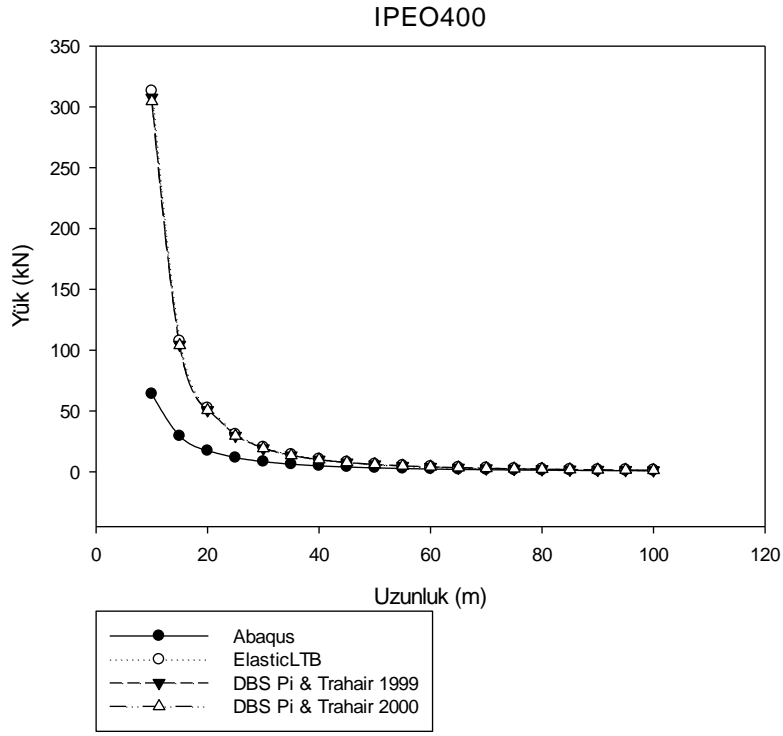
$$B_{meR} = 1,0$$

$$C_{meR} = \frac{A_{meR}}{B_{meR}} \quad (3.37)$$

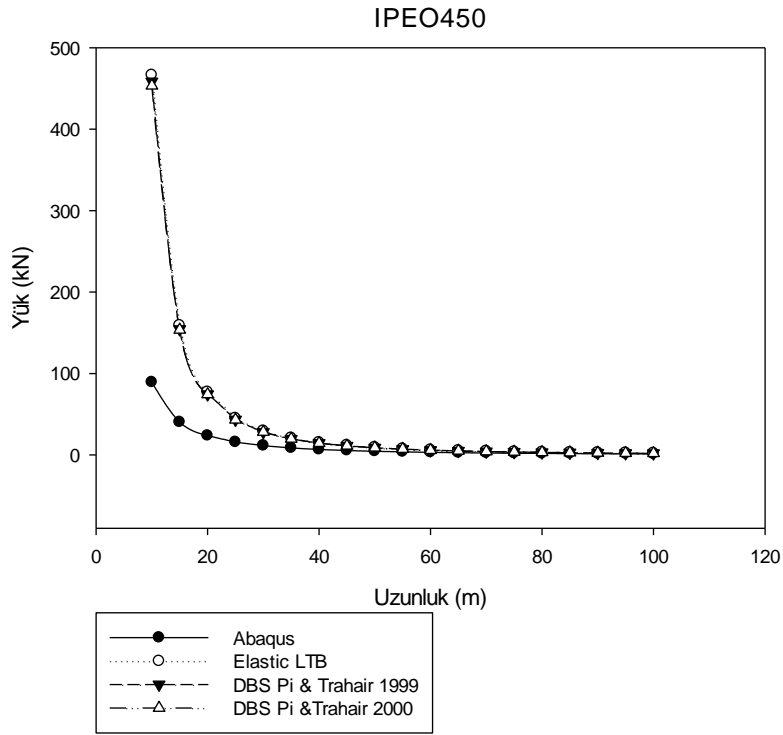
$$M_{PTR} = \frac{C_{meR} \times \pi}{L_{br}} \times \sqrt{E \times I_y \times GJ_e} \times \sqrt{1 + W_{eR}^2} \quad (3.38)$$

$$P_{PTR} = \frac{4 \times M_{PTR}}{L} \quad (3.39)$$

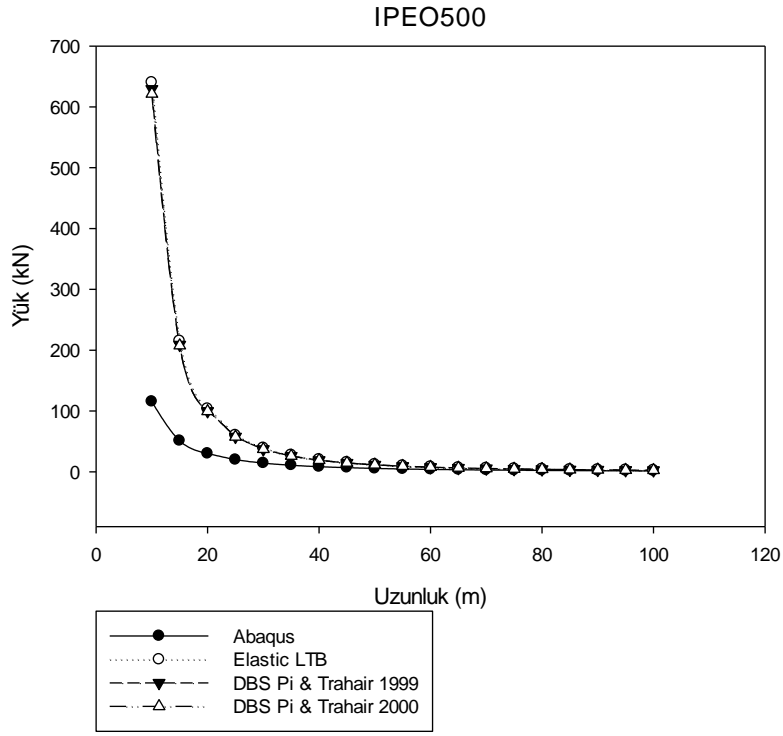
Yukarıda açıklanan formüller ile hesaplanan  $P_{cr}$  değerlerin sonlu elemanlar analizi ile elde edilen  $P_{cr}$  değerleri ile kıyaslaması yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. (Şekil 3.25-3.30)



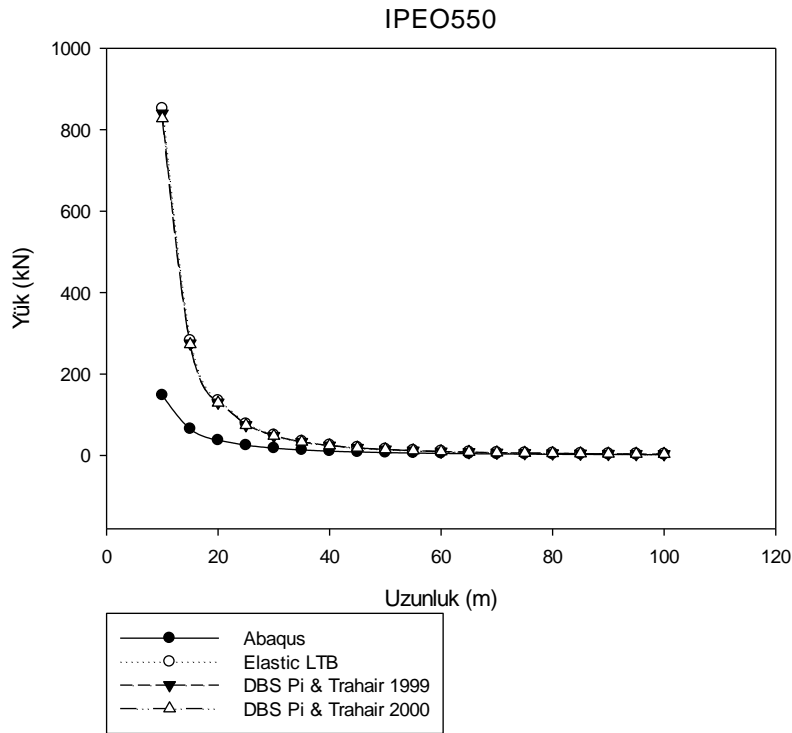
**Şekil 3.25.** IPE O 400 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar



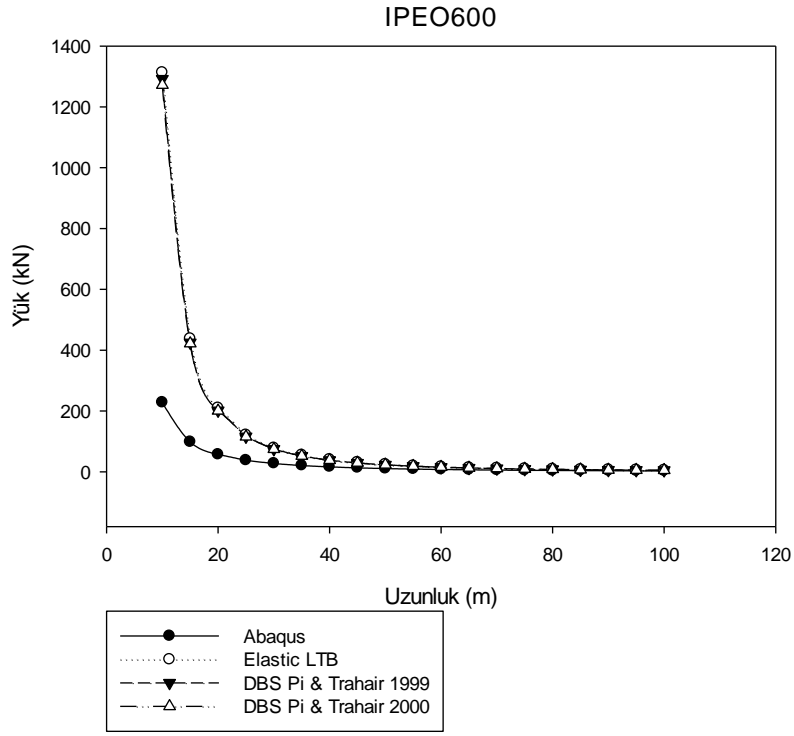
**Şekil 3.26.** IPE O 450 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar



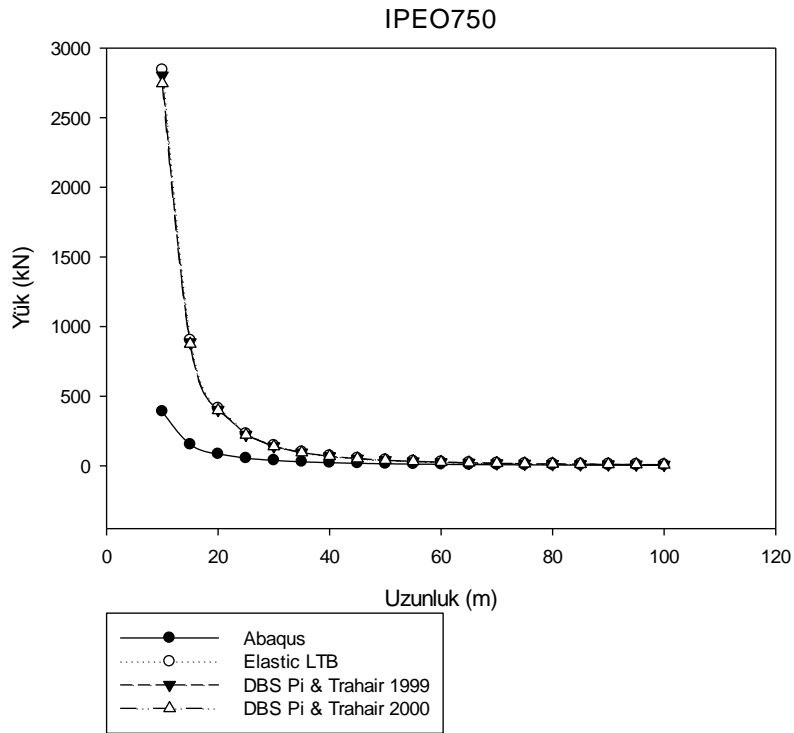
Şekil 3.27. IPE O 500 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar



Şekil 3.28. IPE O 550 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar

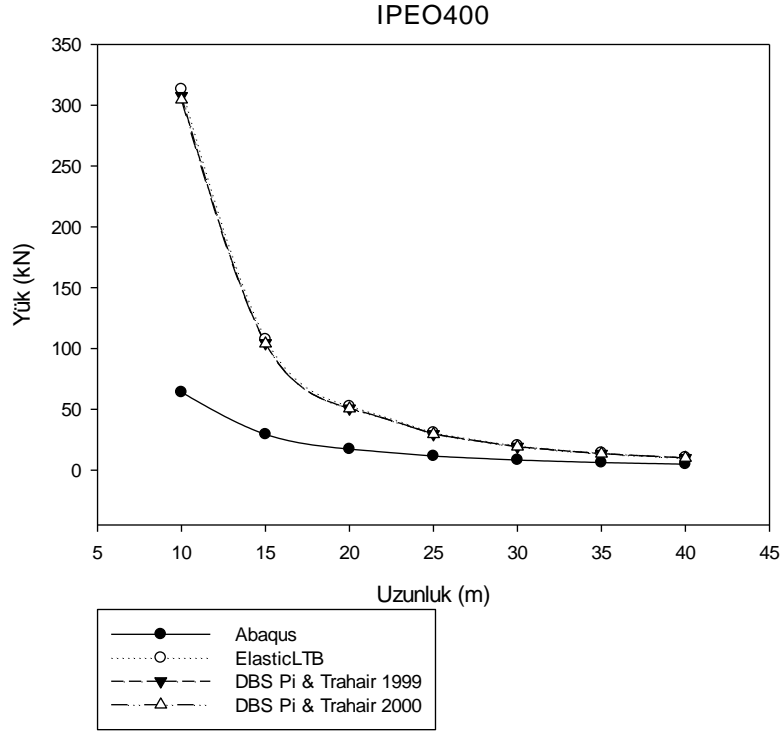


**Şekil 3.29.** IPE O 600 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar

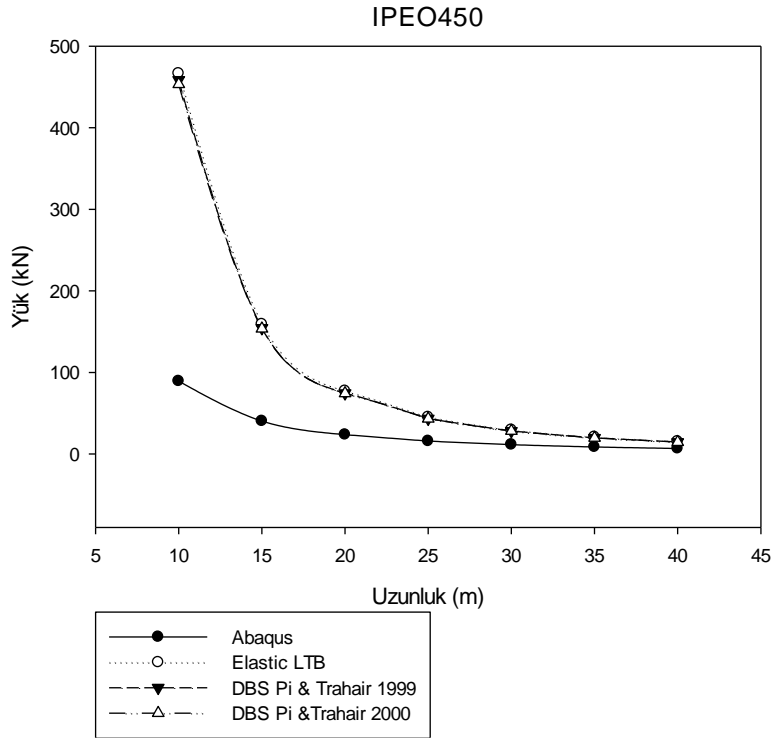


**Şekil 3.30.** IPE O 750 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar

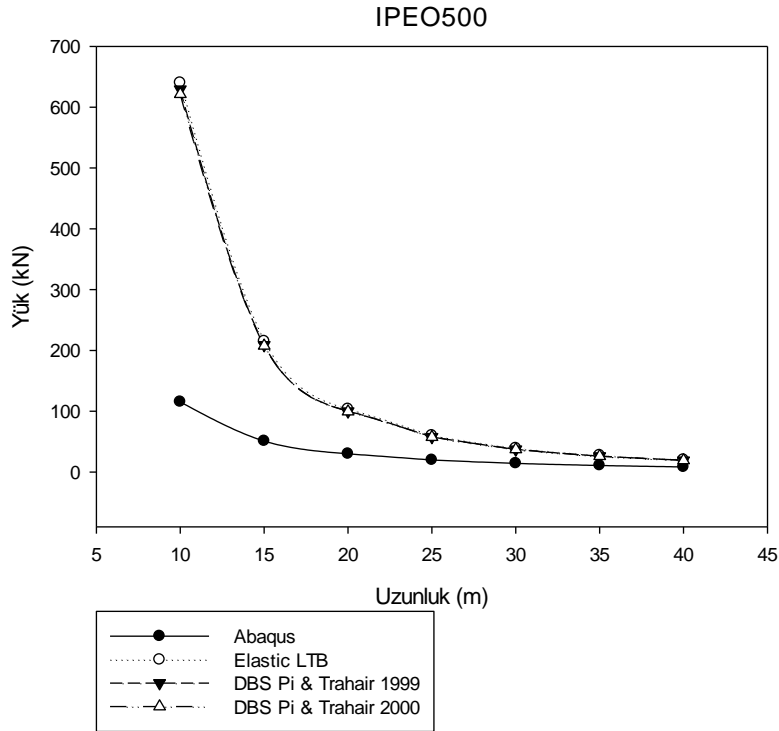
Yukarıda verilen grafiklerin daha net anlaşılması açısından 10m-40m ve 40m-100m uzunlukları arası grafikleri aşağıda verilmiştir. (Şekil 3.31-3.42)



