

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**GÖVDE BOŞLUK GEOMETRİSİNİN PETEK
KİRİŞLERİN STATİK VE SERBEST TİTREŞİM
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

NIHAD ABDULZAHRA MEZHER MEZHER

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2023

TEZ TANITIM FORMU

- Yazar Adı Soyadı** : NIHAD ABDULZAHRA MEZHER MEZHER
- Tezin Dili** : Türkçe
- Tezin Adı** : Gövde Boşluk Geometrisinin Petek Kirişlerin Statik ve Serbest Titreşim Davranışına Etkisinin incelenmesi.
- Enstitü** : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
- Anabilim Dalı** : İnşaat Mühendisliği
- Tezin Türü** : Yüksek Lisans
- Tezin Tarihi** : 26.04.2023
- Sayfa Sayısı** : 137
- Tez Danışmanları** : Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI
Dr. Öğr. Üyesi Duygu ERTÜRKMEN
- Dizin Terimleri** : Petek kirişler, yer değiştirme, sonlu elemanlar yöntemi, serbest titreşim analizi, maksimum kayma gerilmesi, von Mises gerilmesi
- Türkçe Özet** : Bu tezde, doğru eksenli çelik petek kirişlerin statik ve serbest titreşim davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak incelenmiştir. Analizlerde IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri kullanılmış ve dairesel, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere 4 adet farklı boşluk tipi için çözümler elde edilmiştir. Farklı boşluk geometrisinin ve sınır koşullarının kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.
- Dağıtım Listesi** : 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası

Nihad MEZHER

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

GÖVDE BOŞLUK GEOMETRİSİNİN PETEK
KİRİŞLERİN STATİK VE SERBEST TİTREŞİM
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

NIHAD ABDULZAHRA MEZHER MEZHER

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2023

BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Nihad MEZHER

.../.../2023



T.C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Nihad Abdulzahra Mezher MEZHER' in “Gövde Boşluk Geometrisinin Petek Kirişlerin Statik ve Serbest Titreşim Davranışına Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı İnşaat Mühendisliği Bilim Dalı YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Aylın Ece KAYABEKİR

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

(Danışman)

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Burak TOYDEMİR

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

.... / / 2023

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Son yıllarda, petek kirişler, hafif olmaları, ucuz olmaları, yüksek mukavemete sahip olmaları ve uygulamada kolay bir şekilde monte edilebilmeleri gibi avantajlarından dolayı inşaat mühendisliği, uçak mühendisliği, makine mühendisliği vb mühendislik alanlarındaki kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Bu avantajlarından dolayı petek kirişlerin statik ve dinamik analizlerinin araştırılması önem arz etmektedir. Bu tezde, doğru eksenli çelik petek kirişlerin statik ve serbest titreşim davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak incelenmiştir. Analizlerde IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri kullanılmış ve dairesel, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere 4 adet farklı boşluk tipi için çözümler elde edilmiştir. Farklı sınır koşullarının (Ankastre-Ankastre ,Ankastre-Sabit, Ankastre -Serbest) kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerde düzensiz geometrilerin modellenmesi için oldukça uygun olan tetrahedral elemanı kullanılmıştır. Malzemenin izotropik homojen olduğu kabul edilmiştir. Statik ve serbest titreşim analizleri için toplam 240 adet model kurularak sonlu eleman ağı ise program tarafından otomatik olarak oluşturulmuştur. Öncelikle boşluk tipinin petek kirişlerin statik davranışı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir bu amaç ile her model için toplam yer değiştirme değerleri, asal gerilmeler, en büyük kayma gerilmesi değerleri ve Von-mises gerilmeleri elde edilmiştir. Daha sonra gövde boşluk geometrisinin serbest titreşim tepkisine etkisi araştırılmıştır. Kurulan her model için ilk on moda ait serbest titreşim frekansları hesaplanmıştır. Elde edilen modlar için genlik değerleri ve mod şekilleri de elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre boşluk geometrisi, mesnet koşulları ve kullanılan profil tipi petek kirişlerin deplasmanları ve gerilme değerlerini etkilediği görülmüştür. Benzer şekilde petek kirişlerin bu geometrik özellikleri ve mesnet koşulları serbest titreşim frekanslarını ve genlik değerlerini de etkilemektedir.

Anahtar kelimeler: Petek kirişler, yer değiştirme, sonlu elemanlar yöntemi, serbest titreşim analizi , maksimum kayma gerilmesi ,von Mises gerilmesi

SUMMARY

In recent years, the usage of castellated beams in civil engineering, aeronautical engineering, mechanical engineering, and other engineering fields has increased significantly due to their advantages such as being light, inexpensive, high strength, and easy to assemble in practice. Due to these advantages, it is essential to investigate the static and dynamic analyzes of steel castellated beams. In this thesis, the static and free vibration behavior of straight axis castellated steel beams was investigated theoretically by using the three-dimensional finite element method. IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240 and IPE300 profiles were used in the analyzes and solutions were obtained for 4 different web opening types as circular, square, pentagonal and hexagonal. The effects of boundary conditions (Fixed - Fixed, Fixed - Pinned, Fixed -Free) on the bending and free vibration behavior of beams are also investigated. A tetrahedral element, which is very suitable for modeling irregular geometries, is used in analysis with the finite element method. The material was assumed to be isotropic homogeneous. A total of 240 models were built for static and free vibration analysis, and the mesh was created automatically by the program. First of all, the effects of the web opening type on the static behavior of castellated beams are examined in detail, for this purpose, total displacement values, principal stresses, maximum shear stress values, and Von-mises stresses are obtained for each model. Then, the effect of the web opening geometry on the free vibration response is investigated. Free vibration frequencies of the first ten modes are calculated for each model installed. Amplitude values and mode shapes were also obtained for the considered modes. Based on the obtained results, it has been seen that the web opening geometry, support conditions, and the profile type used affect the displacements and stress values of the castellated beams. Similarly, these geometric properties and support conditions of castellated beams also affect free vibration frequencies and amplitude values.