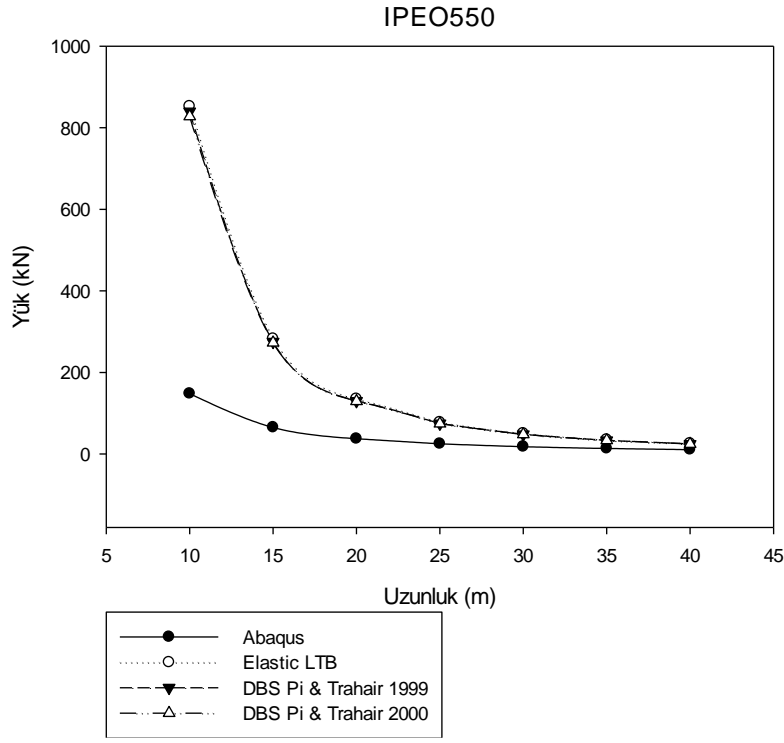
**Şekil 3.31.** IPE O 400 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m)



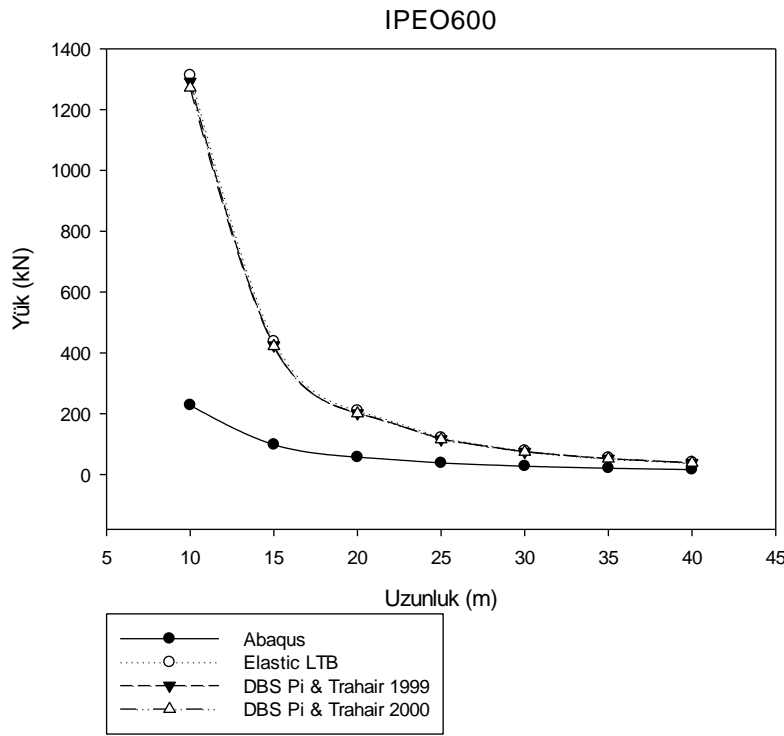
**Şekil 3.32.** IPE O 450 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m)



**Şekil 3.33.** IPE O 500 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m)

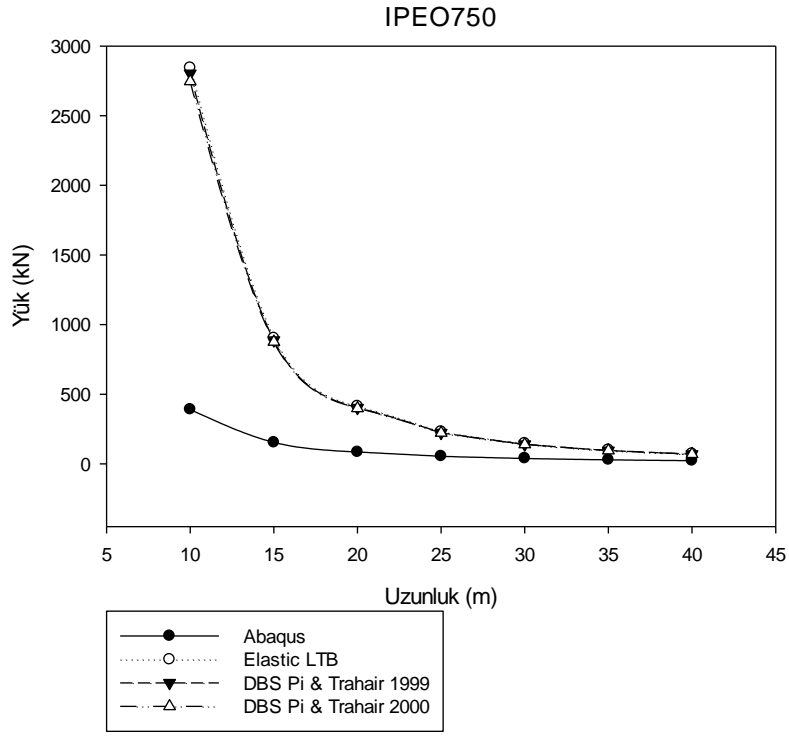


**Şekil 3.34.** IPE O 550 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m)

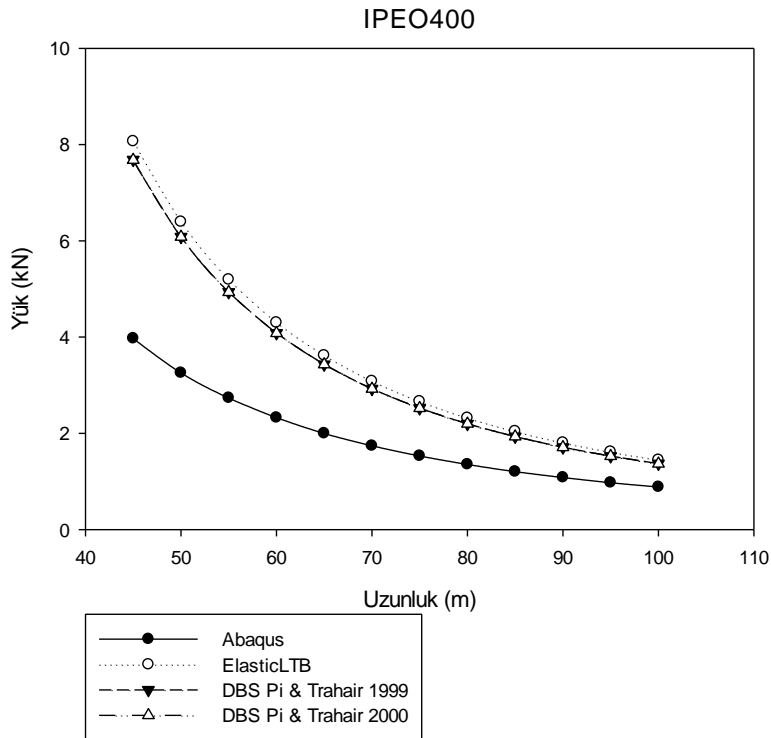


**Şekil 3.35.** IPE O 600 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m)

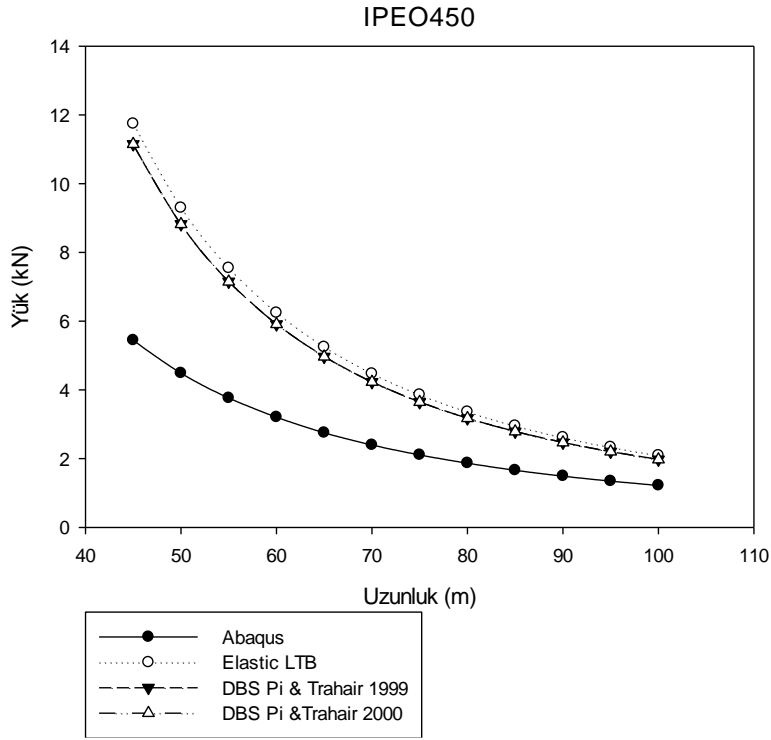




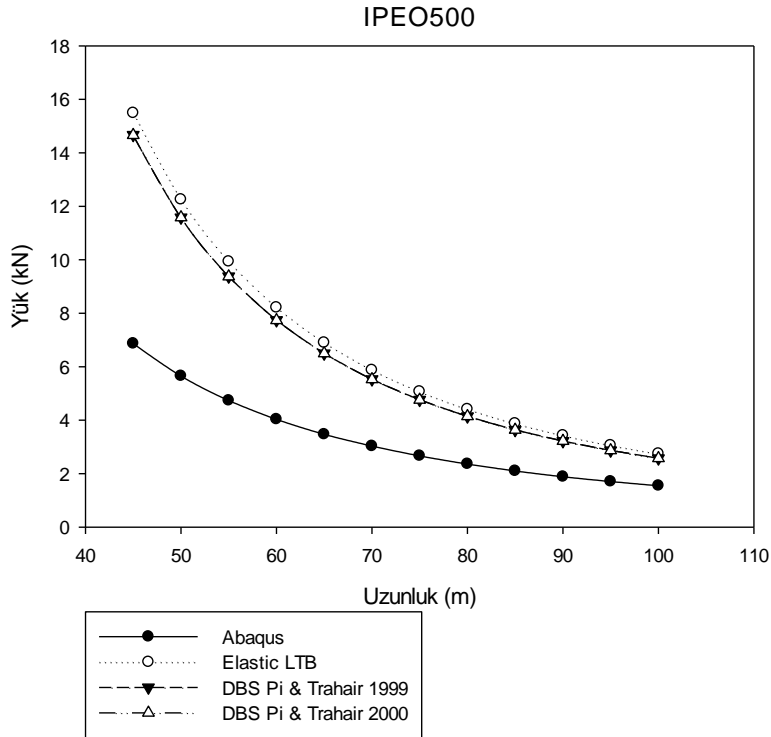
**Şekil 3.36.** IPE O 750 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (10m-40m)



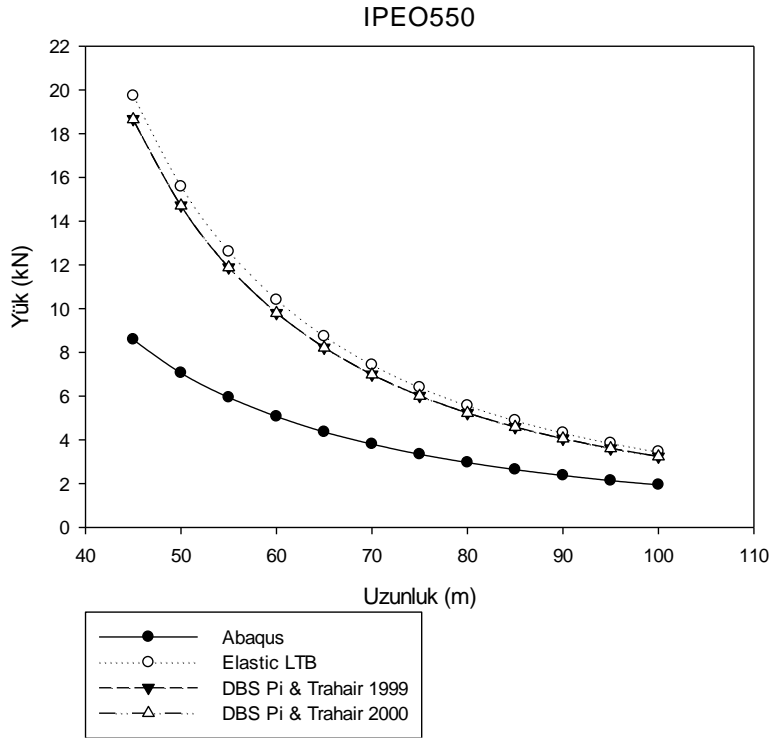
**Şekil 3.37.** IPE O 400 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m)



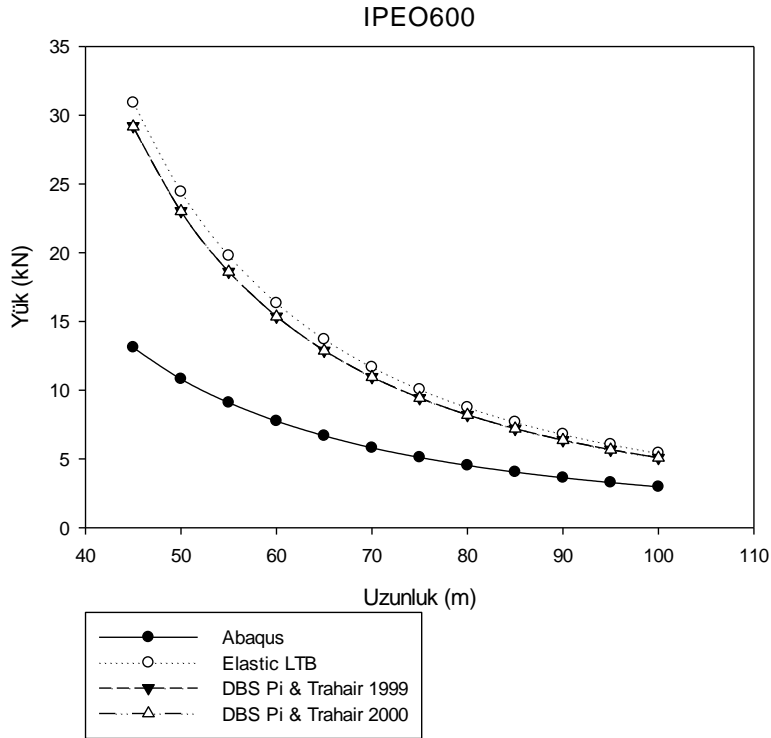
**Şekil 3.38.** IPE O 450 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m)



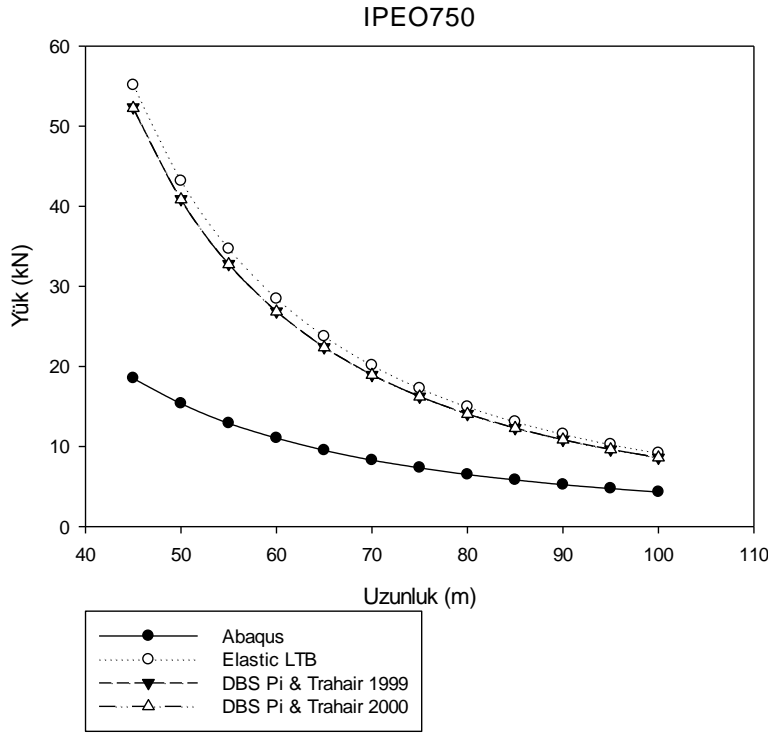
**Şekil 3.39.** IPE O 500 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m)



**Şekil 3.40.** IPE O 550 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m)



**Şekil 3.41.** IPE O 600 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m)



**Şekil 3.42.** IPE O 750 Kirişi Abaqus ve Akademik Çalışmalar (45m-100m)

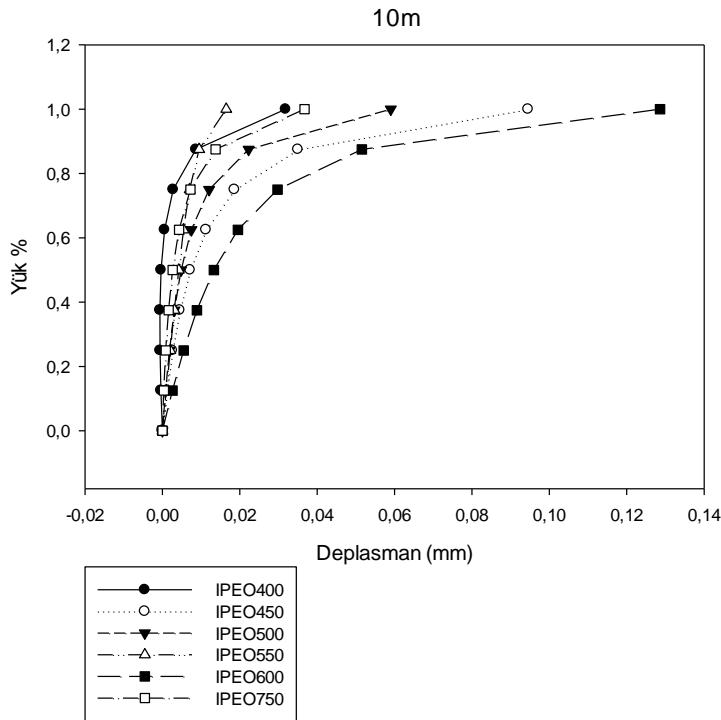
Yukarıda verilen nümerik analiz sonuçları ile akademik çalışmalar sonucunda elde edilen elastik yanal burulmalı burkulma ve yanal buruşmalı burkulma formülleri ile hesaplanan sonuçların kıyaslandığı grafikler incelendiğinde, nümerik analiz sonuçlarının daha aşağıda kaldığı görülmüştür. Kıyaslama yapılan formüller dolu gövdeli kirişler için geliştirilmiştir. Bu konuda İ. Kalkan ve A. Büyükkaragöz [8] çift simetrik çelik I kirişler için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarındaki kirişler dolu gövdelidir. Elde ettikleri sonuçları aynı formüller ile kıyasladıklarında çok yakın oldukları görülmüştür. Fakat bu yüksek lisans çalışmasında kullanılan kirişler düzenli gövde boşlukludur. Söz konusu yanal burulmalı burkulma ve yanal buruşmalı burkulma formüllerini gövdesi boşluklu kirişler için kullanmak amacıyla kiriş kesitinde  $h_{eq}$  adında bir yükseklik tanımlanmıştır.  $h_{eq}$  değeri, bir dairesel boşluk alanının yaklaşık olarak bir kare alanına eşitlenmesi sonucunda karenin bir kesitinin uzunluğu olarak tanımlanmıştır. Bu şekilde formüller düzenli gövde boşluklu kirişler için düzenlenmeye çalışılmasına rağmen yapılan kıyaslamalardan anlaşıldığı üzere elastik yanal burulmalı burkulma ve Pi-Trahair'in yanal buruşmalı burkulma

çözümleri düzenli gövde boşluklu kirişler için güvenli sonuçlar vermemiştir. Boşluklar etrafında oluşan ilave gerilmelerden dolayı da nümerik sonuçların daha düşük yanal buruşmalı burkulma dayanımı olduğu düşünülmektedir.

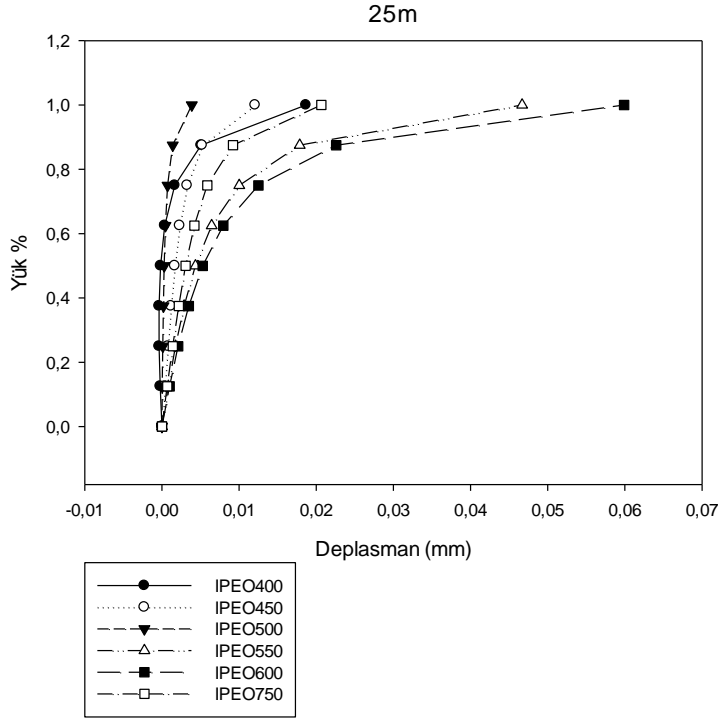
### 3.2. Statik Analizin Yapılması

Bulunan eigenvalue değerleri kirişlerin üst başlıklarının açıklık ortasından düşey doğrultuda yüklenmiş ve statik analiz yapılmıştır. Sonrasında her bir kiriş için Yük-Deplasman grafiği oluşturulmuştur.

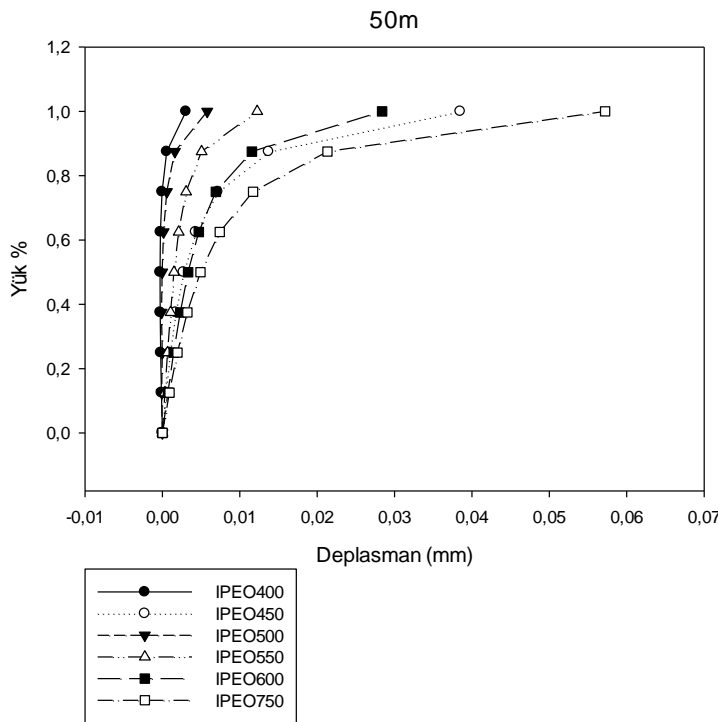
Aşağıda analiz edilen kirişlerden bazılarının ait yük-yanal deplasman grafikleri sıralanmıştır. (Şekil 3.43-3.47) Grafiklerde deplasmanlar mm cinsinden gösterilmiştir. Analiz edilen diğer kirişlere ait grafikler ekler kısmında verilmiştir. (Bkz. EK 2)



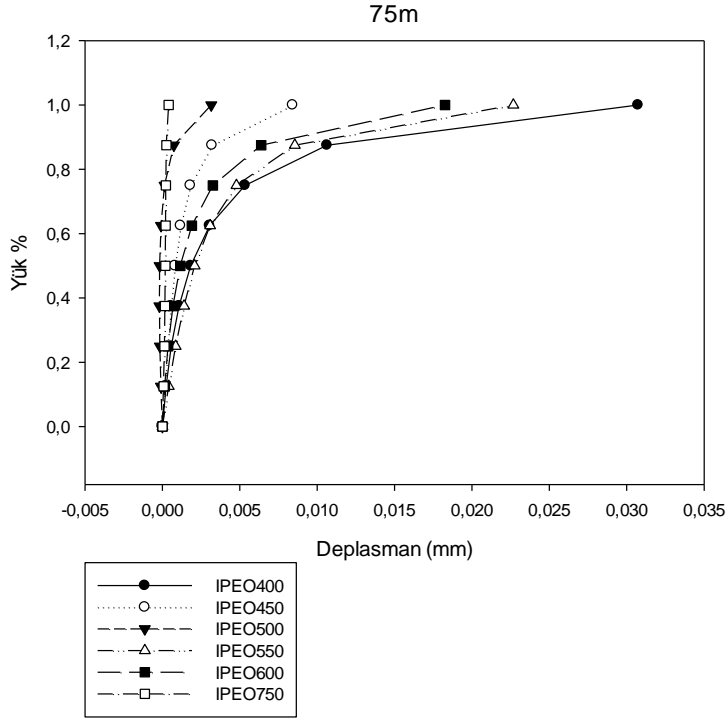
Şekil 3.43. 10m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği



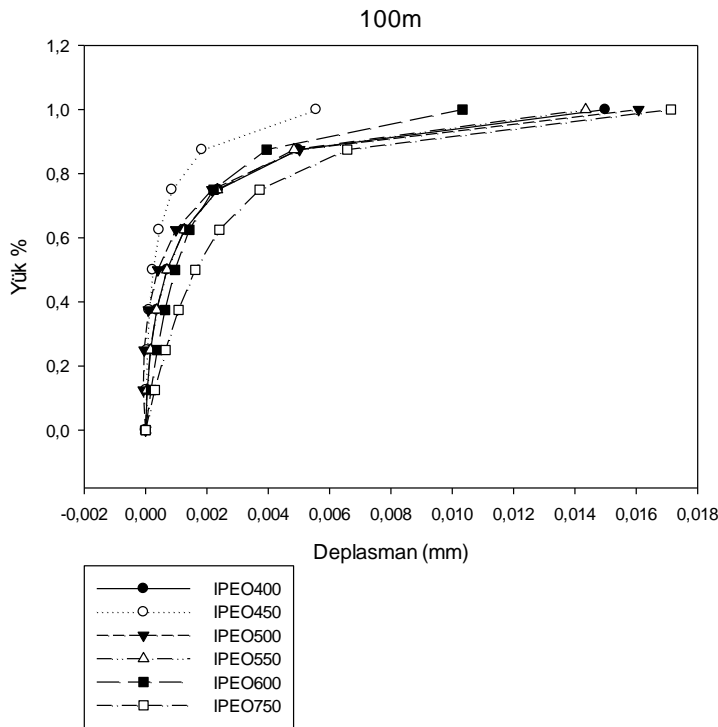
Şekil 3.44. 25m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği



Şekil 3.45. 50m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği



Şekil 3.46. 75m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği



Şekil 3.47. 100m Uzunluğundaki Kirişlerin Yük/Yanal Deplasman Grafiği

## 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 4.1. Sonuçlar

Çelik malzemesinin çelik yapı inşasında emniyetten taviz vermeden tasarruflu kullanımı mümkündür. Dünyada bu amaçla çelik kirişler boşluklu olarak üretilmektedir.

Yapılan literatür taramasından petek kiriş veya boşluklu kiriş olarak tabir edilen bu yapı elemanının aynı amaçla kullanılan aynı ağırlıktaki dolu gövdeli olanına göre daha yüksek atalet momenti ve taşıma kapasitesinde olduğu görülmüştür.

Düzenli gövde boşluklu çelik I profillerin yanal stabilitelerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi konulu yüksek lisans tez çalışmasında düzenli dairesel gövde boşluklarına sahip çelik 6 tip IPEO profili 10 m den 100m ye kadar uzunlukları 5'er metre artırılabilmek suretiyle sonlu elemanlar programı Abaqus ile modellenmiştir, toplamda yüz on dört adet kiriş geometrisi oluşturulmuştur.

Abaquste modellenen kirişlerin yanal stabilitelerini hesaplamak için lineer burkulma analizi yapılmıştır. Aynı kesitler için AISC-LRFD 2005, AS 4100, EuroCode 3 çelik yapı şartnamelerinde yer alan yanal burulmalı burkulma denklemleri ile ve Pi-Trahair'in yaptığı çalışmalar ile buldukları kritik yanal buruşmalı burkulma yükü denklemleri ile hesaplamalar Mathcad programında yapılmıştır. Çıkan sonuçlar sonlu elemanlar çözümü ile kıyaslanmıştır.