Keywords: castellated beams, displacement, finite element method, free vibration, maximum shear stress ,von Mises stress

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
SUMMARY	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLolar LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	xiii
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Petek Kirişlerin Terminolojisi	5
1.2. Petek Kirişlerin Geometrik Özellikleri.....	5
1.3. Petek Kirişlerinde Oluşan Kırılma Ve Göçme Modları	6
1.3.1. Eğilme Kırılması	6
1.3.2. Vierendeel Mekanizması	6
1.3.3. Gövdede Oluşan Yanal Burkulma Göçmesi.....	7
1.3.4. Kesme Kuvvetinden Kaynaklı Gövde Burkulması	7
1.3.5. Yanal Burulmalı Burkulma	8
1.3.6. Gövdede Bulunan Kaynak Birleşimin Kopması	8
1.4. Petek Kirişlerin Avantajları ve Uygulamaları	9
1.5. Tezin Amacı.....	10
1.6. Petek Kirişlerin Tarihçesi	10
1.7. Önceki Çalışmalar	11

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

2.1. Giriş	28
2.2. Kesit ve Boşluk Geometrisi	28
2.3. Malzeme Özellikleri	29
2.4. Geometrik Özellikler	29
2.5. Yükler	31
2.6. Mesnet Koşulları.....	31
2.7. Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması	32
2.8. Modelin Kurulması.....	33

2.8.1. Statik Analiz	33
2.8.2 Serbest Titreşim Analizi	38

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Statik Analiz	39
3.1.1. Petek Kirişlerin Yer Değiştirme Sonuçları	39
3.1.2. Gerilme Analizi	45
3.1.2.1. von-Mises gerilemeleri	45
3.1.2.2. Maksimum kayma gerilimi	51
3.2. Serbest Titreşim Analizi	66
3.2.1. Serbest Titreşim Frekansları	66
3.2.1.1. Profil IPE120	66
3.2.1.2. Profil IPE140	69
3.2.1.3. Profil IPE160	71
3.2.1.4. Profil IPE180	74
3.2.1.5. Profil IPE200	77
3.2.1.6. Profil IPE220	79
3.2.1.7. Profil IPE240	82
3.2.1.8. Profil IPE300	85
SONUÇLAR	112
KAYNAKLAR	114

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. Malzeme özellikleri.....	29
Tablo 2. Gövde boşluklarının geometrik özellikleri	30
Tablo 3. Kirişin geometrik ölçüleri	30
Tablo 4. Sınır koşulları	31
Tablo 5. Sonlu eleman ağı ile ilgili detaylar	32
Tablo 6. Petek kirişleri için elde edilen en büyük düşey yer değiştirme değerleri (m)	40
Tablo 7. En büyük von Mises gerilme değerleri (Pa).....	45
Tablo 8. Petek kirişleri için elde edilen en büyük kayma gerilmesi değerleri(pa)...	51
Tablo 9. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE120 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	67
Tablo 10. Ankastre – Sabit mesnetli IPE120 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	68
Tablo 11. Ankastre – serbest mesnetli IPE120 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	68
Tablo 12. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE140 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	69
Tablo 13. Ankastre – Sabit mesnetli IPE140 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	70
Tablo 14. Ankastre – serbest mesnetli IPE140 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	71
Tablo 15. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE160 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	72
Tablo 16. Ankastre – Sabit mesnetli IPE160 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	73

Tablo 17. Ankastre – serbest mesnetli IPE160 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	73
Tablo 18. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE180 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	74
Tablo 19. Ankastre – Sabit mesnetli IPE180 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	75
Tablo 20. Ankastre – serbest mesnetli IPE180 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	76
Tablo 21. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE200 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	77
Tablo 22. Ankastre – Sabit mesnetli IPE200 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	78
Tablo 23. Ankastre – serbest mesnetli IPE200 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	79
Tablo 24. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE220 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	80
Tablo 25. Ankastre – Sabit mesnetli IPE220 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	80
Tablo 26. Ankastre – serbest mesnetli IPE220 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	81
Tablo 27. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE240 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	82
Tablo 28. Ankastre – Sabit mesnetli IPE240 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	83
Tablo 29. Ankastre – serbest mesnetli IPE240 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	84
Tablo 30. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE300 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz).....	85

Tablo 31. Ankastre – Sabit mesnetli IPE300 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)..... 86

Tablo 32. Ankastre – serbest mesnetli IPE300 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)..... 87