Ayrıca modellenen kirişlerin yanal deplasmanlarının ölçülmesi için statik analiz yapılmıştır. Bunun için abaqus ile bulunan  $P_{cr}$  değerleri, kirişlerin açıklık ortalarından düşey doğrultuda konsantre yük olarak sırasıyla  $P_{cr}$  yükünün 1/8'i, 1/4'ü, 3/8'i, 1/2'i, 5/8'i, 3/4'ü, 1/1'i oranında etkilmiştir. Yükleme yapılan noktanın yanal deplasmanları Abaqus programında ölçülmüştür. Yapılan bu çalışmalar ile aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;



- i. Yapılan literatür taraması sonucunda kirişler için 3 tip burkulma olduğu görülmüştür: yerel burkulma, yanal burulmalı burkulma ve yanal buruşmalı burkulma. Yine literatür araştırmasından kuvvetli başlık-narin gövde yapılı kesitlerde lokal burkulma ve yanal burulmalı burkulmanın birlikte bir kombinasyon oluşturarak yanal buruşmalı burkulma diye tabir edilen burkulma tipini oluşturdukları anlaşılmıştır. Analiz edilen kirişlerin burkulma şekilleri incelendiğinde üst başlığın alt başlığa göre daha fazla döndüğü görülmüştür. Söz konusu kirişlerde burkulma esnasında gövde narinliğinden dolayı gövdede buruşmalar ortaya çıkmış bu nedenle yanal buruşmalı burkulma yaparak göçtükleri anlaşılmıştır.
- ii. Abaqus ile yapılan lineer analiz sonucu bulunan  $P_{cr}$  değerinin kıyaslama yapılan şartnameler ve akademik çalışmalar ile bulunan  $P_{cr}$  değerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu duruma kesit gövdesinin narinliği sebebiyle burkulma anında gövdede buruşmaların olması sebep olmaktadır. Yani kirişlerin kritik yük altında Yanal Burulmalı Burkulma (Lateral Torsional Buckling) değilde Yanal Buruşmalı Burkulma (Lateral Distortional Buckling) yapmaları, şartnamelerin formüllerinde bu gövde buruşmalarının hesaba katılmaması sebep olmaktadır. Bu sebeple yapılan analizlerin şartname değerlerinden daha emniyetli tarafta kaldığı düşünülmektedir. Kıyaslama yapıldığında en yakın sonuçların eurocode 3 çelik şartnamesi formülü ile hesaplanan değerler için olduğu görülmüştür.
- iii. Nümerik sonuçların geçmiş araştırmacılar tarafından geliştirilmiş yanal buruşmalı burkulma formüllerinden elde edilen analitik sonuçlarla karşılaştırılması, yanal buruşmalı burkulma formüllerinin çelik petek kirişler için yeterince güvenli sonuçlar vermediğini göstermiştir. Kıyaslama için kullanılan elastik yanal burulmalı burkulma ve Pi-Trahair'ın yanal buruşmalı burkulma çözümlerinin formüllerinin aslen dolu gövdeli çelik kirişler için geliştirildiği unutulmamalıdır.
- iv. Burkulma yükleri saptandıktan sonra yapılan statik analizler neticesinde kirişlerin yaptıkları yanal deplasman değerleri ölçülmüştür. Bu değerlerin

hepsi 1 mm'den çok küçük değerler olarak okunmuştur. Yanal deplasman değerlerinin kesit yüksekliği ve kiriş uzunluğundan bağımsız olarak değişmekte olduğu görölmüştür. Statik analiz sonucunda kirişlerin yaptığı yanal deplasmanların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu söylenebilir.

#### 4.2. Öneriler

I profilli çelik kirişlerde kesme kuvvetleri büyük oranda gövde tarafından karşılanır. Analiz ettiğimiz kirişlerin gövdesi boşluklu olduğundan kesme dayanımları düşük olacaktır. Kesme dayanımını artırmak için kirişlerde belirli aralıklarla berkitme kullanılması faydalı olacaktır.

Nümerik analizlerde, kirişlerin daha düşük yük değerinde yanal buruşmalı burkulmaya uğradığı görölmüştür. Mevcut şartname formüllerinin yanal buruşmalı burkulmayı hesaba katmaması ve yapılan akademik çalışmalarda geliştirilen formüllerin dolu gövdeli kirişler için geliştirilmiş olmasının bu durumla karşılaşılmamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarla yanal buruşmalı burkulma formüllerinin boşluklu kirişler için düzenlenmesi yararlı olacaktır.

Bu tez çalışmasında dairesel boşluklu çelik I profilli kirişlerin yanal stabiliteleri incelenmiştir. İleride bu çalışmaların farklı geometride boşluklar içeren kirişler için de yapılması yararlı olacaktır.

## KAYNAKLAR

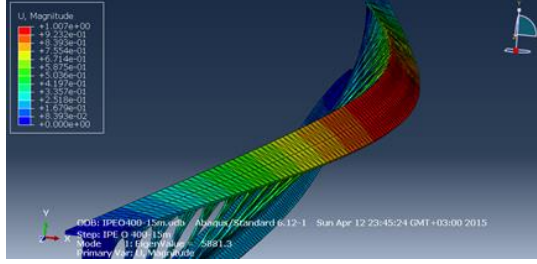
- [1] Grünbauer, J., What Makes Castellated Beams So Desirable As A Constructional Element?, Special Possibilities, <http://www.grunbauer.nl/eng/waarom.htm>, (Erişim tarihi:12.10.2014)
- [2] Anonim, İnşaat Teknolojisi, Çelik Yapı Döşeme-Kiriş ve Merdiven Çizimleri, MEB, Ankara, 2012
- [3] Anonim, Rozak Demir, Proje Destek Fasikülleri, Petek kirişler, Sayı: 08-1/5 Temmuz 2010
- [4] Anonim, ASD Metal Services, Cellbeam to Autodesk Revit Structure <http://www.asdmetalservices.co.uk/Products/ASD%20Westok/BIM.aspx>, (Erişim tarihi:18.10.2014)
- [5] Kalaycıgil, M., Petek Kirişlerin Davranışları ve Tasarım Esasları. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi, Kayseri 2007.
- [6] Kaban, MF., Vatansever, C., Yapma Enkesitli Çift I Elemandan Oluşan Çok Parçalı Kirişlerin Yanal Burulmalı Burkulması Üzerine Analitik Bir Çalışma, TMMOB İMO, İstanbul 2013
- [7] Ayhan, D., Çelik Kirişlerde Yanal Burulmalı Burkulma Analizi. Yüksek Lisans Tezi,İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul 2007.
- [8] Kalkan, I., Buyukkaragoz, A., A numerical and analytical study on distortional buckling of doubly-symmetric steel I-beams, Journal of Constructional Steel Resarch, Kirikkale University, 2011
- [9] Roberts, TM., Jhita, PS., Lateral, local and distortional buckling of I beams. Thin-Walled Struct 1983;1:289-308
- [10] Bradford, MA., Lateral-distortional buckling of steel I-section members. J ConstrSteel Res 1992;23:97-116.

- [11] Bradford, MA., Trahair, NS., Distortional buckling of I-beams. ASCE, J Struct Div 1981;107:355–70.
- [12] Pi, YL., Trahair, NS., Distortion and warping at beam supports. Center for Advanced Structural Engineering Research Report No. R790. Sydney, Australia: University of Sydney; 1999.
- [13] Trahair, NS., Lateral-distortional buckling of monorails. Eng Struct 2009;31:2873–9.
- [14] Zirakian, T., Showkati, H., Experiments on distortional buckling of I-beams. ASCE, J Struct Eng 2007;133:1009–17.
- [15] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. Chicago, USA; 1986.
- [16] Standards Association of Australia. AS 4100 steel structures. Sydney, Australia; 1998.
- [17] Bradford, MA., Wee, A., Analysis of buckling tests on beams on seat supports. J Constr Steel Res 1994;28:227–42.
- [18] Bradford, MA., Inelastic distortional buckling of I-beams. Comput Struct 1986;24:923–33.
- [19] Trahair, NS., Deformations of geometrically imperfect beams. Proc ASCE, J Struct Div 1969;95(ST7):1475–96.
- [20] Southwell, RV., On the analysis of experimental observations in the problems of elastic stability. Proc R Philos Soc Lond 1932;135:601 (A).
- [21] Massey, C., Elastic and inelastic lateral instability of I-beams. The Engineer 1963;216:672–4.
- [22] British Standards Institution. BS 5950 Part 1: Structural use of steelwork in building. London, United Kingdom; 1990.

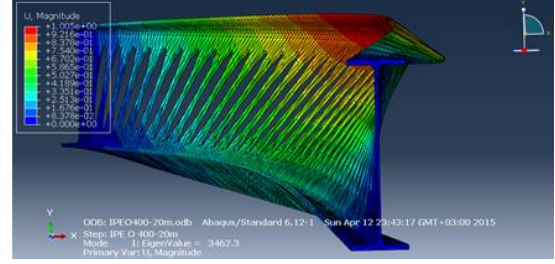
- [23] Pi, YL., Trahair, NS., Distortion and warping at beam supports. ASCE, J Struct Eng2000;126:1279–87.
- [24] Nethercot, DA., Trahair, NS., Inelastic lateral buckling of determinate beams. ProcASCE, J Struct Div 1976;102(ST4):701–17.
- [25] American Institute of Steel Construction. Load and resistance factor designspecification for structural steel buildings. Chicago, USA; 2005.
- [26] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 3: Design of steel structures Part 1–1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium; 2003.
- [27] Abaqus, Standard User's Manual, Version 6.8-1. Pawtucket, Rhode Island, USA:Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., 2008.
- [28] Arcelor Mittal, Dimensions of Castellated beams with circular openings, According to EN 10163-3: 2004, class C, subclass 1, EU, 2004
- [29] Mathcad, User's Guide, Mathcad 2000 Professional, Mathcad 2000 Standard Version 14, Massachusetts, USA, Mathsoft Inc., <http://www.mathsoft.com/> (Erişim tarihi:10.07.2014)

## EKLER

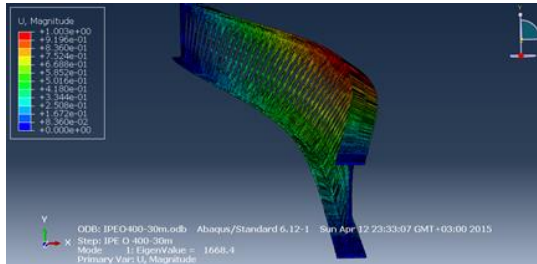
### EK 1 Burkulma Şekilleri



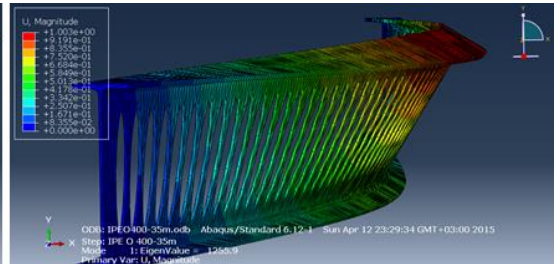
IPEO400-15m



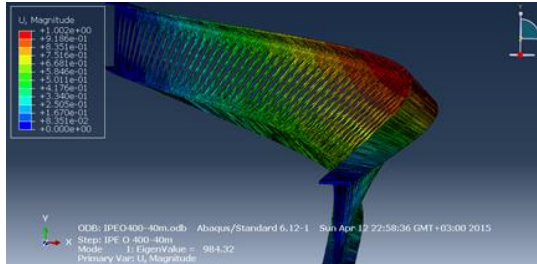
IPEO400-20m



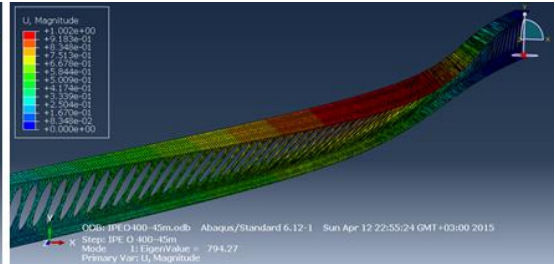
IPEO400-30m



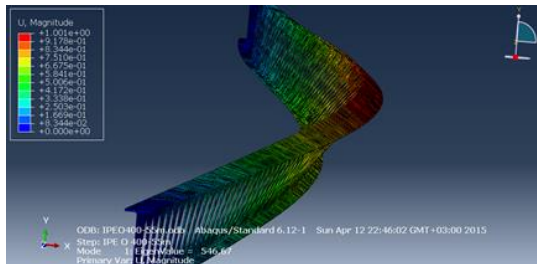
IPEO400-35m



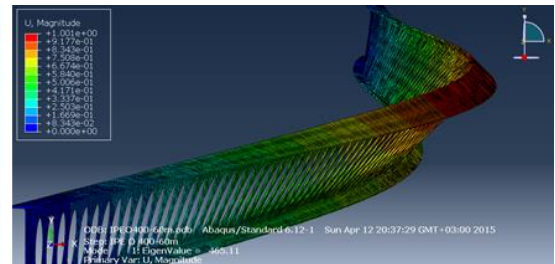
IPEO400-40m



IPEO400-45m

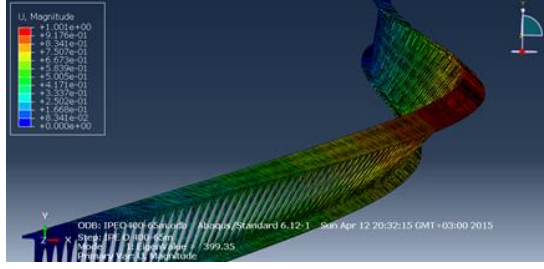


IPEO400-55m

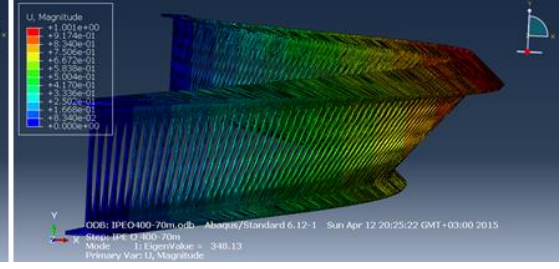


IPEO400-60m

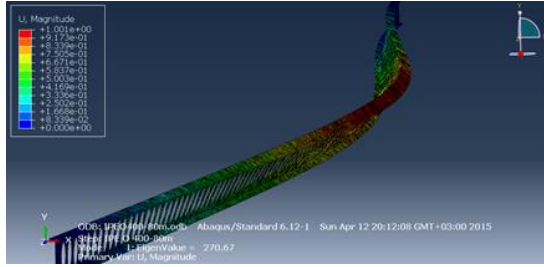
Şekil Ek 1.1. Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri