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Petek kirişlerin kullanıldığı bir restoran (İstanbul).....	2
Şekil 2. Petek kirişlerinin kullanıldığı bazı bina örnekleri	2
Şekil 3. Petek kirişi	5
Şekil 4. Vierendeel mekanizması.....	7
Şekil 5. Gövdede oluşan burkulma.	7
Şekil 6. Yanal burkulmanın sayısal olarak modellenmesi.....	8
Şekil 7. Yanal burulmalı burkulma.....	8
Şekil 8. Sinüzoidal boşluklu petek kiriş numunesi	18
Şekil 9. Sekizgen ve altıgen boşluklu petek kirişi	19
Şekil 10. Yanal Burkulmalı Burulma	20
Şekil 11. Yanal destekli petek kiriş.....	21
Şekil 12. Petek kiriş deneyi	22
Şekil 13. Petek kirişlerin deney düzeneği	22
Şekil 14. Petek kirişlerin yapım şekli	24
Şekil 15. Oval boşluklu petek kiriş örneği.....	25
Şekil 16. Kirişin geometrisi	28
Şekil 17. Gövdede açılan boşlukların geometrisi	29
Şekil 18. Petek kirişine uygulanan yük.....	31
Şekil 19. Üç boyutlu SOLID187.....	32
Şekil 20. ANSYS 2022 R1 programının ara yüzü	34
Şekil 21. Malzeme özelliklerin girilmesi için ANSYS 2022 R1 programının ara yüzü	35
Şekil 22. Malzeme özelliklerin girilmesi	35
Şekil 23. Geometrik modelinin oluşturulması	36

Şekil 24. Sonlu eleman ağının oluşturulması.....	36
Şekil 25. Mesnet koşullarının girilmesi	37
Şekil 26. Dış yüklerinin girilmesi	37
Şekil 27. Sonuçların elde edilmesi.....	38
Şekil 28. Ankastre – Ankastre mesnet durumu için profil tipine bağlı deplasman eğrileri.....	42
Şekil 29. Ankastre - Sabit mesnet durumu için profil tipine bağlı deplasman eğrileri	43
Şekil 30. Ankastre – Serbest mesnet durumu için profil tipine bağlı deplasman eğrileri.....	44
Şekil 31. Ankastre - Ankastre mesnet durumu için elde edilen en büyük von Mises gerilme grafikleri	48
Şekil 32. Ankastre - Sabit mesnet durumu için elde edilen en büyük von Mises gerilme grafikleri	49
Şekil 33. Ankastre - Serbest mesnet durumu için elde edilen en büyük von Mises gerilme grafikleri	50
Şekil 34. Ankastre - Ankastre mesnet durumu için elde edilen en büyük maksimum kayma gerilmesi grafikleri	54
Şekil 35. Ankastre - Sabit mesnet durumu için elde edilen en büyük maksimum kayma gerilmesi grafikleri	55
Şekil 36. Ankastre - Serbest mesnet durumu için elde edilen en büyük maksimum kayma gerilmesi grafikleri	56
Şekil 37. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 120 - petek kirişi için toplam yer değiştirme değerleri	57
Şekil 38. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 180 - petek kirişi için toplam yer değiştirme değerleri	58
Şekil 39. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 240 - petek kirişi için toplam yer değiştirme değerleri	59

Şekil 40. Ankastre – sabit mesnetli IPE 120 - petek kirişi için von Mises gerilme dağılımları.....	60
Şekil 41. Ankastre – sabit mesnetli IPE 180 - petek kirişi için von Mises gerilme dağılımları.....	61
Şekil 42. Ankastre – sabit mesnetli IPE 240 - petek kirişi için von Mises gerilme dağılımları.....	62
Şekil 43. Ankastre – serbest mesnetli IPE 120 - petek kirişi için maksimum kayma gerilmesi dağılımları.....	63
Şekil 44. Ankastre – serbest mesnetli IPE 180 - petek kirişi için maksimum kayma gerilmesi dağılımları.....	64
Şekil 45. Ankastre – serbest mesnetli IPE 240 - petek kirişi için maksimum kayma gerilmesi dağılımları.....	65
Şekil 46. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 120 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	88
Şekil 47. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 120 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	88
Şekil 48. Ankastre – serbest mesnetli IPE 120 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	89
Şekil 49. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 140 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	89
Şekil 50. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 140 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	90
Şekil 51. Ankastre – serbest mesnetli IPE 140 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	90
Şekil 52. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 160 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	91
Şekil 53. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 160 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	91

Şekil 54. Ankastre – serbest mesnetli IPE 160 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	92
Şekil 55. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 180 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	92
Şekil 56. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 180 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	93
Şekil 57. Ankastre – serbest mesnetli IPE 180 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	93
Şekil 58. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 200 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	94
Şekil 59. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 200 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	94
Şekil 60. Ankastre – serbest mesnetli IPE 200 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	95
Şekil 61. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 220 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	95
Şekil 62. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 220 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	96
Şekil 63. Ankastre – serbest mesnetli IPE 220 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	96
Şekil 64. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 240 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	97
Şekil 65. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 240 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	97
Şekil 66. Ankastre – serbest mesnetli IPE 240 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	98
Şekil 67. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 300 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	98