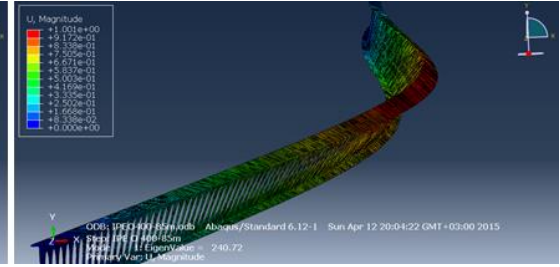
IPEO400-65m



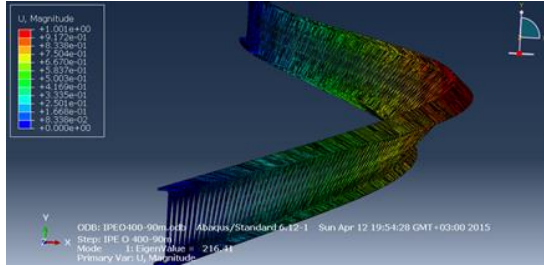
IPEO400-70m



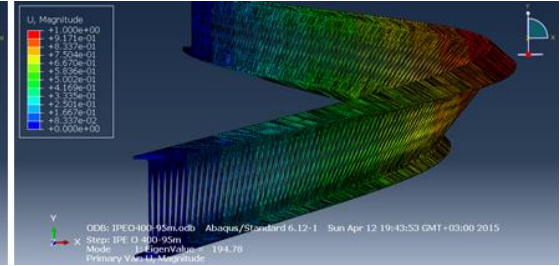
IPEO400-80m



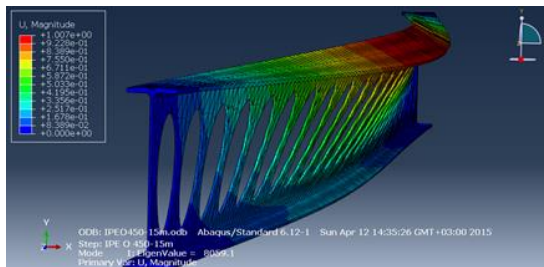
IPEO400-85m



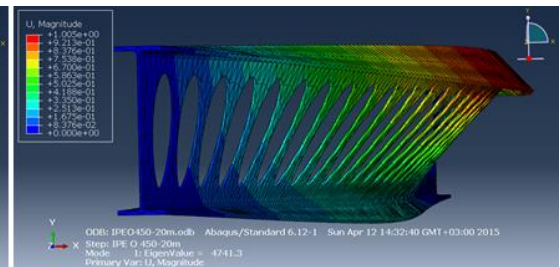
IPEO400-90m



IPEO400-95m



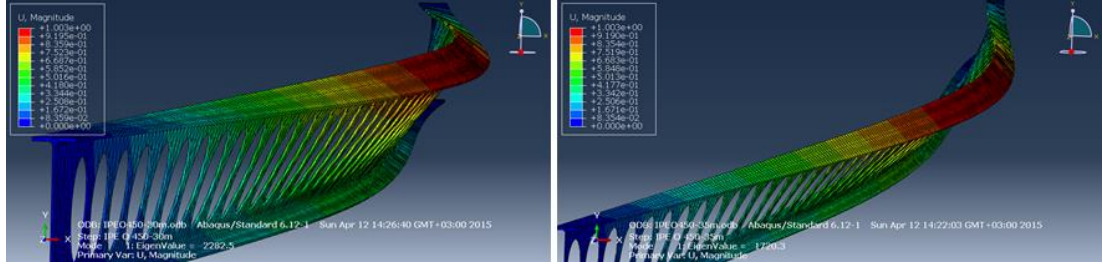
IPEO450-15m



IPEO450-20m

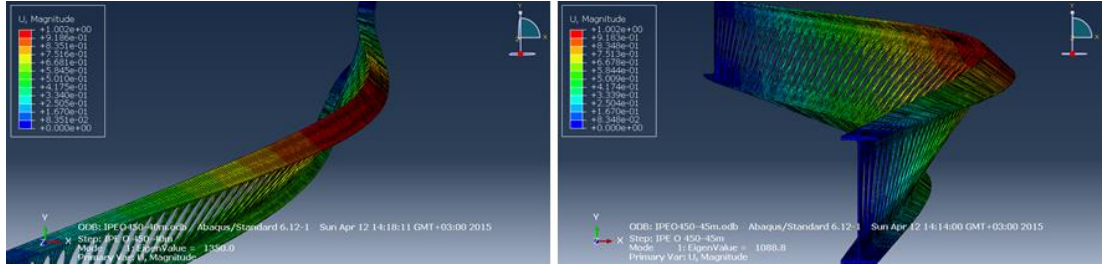
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri





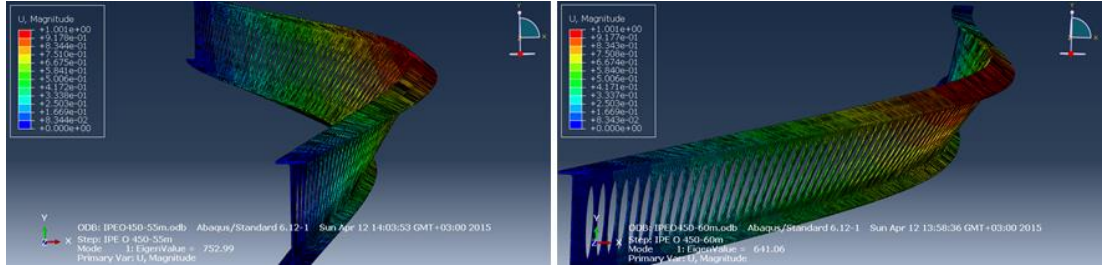
IPEO450-30m

IPEO450-35m



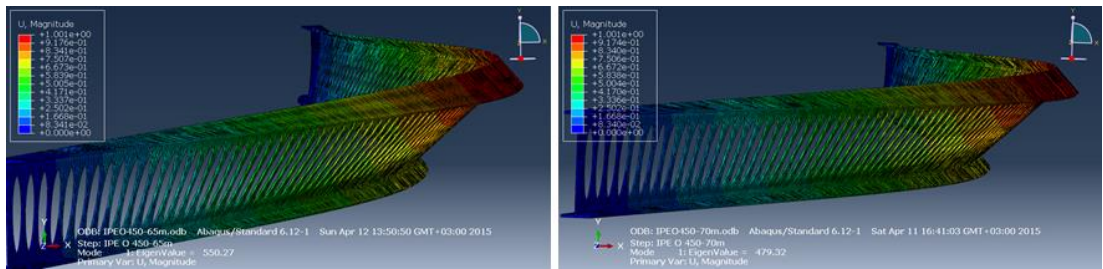
IPEO450-40m

IPEO450-45m



IPEO450-55m

IPEO450-60m

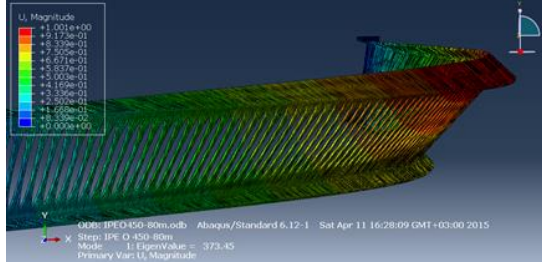


IPEO450-65m

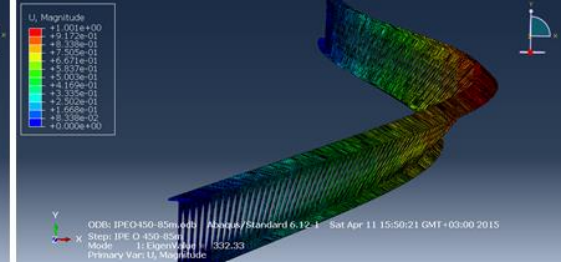
IPEO450-70m

Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri

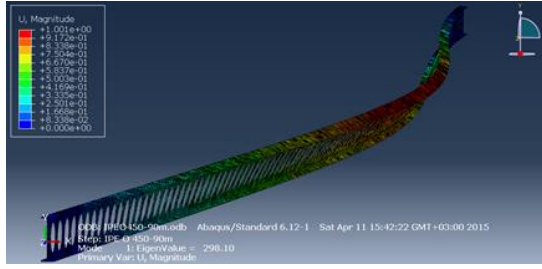




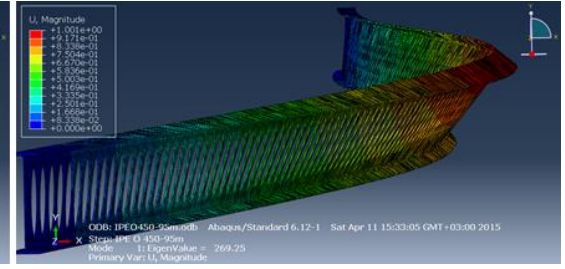
IPEO450-80m



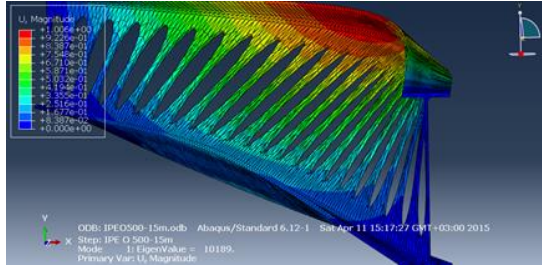
IPEO450-85m



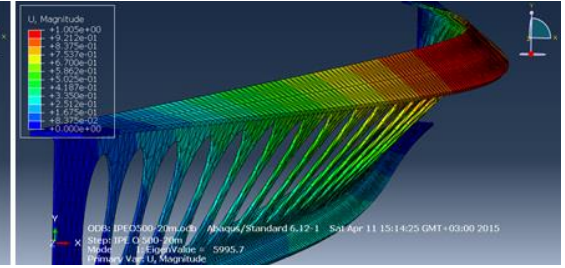
IPEO450-90m



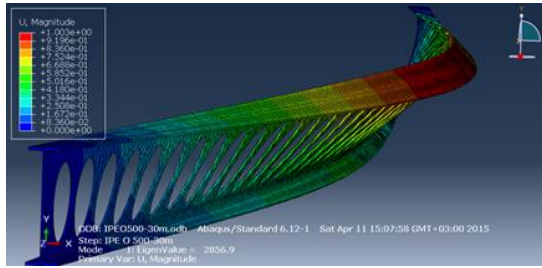
IPEO450-95m



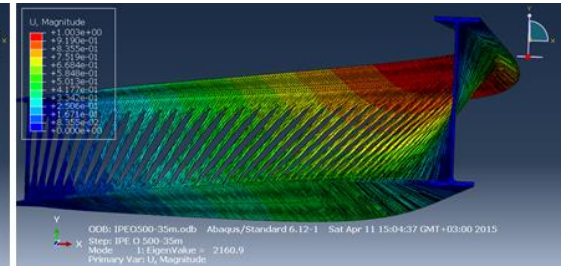
IPEO500-15m



IPEO500-20m

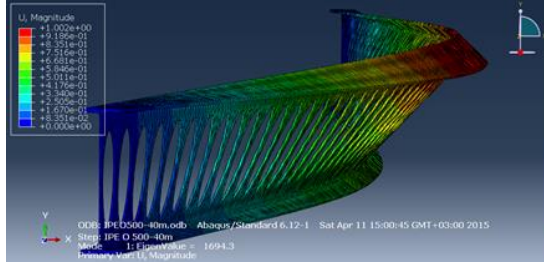


IPEO500-30m

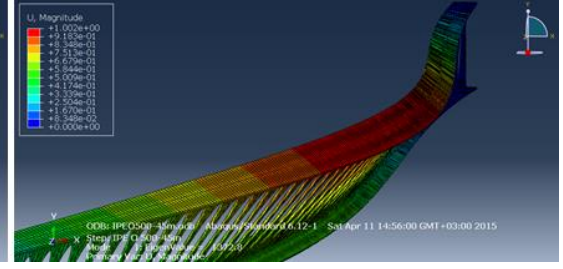


IPEO500-35m

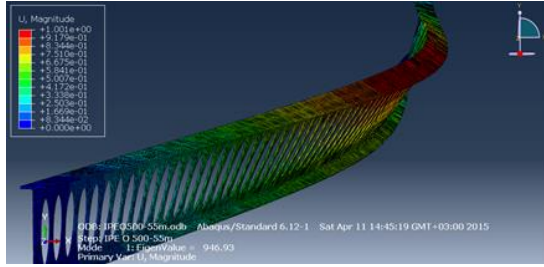
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri



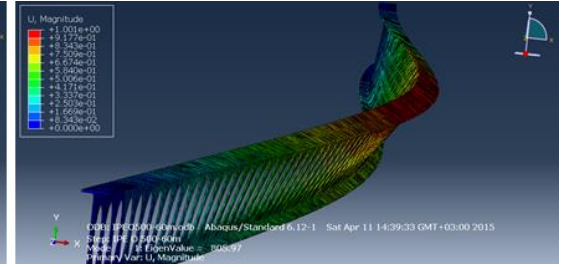
IPE500-40m



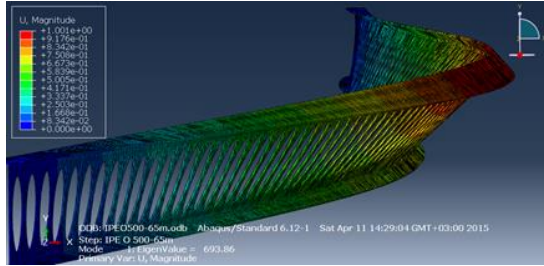
IPE500-45m



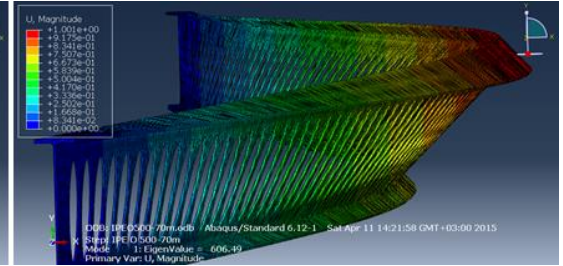
IPE500-55m



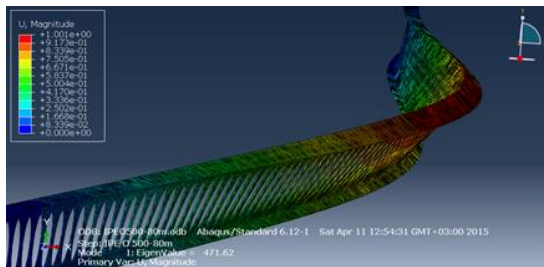
IPE500-60m



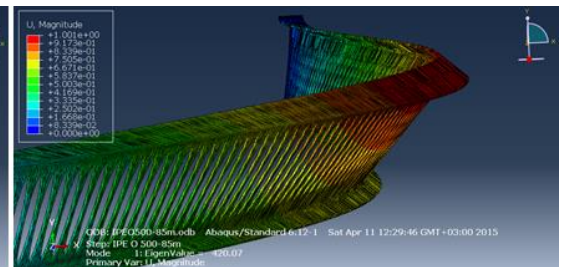
IPE500-65m



IPE500-70m

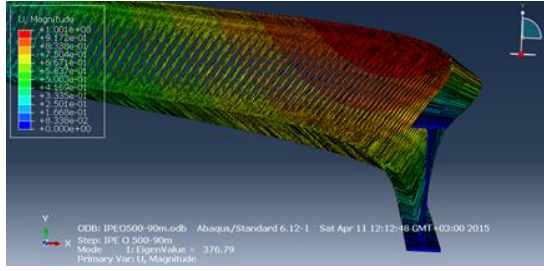


IPE500-80m

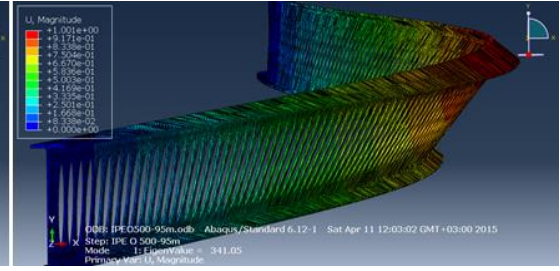


IPE500-85m

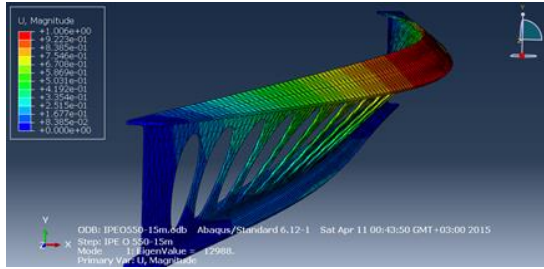
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri



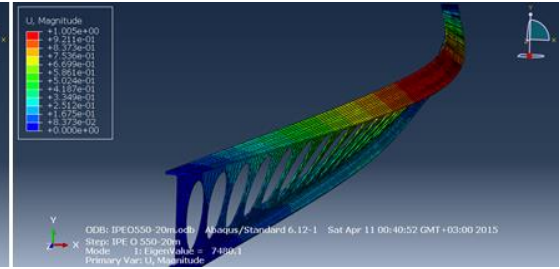
IPE0500-90m



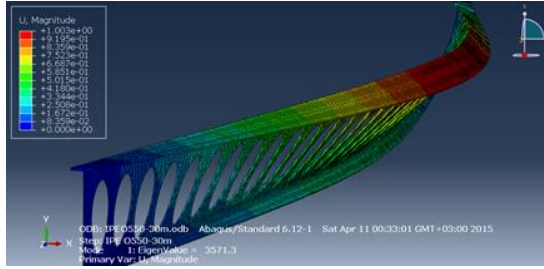
IPE0500-95m



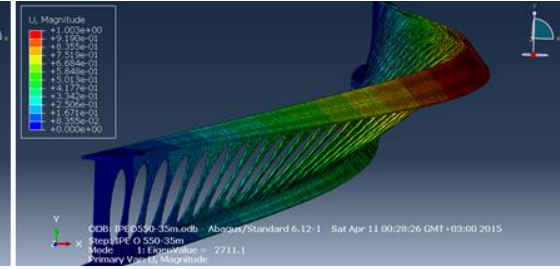
IPE0550-15m



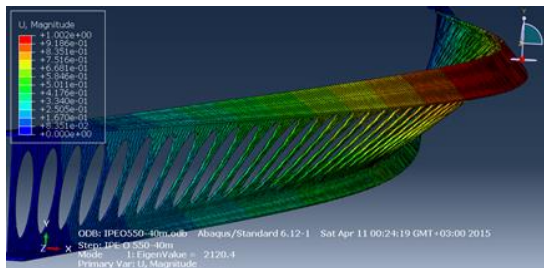
IPE0550-20m



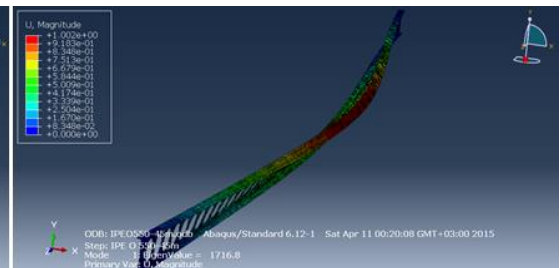
IPE0550-30m



IPE0550-35m



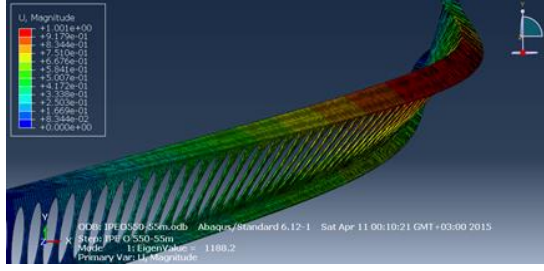
IPE0550-40m



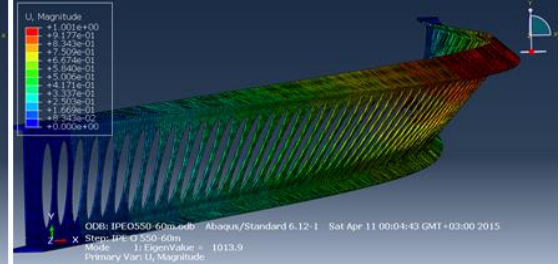
IPE0550-45m

Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri

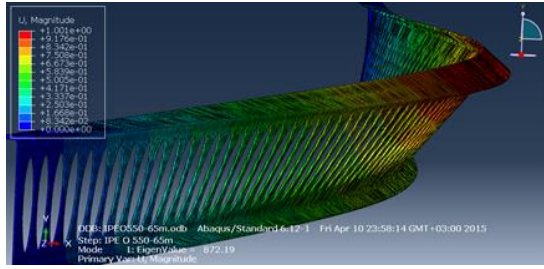




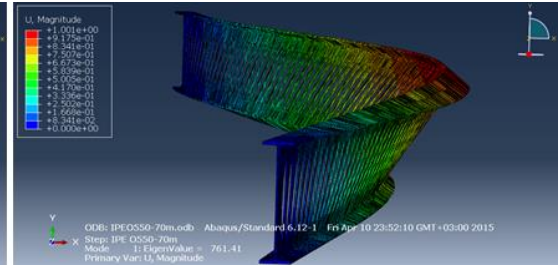
IPE0550-55m



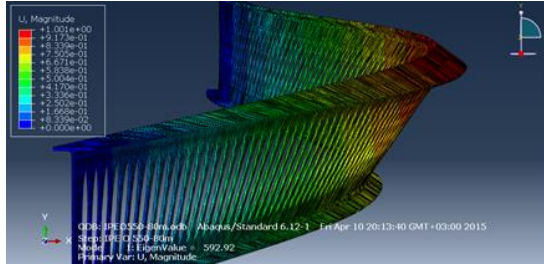
IPE0550-60m



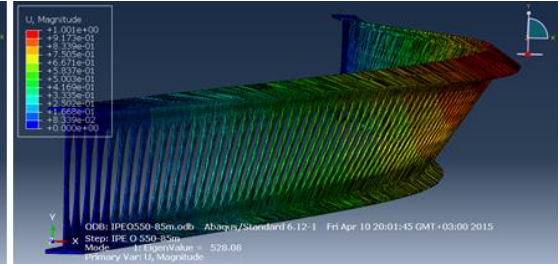
IPE0550-65m



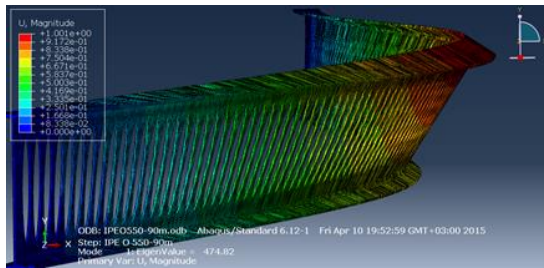
IPE0550-70m



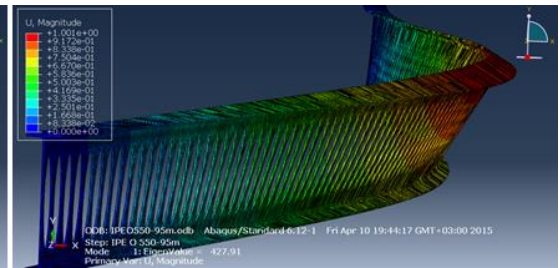
IPE0550-80m



IPE0550-85m

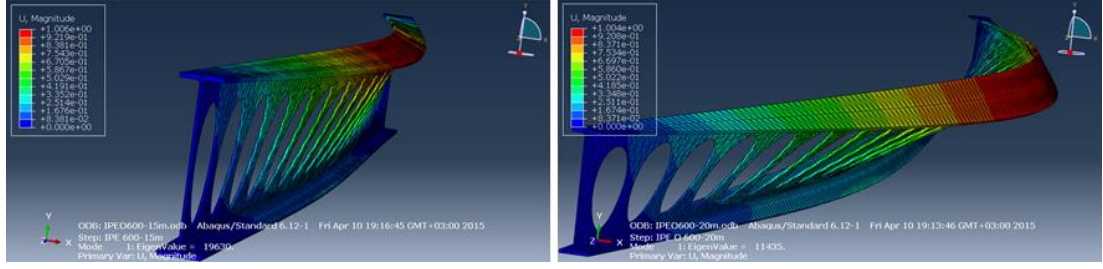


IPE0550-90m



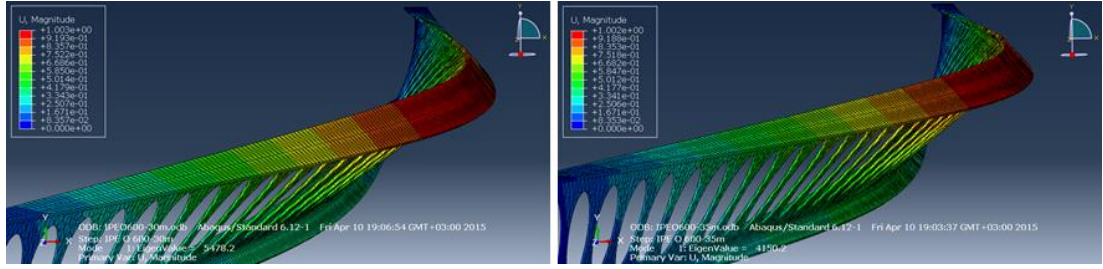
IPE0550-95m

Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri



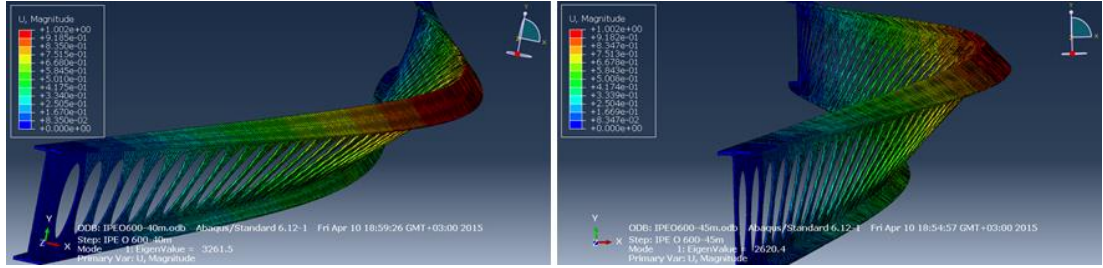
IPEO600-15m

IPEO600-20m



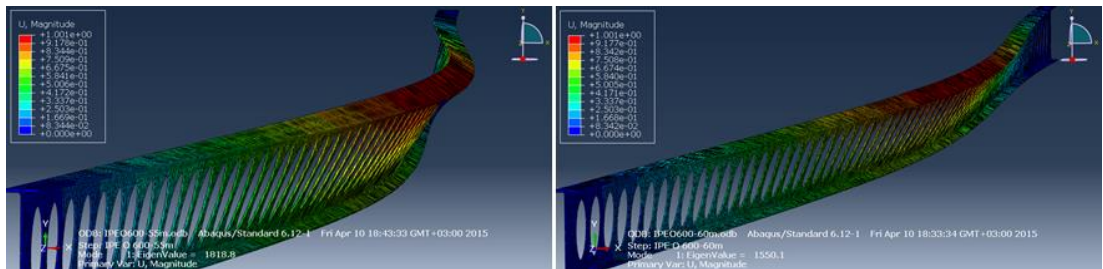
IPEO600-30m

IPEO600-35m



IPEO600-40m

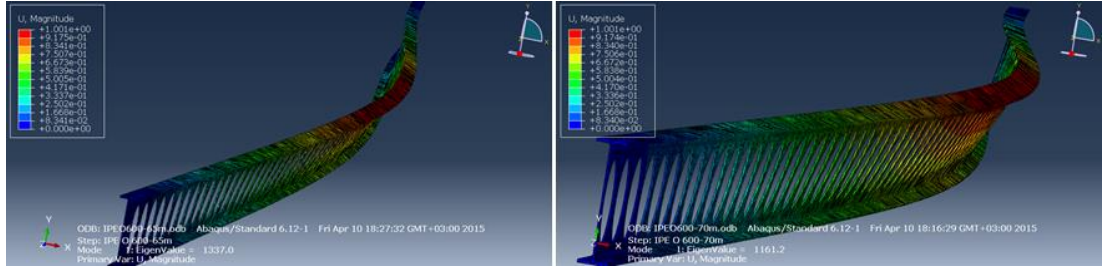
IPEO600-45m



IPEO600-55m

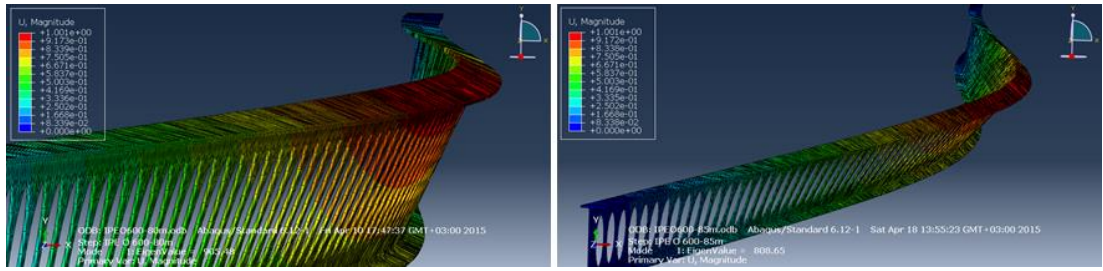
IPEO600-60m

Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri



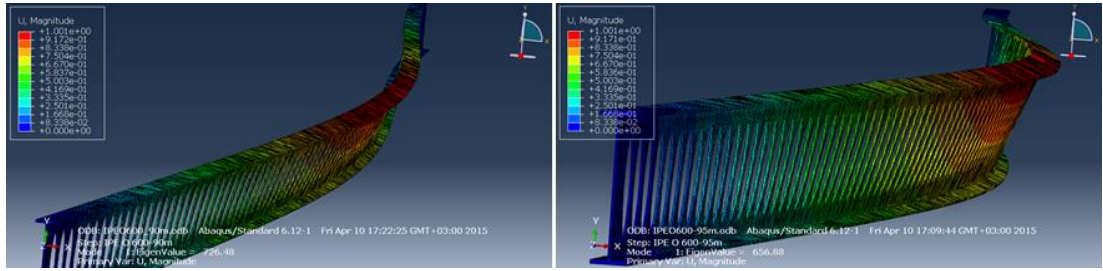