Şekil 68. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 300 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	99
Şekil 69. Ankastre – serbest mesnetli IPE300 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması.....	99
Şekil 70. Ankastre – ankastre mesnetli IPE120 - petek kiriş, model II için elde edilen ilk altı mod şekli.....	100
Şekil 71. Ankastre – ankastre mesnetli IPE140 - petek kiriş, model I için elde edilen ilk altı mod şekli.....	101
Şekil 72. Ankastre – ankastre mesnetli IPE160 - petek kiriş, model III için elde edilen ilk altı mod şekli.....	102
Şekil 73. Ankastre – ankastre mesnetli IPE180 - petek kiriş, model IV için elde edilen ilk altı mod şekli.....	103
Şekil 74. Ankastre – sabit mesnetli IPE200 - petek kiriş, model II için elde edilen ilk altı mod şekli.....	104
Şekil 75. Ankastre – sabit mesnetli IPE220 - petek kiriş, model I için elde edilen ilk altı mod şekli.....	105
Şekil 76. Ankastre – sabit mesnetli IPE240 - petek kiriş, model III için elde edilen ilk altı mod şekli.....	106
Şekil 77. Ankastre – sabit mesnetli IPE300 - petek kiriş, model IV için elde edilen ilk altı mod şekli.....	107
Şekil 78. Ankastre – serbest mesnetli IPE200 - petek kiriş, model I için elde edilen ilk altı mod şekli.....	108
Şekil 79. Ankastre – serbest mesnetli IPE300 - petek kiriş, model II için elde edilen ilk altı mod şekli.....	109
Şekil 80. Ankastre – serbest mesnetli IPE160 - petek kiriş, model III için elde edilen ilk altı mod şekli.....	110
Şekil 81. Ankastre – serbest mesnetli IPE160 - petek kiriş, model IV için elde edilen ilk altı mod şekli.....	111

ÖNSÖZ

"Rahman ve Rahim olan Allah'ın adıyla"

Öncelikle, bu araştırmayı tamamlamam için bana sağlık ve güç veren Allah'a şükürler olsun.

Yüksek lisans tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad Noori'ye tezimi gözden geçirdiği ve bu çalışma boyunca tavsiyeleri, rehberliği ve teşviki için teşekkür ederim.. Bu tez çalışması boyunca değerli tavsiyeleri ve yapıcı önerileri için minnettarım.

Kendisine asla ödenemeyecek bir minnet ve şükran borcum olan anneme de teşekkür etmek isterim. Ona olan minnettarlığımı ve gururumu ifade etmekte kelimeler yetersiz kalıyor.

Hayallerimi gerçekleştirmemde bana yardımcı olan eşime teşekkür etmek istiyorum. Ona, aileme ve arkadaşlarıma destekleri, yardımları ve cesaretlendirmeleri için minnettarım.

Bu bursu bana sağlayan Irak Burslar ve Kültürel İlişkiler Departmanına özel teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, inşaat mühendisliği bölümüne ve tüm İstanbul Gelişim üniversitesinin tüm personeline araştırmam boyunca destekleyici ve düşünceli oldukları ve akademik çalışmalarda rehberlik ettikleri için şükranlarımı sunmaktan mutluluk duyuyorum.

GİRİŞ

Petek kirişler, hafif olmaları, ucuz olmaları, yüksek mukavemete sahip olmaları ve uygulamada kolay bir şekilde monte edilebilmeleri gibi avantajlarından dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu avantajlarından dolayı petek kirişlerin mukavemet analizleri ve yapım maliyeti açısından birçok araştırmacı tarafından araştırılmaktadır. Örneğin, petek kirişlerin Vierendeel çökme mekanizması, gövde burkulması, eğilme kırılması, yanal burulmalı burkulması, kesme kırılması gibi farklı kırılma türleri çift gövde kullanılarak minimize edilebilir (Sawai ve Waghmare, 2018). Petek kirişlerin, dolu gövdeli kirişlere kıyasla mühendislik yapılarındaki kullanımını son yıllarda önem kazanmıştır. Petek kirişlerin uygulama alanındaki önemini artırılmasını etkileyen en önemli sebepler, yapının toplam ağırlığını azaltması, servis sırasında yapının genişletilmesine imkan vermesi, kullanılan çelik metrajının azalması ve böylelikle yapının toplam maliyetinin düşmesi olarak sayılabilir. İnşaat uygulamalarında izin verilen maksimum yer değiştirmelerdeki sınırlamalar nedeniyle, yapısal çeliğin yüksek mukavemetinden en iyi şekilde yararlanılması mümkün olmamaktadır. Petek kirişler sıcak haddelenmiş çelik profillerden üretilmektedir (Ahyyar ve Setiyawan, 2020).

Petek kirişlerin gövdeleri yüksek olduğundan bu yapı elemanlarının eğilmeye karşı performansı yüksek olup ekonomik tasarım yapılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca bu yapı elemanlarının en önemli faydalarından biri ise Şekil 1 - 2'de görüldüğü gibi kiriş boşluklarının sıhhi tesisat ve elektrik tesisatı için de kullanabilmesidir. Petek kirişlerinde ince gövde genişliği, ince başlık kalınlığı gibi nedenlerden dolayı meydana gelen kesme kırılması, eğilme kırılması, yanal burulmalı burkulması ve eksik veya yanlış kaynaklı birleşimlerde oluşan kopmalar gibi göçme sebeplerini önlemek amacıyla kirişin gövdesine yanal destekler konulabilir (Hosseinpour ve Sharifi, 2021).