IPEO600-65m

IPEO600-70m



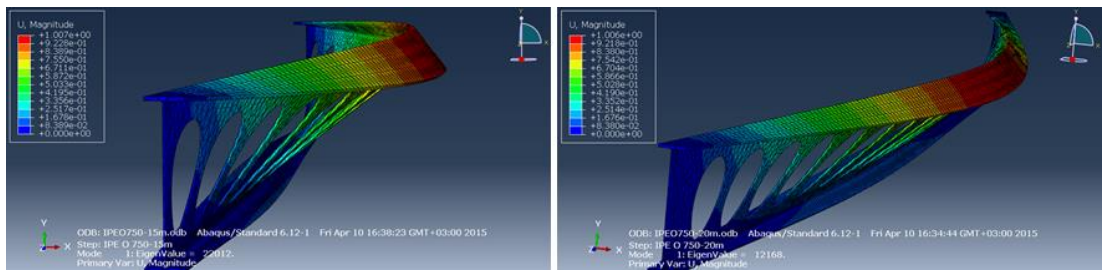
IPEO600-80m

IPEO600-85m



IPEO600-90m

IPEO600-95m

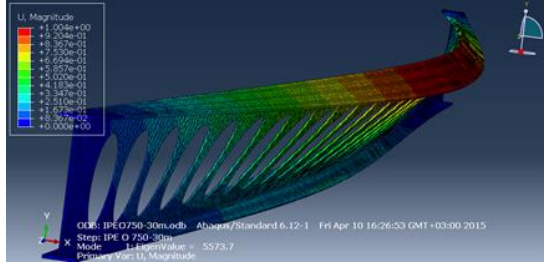


IPEO750-15m

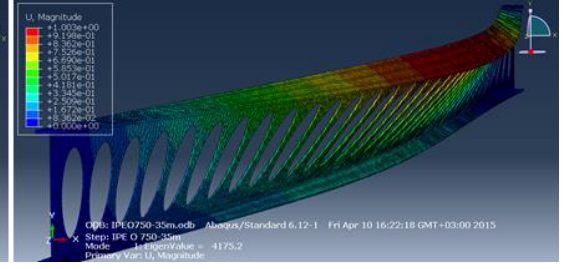
IPEO750-20m

Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri

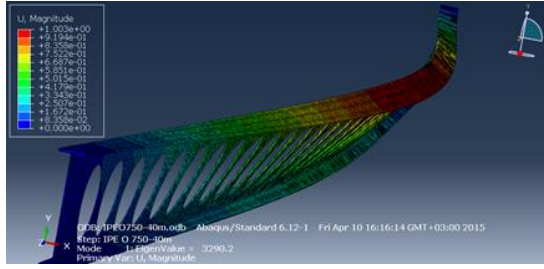




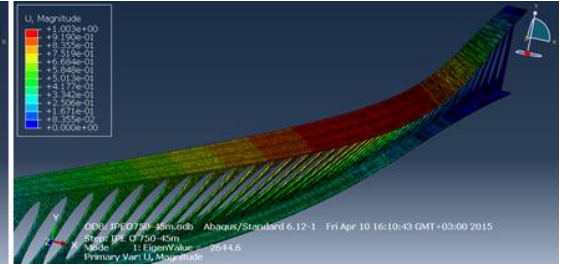
IPE0750-30m



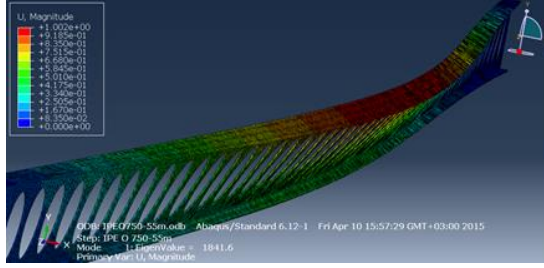
IPE0750-35m



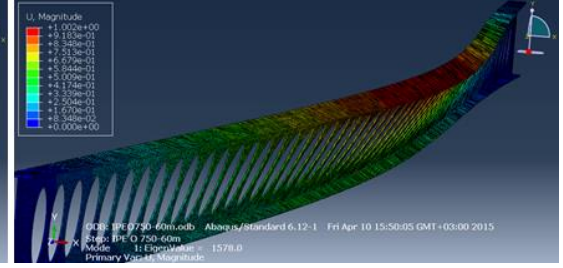
IPE0750-40m



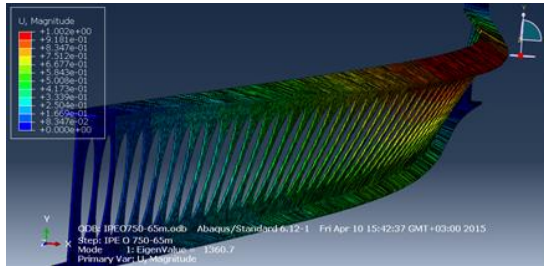
IPE0750-45m



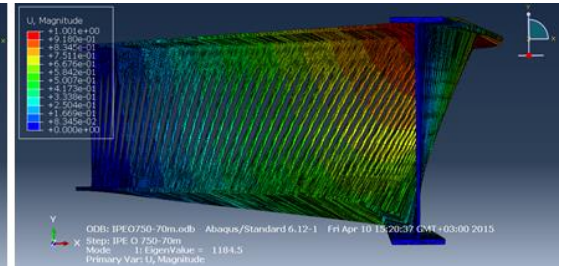
IPE0750-55m



IPE0750-60m

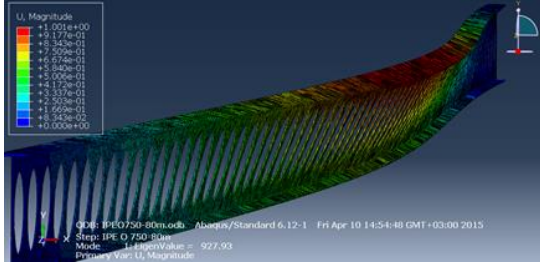


IPE0750-65m

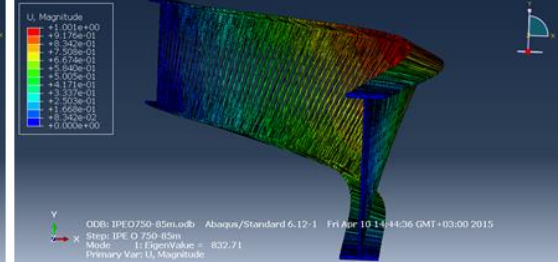


IPE0750-70m

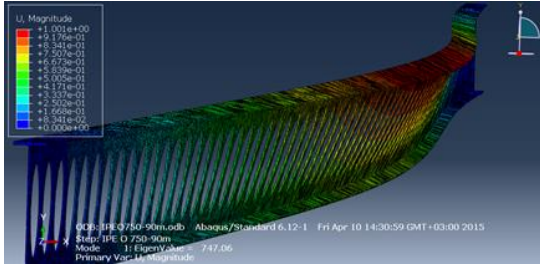
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri



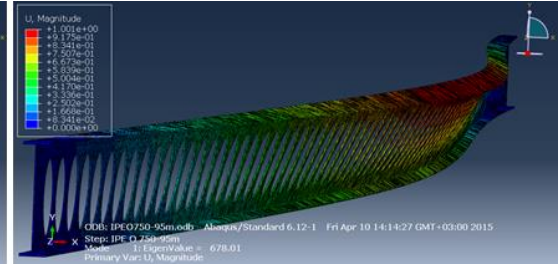
IPEO750-80m



IPEO750-85m



IPEO750-90m

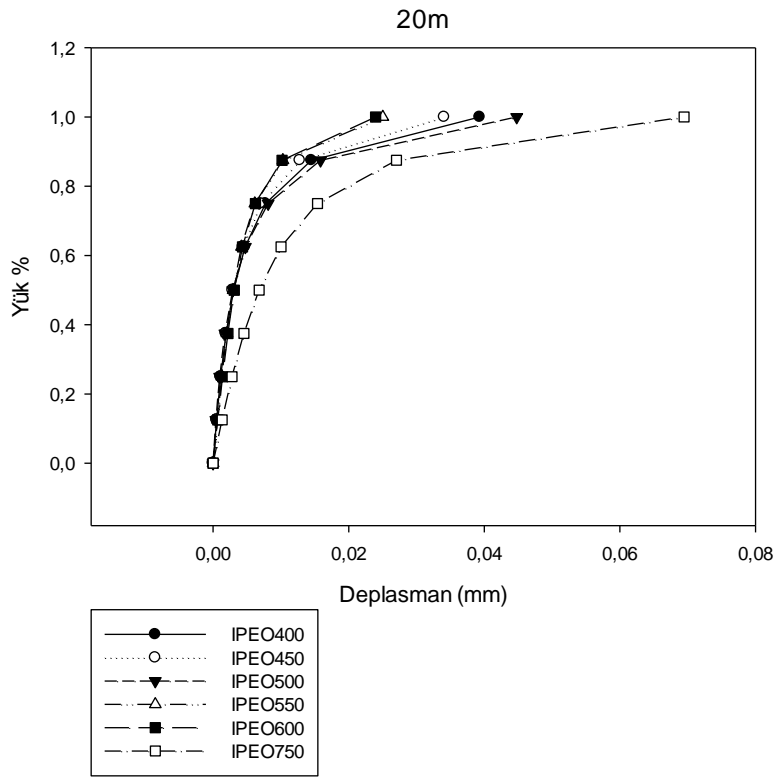
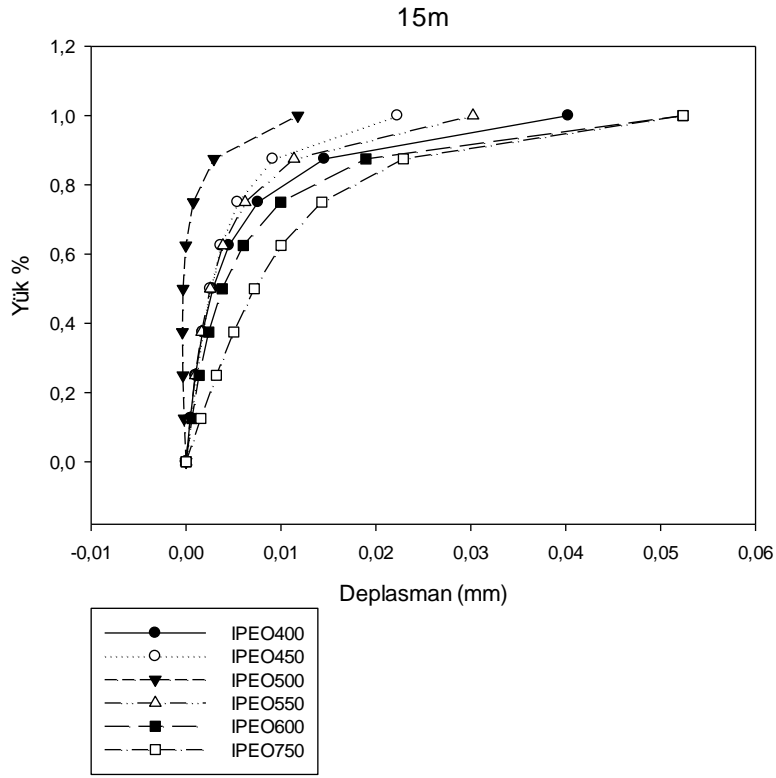


IPEO750-95m

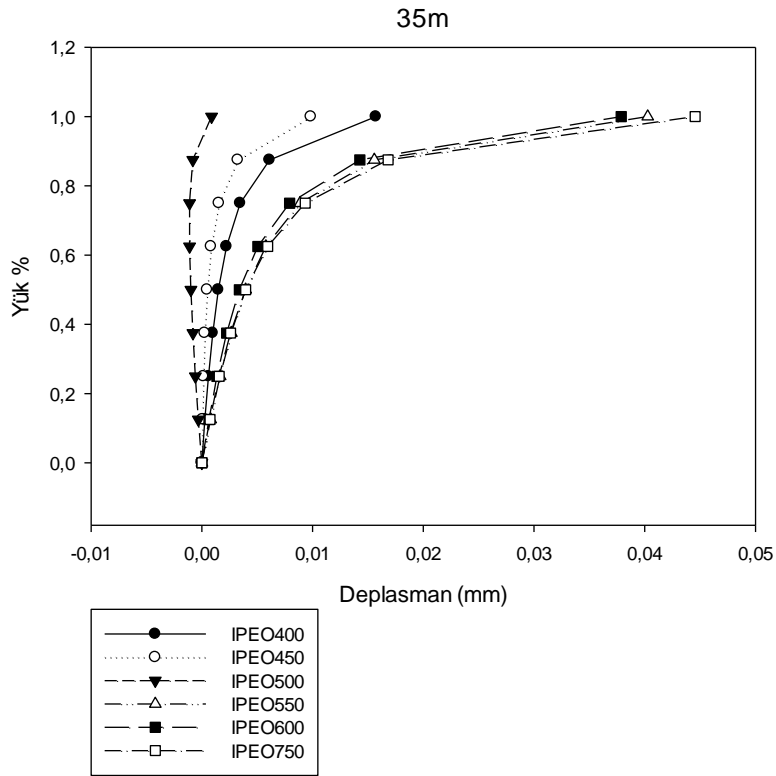
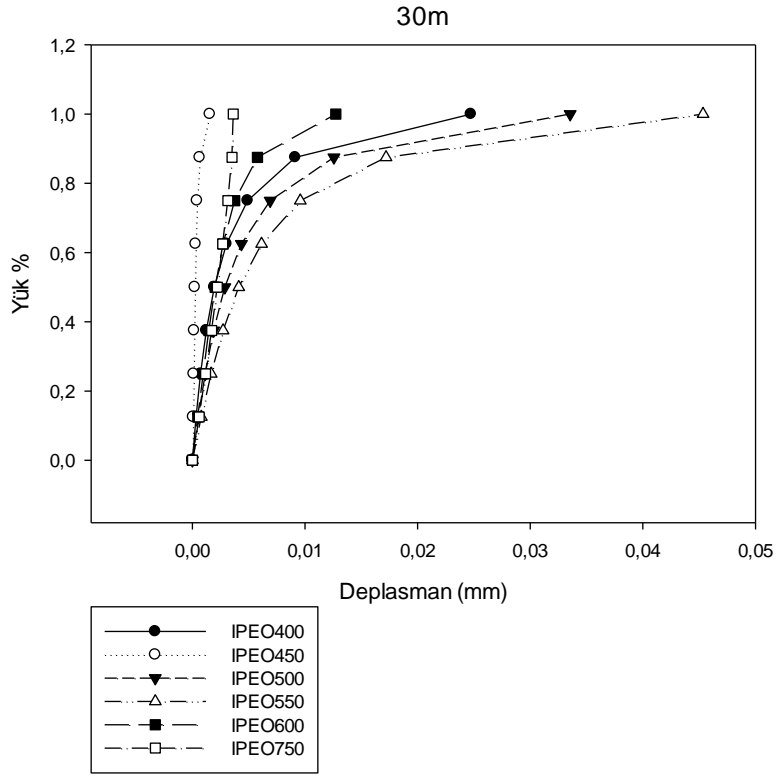
Şekil Ek 1.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin burkulma şekilleri



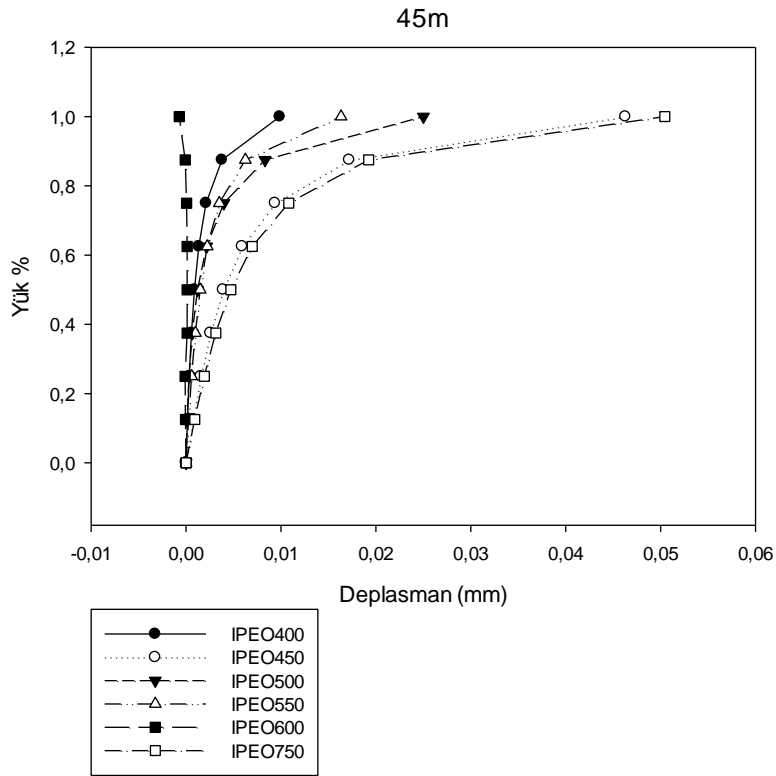
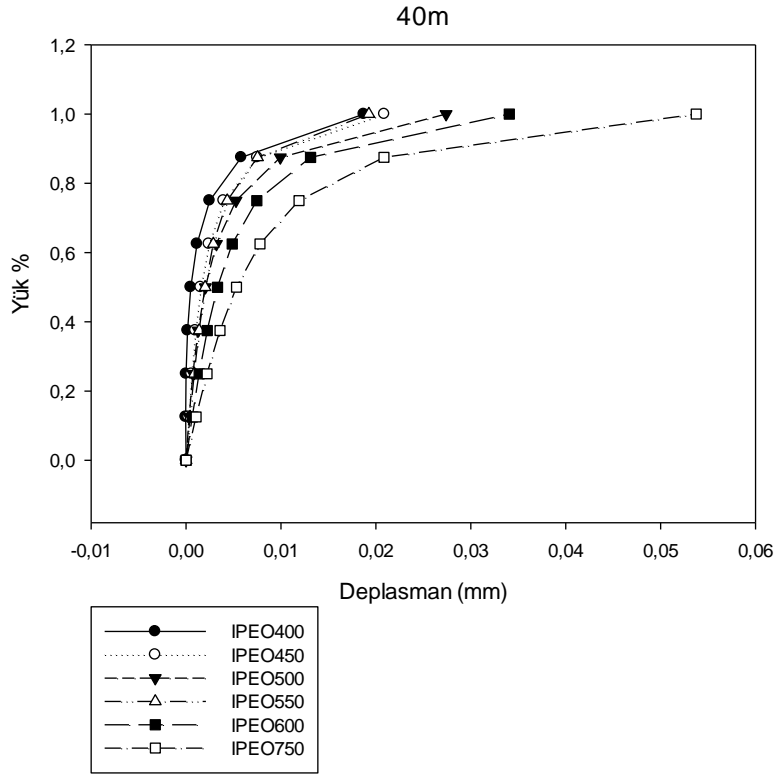
## EK 2 Yük - Yanal Deplasman Grafikleri