Şekil 1. Petek kirişlerin kullanıldığı bir restoran (İstanbul)



Şekil 2. Petek kirişlerinin kullanıldığı bazı bina örnekleri (Fares ve ark., 2016)

Petek kirişler, haddelenmiş bir kirişin ekseni boyunca alevle zig-zaglı olarak kesilmesi ve daha sonra iki parçanın kaydırılıp kaynakla yeniden birleştirilmesiyle elde edilen ve toplam kiriş yüksekliğinin yaklaşık olarak %50 arttırılarak eğilmeye karşı yapısal performansı artırılan yapı elemanlarıdır (Zirakian ve Showkati, 2006). Petek kirişlerin gövde boşluklarının içine klima, elektrik kanalı ve yangın söndürücüler gibi tesisatlar da yerleştirebilmektedir. Petek kirişlerin gövdesindeki açılan delik çeşitli geometrik şekiller kullanılarak yapılabilir örneğin altıgen, arı peteği, sekizgen, baklava vb. (Yustisia ve ark., 2020). 1930'larda petek kirişler,

Pilsner'deki Skoda fabrikalarında üretilerek ilk olarak Birleşik Krallık'ta ticareti yapılmıştır (De'Nan ve ark., 2017). Benzer bir gelişme ise, 1930'un ortalarında Arjantin'de mühendis olarak çalışan Geoffrey Murray Boyd tarafından petek kirişlerin kullanılması olmuştur (Wakchaure ve Sagade, 2012b). 1960'ların başında ise Amerika Birleşik Devletlerinde Kanada'da petek kirişlerin gövde boşluk şekilleri (kare, dikdörtgen , dairesel vb.) üzerinde çalışmalar yapılmıştır (De'Nan ve ark., 2017). Petek boşluk kiriş normal I kirişinin zigzag olarak kesilmesi daha sonra da kaynak edilmesi ile oluşturulmuştur. Petek kirişler üzerine araştırmalar 1980'lerden beri hem deneysel hem de sonlu eleman sayısal yöntemleri kullanılarak yürütülmektedir (Gu, 2014).

Petek kirişlerin davranışını incelemek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır (Dervinis ve Kvedaras, 2008). Analitik yöntemeye dayalı çözümler, çeşitli yüklemeler için petek kirişlerin analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Petek kirişlerin problemini her zaman analitik olarak çözmek mümkün olmamaktadır. Bu tür yapı elemanlarının gerek analitik olarak gerekse de sonlu elemanlar ile analiz edilmesi uzun süreye ihtiyaç duymaktadır (Conference ve Trends, 2013).

Petek kirişlerin gövde boşlukları genelde altıgen, kare ve dairesel biçimlerinde yapılmaktadır. Gövdesinde dairesel boşluk tipi bulunan petek kirişler yuvarlak açılımlı petek kirişler olarak da isimlendirilir (Jamadar ve Kumbhar, 2015). Zig-zag şeklinde kesilen I profillerinden altıgen petek kirişler yapıldığında kiriş yüksekliği %50 arttırılırken kirişin eğilme performansında ise %40lık bir artış meydana gelir (De'Nan ve ark., 2017). Yapı mühendisi için iyi tasarım, sadece yapının güvenli ve ekonomik olması koşullarını sağlanması değil, aynı zamanda yapının kullanma işlevini de göz önünde bulundurmasıdır (El-Dehemy, 2017).

Petek kirişlerin teorisi, profil gövdesinde boşluklar oluşturarak kesitin yüksekliğini ve atalet momentini artırmak ve kirişin ölü yükünü ise azaltmaktır. Petek kiriş üzerinde uygulanan modifikasyonlar, ise bu yapı elemanının göçme modları üzerinde etkilidir. Göçme modları Vierendeel çökme mekanizması, gövde burkulması, eğilme kırılması, yanal burulmalı burkulması, kesme kırılması olarak sayılabilir (Setiawan ve ark., 2018).

Titreşim analizi, dinamik yüklemelere maruz kalan yapıların tasarımı için oldukça önemlidir (C. Y. Wang ve Wang, 2013). I kesitli kirişlerin serbest titreşim

analizi iyi bilinmektedir ve birçok ders kitabında bulunabilir. Bununla birlikte, petek kirişlerin serbest titreşim analizinde sadece kirişlerin uzunlamasına eksenine boyunca kesit özelliklerinin değişmesinden değil, aynı zamanda gövdenin kayma gerilmesine karşı zayıflamasına da neden olan gövde boşluklarından kaynaklanan zorluklar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bu yapıların analizinde kayma deformasyon etkisinin de göz önüne bulundurulmalıdır(Chen ve ark., 2014). Petekli kirişler, çelik çerçevelerde yapı elemanı olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Geleneksel I-kesitli kirişlerle karşılaştırıldığında, petekli kirişler, ek malzemeler olmaksızın büyük bir bükülme sertliğine sahiptir. Bu özellik petek kirişlerin hafif veya orta derecede yüklemeye maruz kalan çatılarda ve uzun açıklıklı yapılarda kullanılmasını uygun hale getirir (Chen ve ark., 2014).



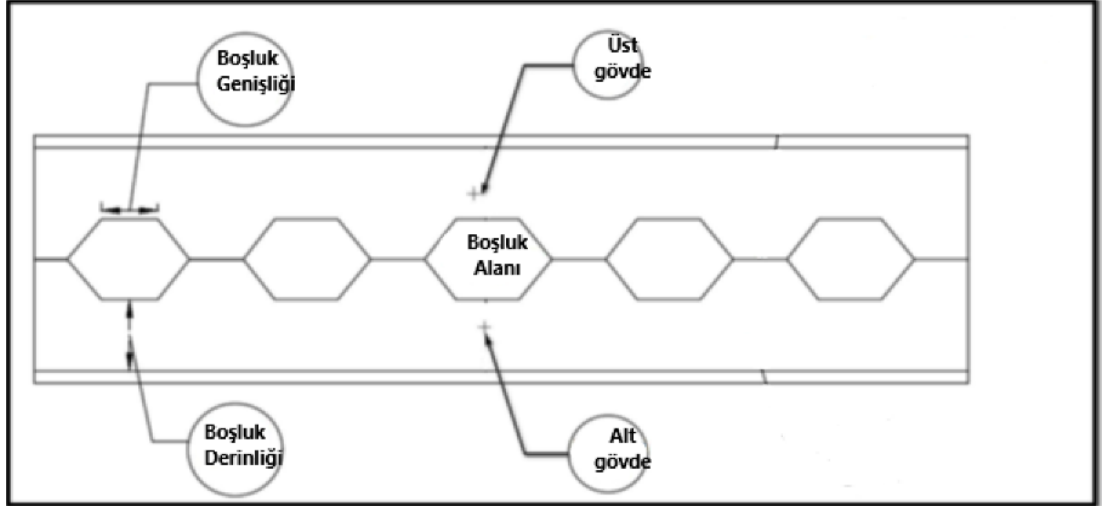
BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Petek Kirişlerin Terminolojisi

Petek kirişlerin tanımlanmasında ve gösterilmesinde kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

- Gövde: kesitin dolu olduğu kısım olup Şekil 3’te de gösterildiği gibi petek kirişin gövde boşlukları arasında sınırlanan alandır.
- Boşluk Derinliği: Gövdede açılan boşluğun kenarından profil başlığına kadar ölçülen mesafedir.
- Boşluk Genişliği: Gövdede açılan boşlukların kenar uzunluğudur.
- Boşluk Alanı: Gövde açılan tek bir boşluğun alanını göstermektedir.
- Üst gövde: Çubuk ekseninin üstünde kalan gövde bölümüdür.
- Alt gövde: Çubuk ekseninin altında kalan gövde bölümüdür (Shaikh ve Aher, 2015).



Şekil 3. Petek kiriş (Hadeed ve Hussain Alshimmeri, 2019)

1.2. Petek Kirişlerin Geometrik Özellikleri

Temel olarak petek kirişler gövdelerinde açılan boşluk tiplerine göre sınıflandırılmaktadır. Yapılan gözlemlere ve araştırmalara göre gövdede açılan

boşluk tipinin ve ölçüsünün kirişlerin yapısal performansını önemli ölçüde etki etmektedir. Her sınıftan petek kirişi gövdesinde boşluk açılarak yapılmaktadır. Gövde açılan geometrik şeklinin farklı olması kırılma ve göçme modlarını etkilemektedir. Örneğin eğer tek bir kirişte boşluk alanı değişken olarak yapılırsa, kirişin eğilme rijitliği düşecektir (Jamadar ve Kumbhar, 2015). Buradan da anlaşıldığı gibi petek kirişlerin gövdesinde açılan boşluk alanlarının eşit olması yapısal performans için önemlidir.

1.3. Petek Kirişlerinde Oluşan Kırılma Ve Göçme Modları

Genel olarak petek kirişlerinde kırılma ve göçme modları kiriş geometrisine, eğilme momenti ve kesme kuvveti oluşturan dış yüke, gövde açılan boşluk tipine, boşluk alanına, boşluk ölçülerine, yanal desteklerin olup olmamasına, gövdenin kalınlığına ve kirişin narinlik oranına bağlıdır. Tasarım ile ilgili hususlar ise yönetmeliklerdeki kısıtlamalara, aynı şekilde kaynak özelliklerine ve boşluk geometrisine bağlıdır. Yönetmeliklerdeki kısıtlamalar ve kaynak ölçüleri de petek kirişlerin kırılma ve göçme modlarını etkilemektedir. Bu tür yapı elemanlarının kırılma ve göçme modları çok önemli olup tasarım yaklaşımlarında dikkate alınması gerekmektedir. Bu yapı elemanlarını tasarlayanların ve/veya araştıranların kırılma ve göçme modları ve bu modlar ile ilgili diğer hususlar hakkında bilgi sahibi olmaları önemlidir (Hadeed ve Hussain Alshimmeri, 2019). Petek kirişlerinde oluşan kırılma ve göçme modları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