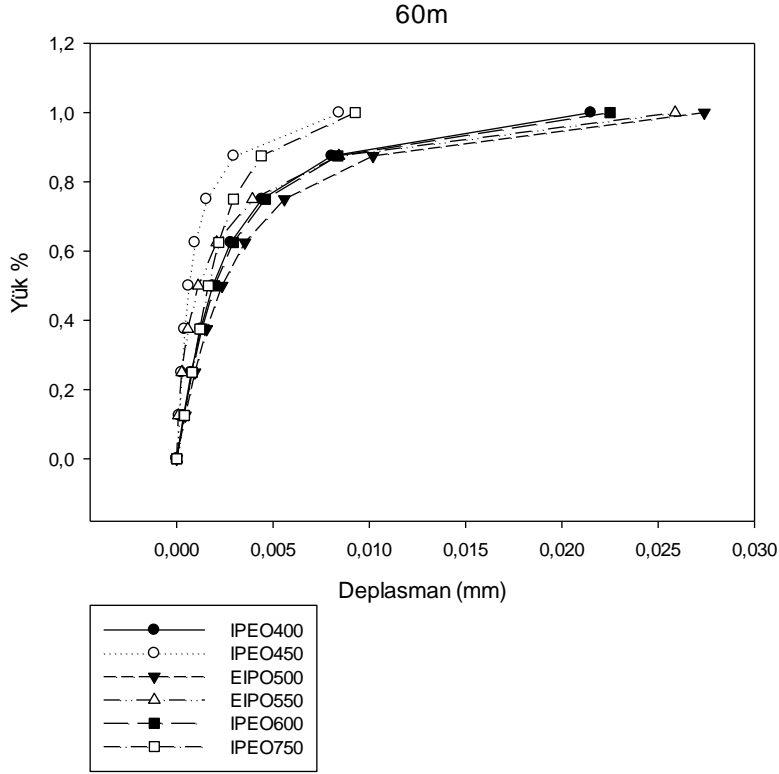
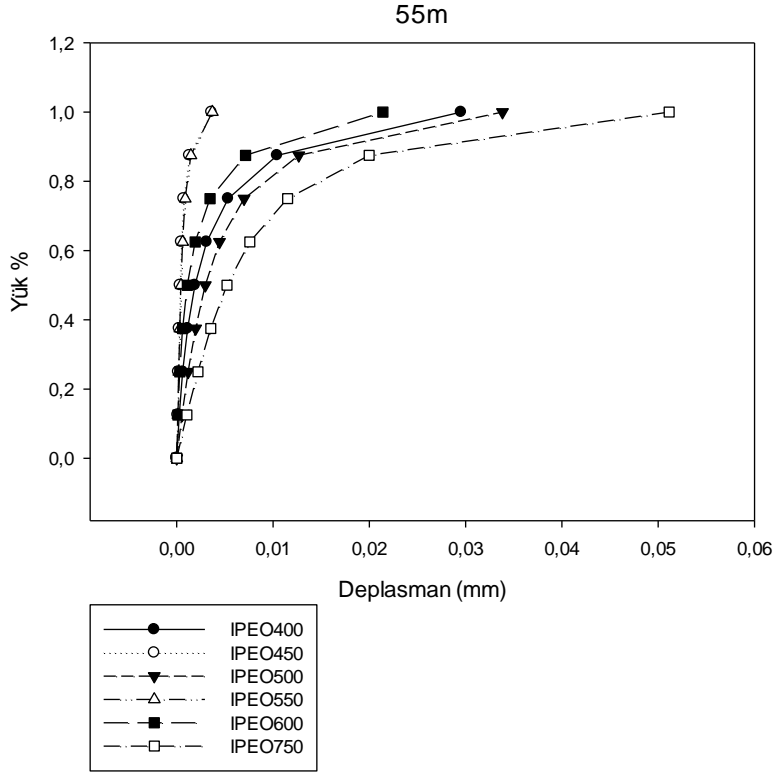
Şekil Ek 2.1. Analiz edilen diğer kirişlerin yük-yanal deplasman grafikleri



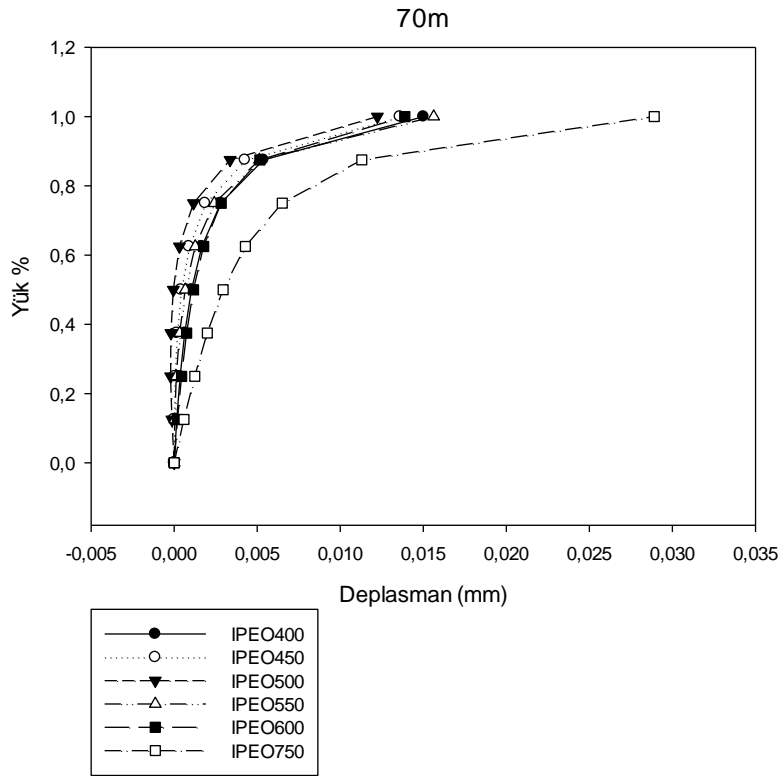
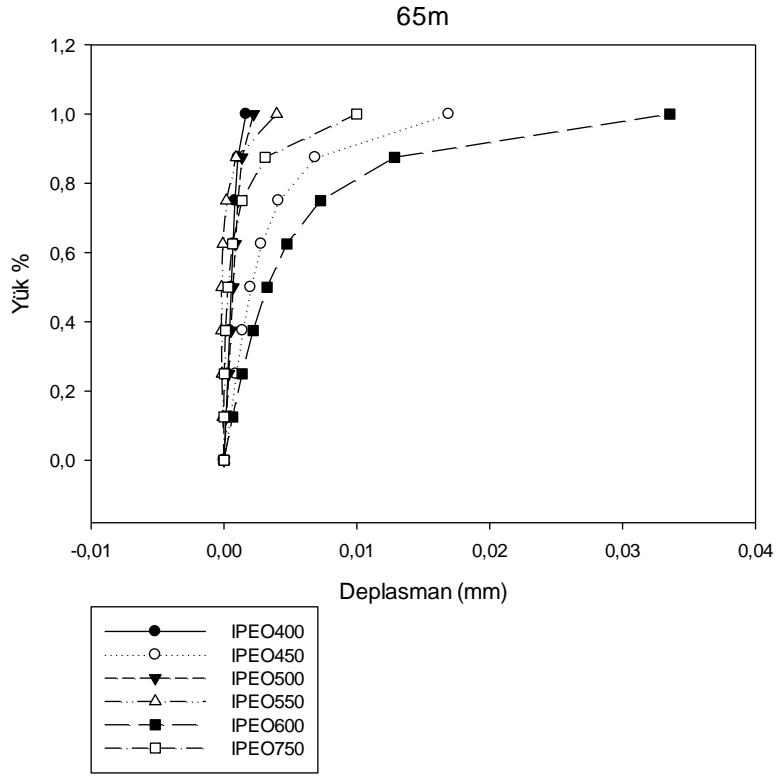
**Şekil Ek 2.1. (devam)** Analiz edilen diğer kirişlerin yük-yanal deplasman grafikleri



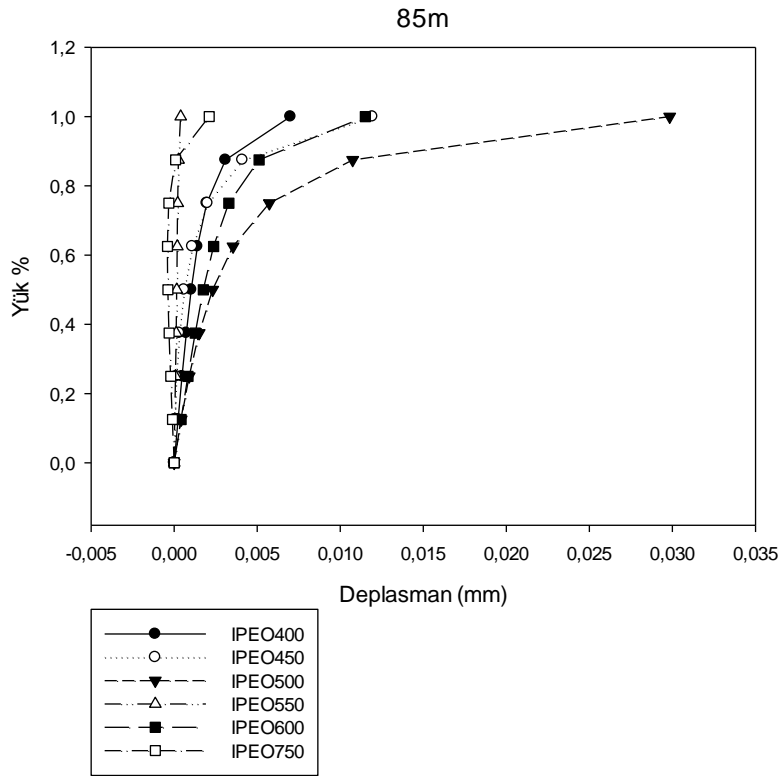
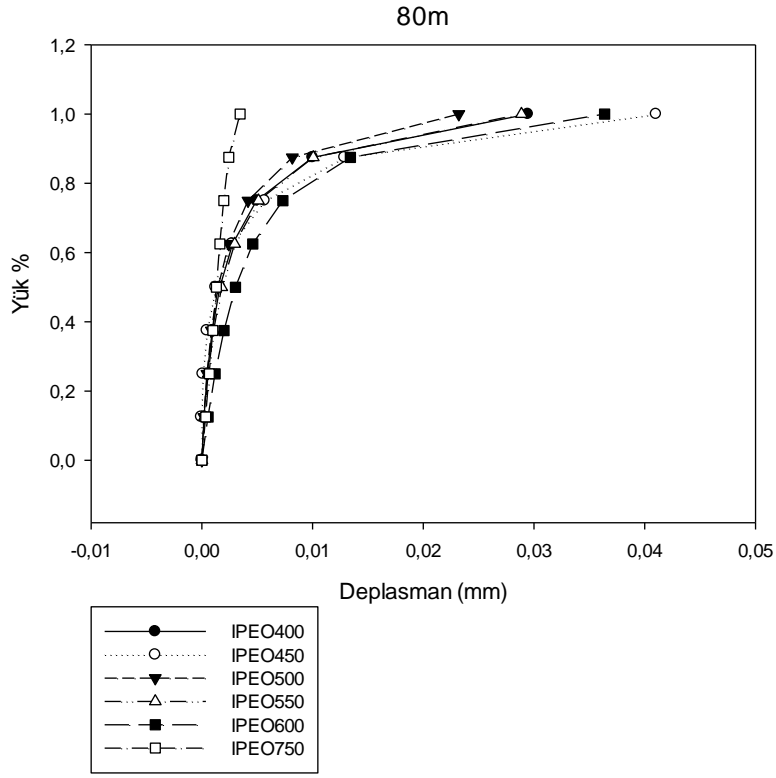
Şekil Ek 2.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin yük-yanal deplasman grafikleri



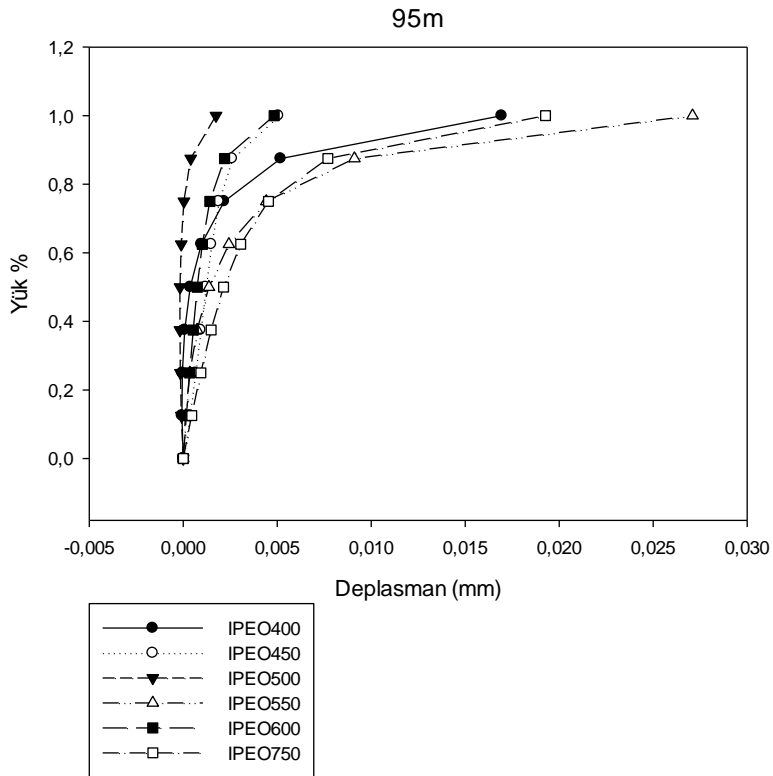
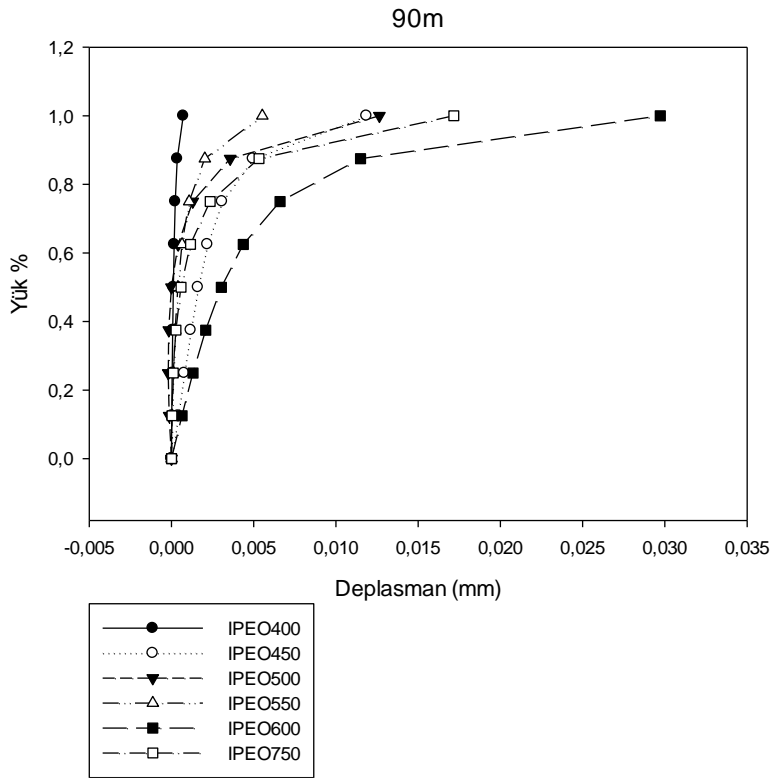
**Şekil Ek 2.1. (devam)** Analiz edilen diğer kirişlerin yük-yanal deplasman grafikleri



Şekil Ek 2.1. (devam) Analiz edilen diğer kirişlerin yük-yanal deplasman grafikleri



**Şekil Ek 2.1. (devam)** Analiz edilen diğer kirişlerin yük-yanal deplasman grafikleri



**Şekil Ek 2.1. (devam)** Analiz edilen diğer kirişlerin yük-yanal deplasman grafikleri