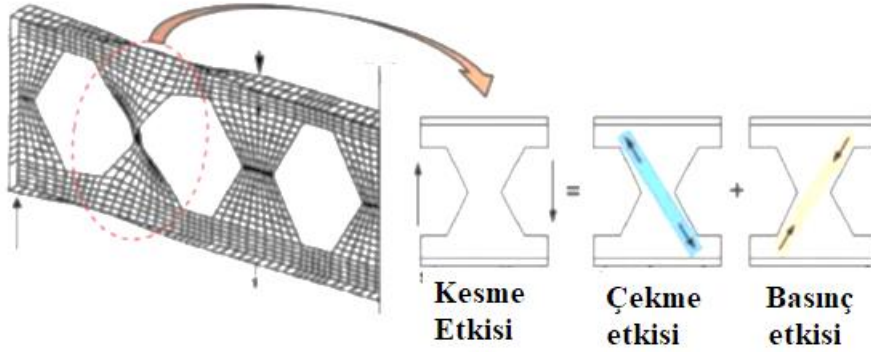
1.3.1. Eğilme Kırılması

Petek kirişlerin büyük basit eğilme momentlerinin etkisinde olduğu durumlarında meydana gelen kırılma türüdür. Petek kirişlerin yanal destekleme durumuna göre bu kırılma modu değişmektedir.

1.3.2. Vierendeel Mekanizması

Bu göçme modu petek kirişlerin açıklık bölgesinde bulunan büyük kesme kuvvetlerinden dolayı meydana gelmektedir. Şekil.4'te gövde boşluk kenarlarında oluşan plastik mafsallaşmaları göstermekte olup deformasyondan sonra boşluk paralel kenar şekline almaktadır. Moment değerlerinin değişken olduğu ve yükün uygulandığı noktanın dışında kalan bölgede distorsiyon görüldüğü aşikardır. Ayrıca,

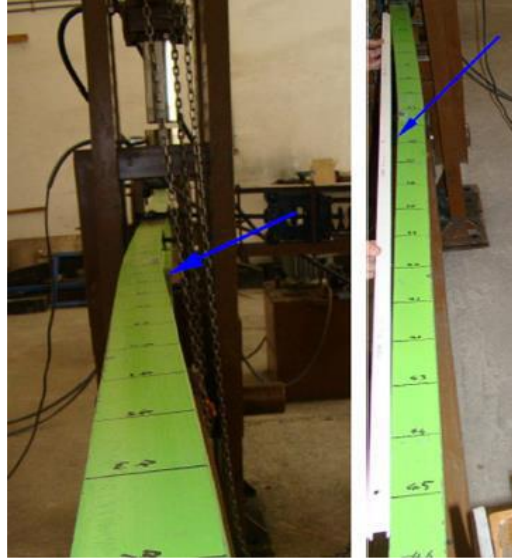
değiştirmesine, ve diyagonallerin burulmasına sebep olabilir (Pachpor ve ark., 2011).



Şekil 6. Yanal burkulmanın sayısal olarak modellenmesi (Justino ve ark., 2020).

1.3.5. Yanal Burulmalı Burkulma

Dolu gövdeli I kirişlerinde bu olay gövdenin buruşmadan düzlem dışı yer değiştirmesini içermektedir (Şekil 7). Tipik olarak burulmalı burkulma uzun açıklıklı kirişlerde yan destek elemanları bulunmadığında gövdenin basınç etkisinde maruz kalmasıyla ilişkilidir. Bu burkulma modunun oluşmasına sebep olan, nispeten daha yüksek ve daha ince kalınlığı gibi kesit özelliklerinin bir sonucu olarak gövdenin azaltılmış burulma rijitliğidir (Pachpor ve ark., 2011).



Şekil 7. Yanal burulmalı burkulma (Showkati ve ark., 2012).

1.3.6. Gövdede Bulunan Kaynak Birleşimin Kopması

Kirişin gövdesinde bulunan kaynaklı birleşimin kopması, gövde genişliğinin veya kaynak uzunluğunun küçük olmaları durumlarında oluşabilir. I kesitinin üst

başlığına eğilme momentinin sıfır olduğu noktalarda uygulanan kesme kuvvetlerinin dengelenmesi için kirişin gövdesinde oluşan kesme kuvvetleri bu modun oluşmasına sebep olarak gösterilmektedir (Wakchaure ve Sagade, 2012a).

1.4. Petek Kirişlerin Avantajları ve Uygulamaları

İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana çelik yapılarının maliyetini düşürmek için yeni yöntemler geliştirilerek birçok girişimde bulunulmuştur. İzin verilen en büyük sehim ve dayanım değerlerindeki kısıtlamalar nedeniyle, çoğu zaman yapısal çeliğinin tüm özelliklerinden en iyi şekilde faydalanamamaktadır. Sonuç olarak, çeliğin ağırlığında herhangi bir artış olmaksızın çelik elemanların rijitliğini artırmak için birkaç yeni yöntem kullanılmıştır (Wakchaure ve Sagade, 2012a).

- Petek kirişlerin ilk önemli avantajı, malzeme maliyetinden tasarruf etmek için yüksek mukavemet-ağırlık oranı sahip olmalarıdır. Elde edilen yüksek eğilme rijitliğinin sebebi ise kirişlerin özel modellere dayalı tasarımlar için kesilerek zigzag olarak yeniden birleştirilip orijinal kesite kıyasla daha yüksek bir kesit yüksekliğine sahip olmasıdır. Kirişin gövdesine bulunan kesim çizgi gövde boşluğunun tipini de belirlemektedir.
- Kirişin gövdesinde bulunan boşlukların ısıtma ve soğutma tesisatı , sıhhi tesisat hatları, internet kabloları, elektrik kabloları, gaz boruları gibi bina iç tesisatlarını döşemek için de kullanılabilmesi petek kirişlerin ikinci avantajı olarak sayılmaktadır. Bu sebepten ötürü, petek kirişler çok katlı yapılarda, ticari binalarda, endüstriyel yapılarda, portal çerçevelerde ve depolarda yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Petek kirişlerin üçüncü avantajı ise güzel bir mimari görüntü oluşturmasıdır.
- Bu kirişlerin gövde yükseklikleri arttığı için statik momentleri ve atalet momentleri de artmakta olup eğilme rijitliğine pozitif bir katkı sağlamaktadır. Böylelikle sehim değerlerinin daha düşük olmasına neden olmaktadır. Petek kirişlerin bu avantajı uzun açıklıklı tasarım yapmak isteyen mühendis ve mimarlar için oldukça önemlidir.
- Beşinci avantajı, kirişlerde plak kullanımını ortadan kaldırarak, eleman kesitinin mevcut profillerden optimum şekilde yararlanılmasını sağlamaktır.

- Altıncı avantaj, profilin ağırlığını az olmasıdır, bu da tüm yapının ağırlığını azaltmakta olup ve inşaat maliyetinde tasarrufu sağlamaktadır (Zirakian ve Showkati, 2006) .

Genel olarak, petek kirişler, gereksinimleri ve kullanım koşullarını hatasız bir şekilde karşılar. Bu nedenle, yapı mühendisi geniş açıklıkları tasarlarken bu tür kirişleri en iyi çözüm olarak kabul edebilir. Ayrıca, bu kirişler kullanıldığında tüm yapı için ölü yükünün azaltmanın mümkün olabileceği de söylenebilir. Böylece, petek kirişlerinin kullanılması, geniş bir açıklığın etkin ve verimli kullanılması sonucunda kolon ve temel gibi diğer yapı elemanlarının boyutlarını azaltacağı söylenebilir(Srimani ve Das, 1978).

1.5. Tezin Amacı

Bu tez, gövde boşluk tiplerinin petek kirişlerin statik ve dinamik davranışlarına etkisini sayısal olarak araştırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada ele alınan konuları aşağıda özetlenmiştir.

- Sekiz adet profil (IPE120, IPE140, IPE180,IPE200,IPE220,IPE240 ve IPE 300) ele alınarak 4 farklı boşluk tipinin (daire, kare, beşgen ve altıgen) etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca bu kirişler boşluksuz olarak da modellenmiştir. Bu boşluk tiplerinin yer değiştirmeler, gerilmelere ve serbest titreşim frekansları üzerindeki etkileri elde edilmiştir.
- Çeşitli sınır koşulları için de benzer şekilde yer değiştirmeler, gerilmeler ve serbest titreşim karakteristikleri elde edilmiştir.
- Bu çalışmada, ANSYS 2022 R1 kullanılarak ele alınan yapı elemanlarının üç boyutlu sonlu eleman analizi yapılmıştır.

1.6. Petek Kirişlerin Tarihçesi

Petek kirişleri kullanılmaya başlandıktan günümüze kadar bu konu ile ilgili çeşitli teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Örneğin petek kirişlerin kullanımı yaygınlaştıran en önemli özelliği olan gövde yüksekliğinin artması bu araştırmaların en temel amacı olmuştur. Petek kirişin yapılması için kullanılan ana kirişlerde gövde yüksekliğinin artırılmasının ana yöntemi "hem kolay hem de zekice" olarak tanımlanmıştır. Boyd, bu konu ile ilgili ilk konsepti 1935'te Arjantin'deki (BSSC)

şirketinde, Buenos Aires şehrinde inşaat mühendisi olarak çalışırken bulmuştur. Ocak 1939'da birbirinin devamı olan zikzak veya dişli bir çizgiyle kaynaklanan iki parçanın birleşiminden elde edilen birleşik yapısal elemanlarını iyileştirmeyi amaçlayan bir şartname hazırladığı için bir İngiliz mucit olarak tescil edilmiştir. Bu tip kirişin icadı sırasında Boyd kiriş iyi bilindiği için, eski tanımlar ve açıklamalar günümüzde kullanılan çelik petek kirişler için referans olarak kullanılabilir. Dorman Long'un Güney Amerika şubesinde Boyd, bir vinç için kiriş tasarlarken bir sorunla karşılaşmıştır. Stokta bulunan haddelenmiş ürünler, belirli bir başlık genişliğine sahip olmaları, istenilen açıklık için ise de yetersiz sayıda kirişin bulunmaması ve kirişlerin başlıklarının vinç için sabit bir ölçüde kullanılabilmesinden dolayı kısıtlıydı. Boyd, kirişin derinliğini ve dolayısıyla rijitliğini artırmak için kiriş gövdesini bu şekilde kesmeyi ve kaynaklamayı düşündüğünde, bir kirişi altına başka bir parça ile kaynak yaparak güçlendirme olasılığını basit bir cevap olarak değerlendirmiştir. Boyd kirişi bu konseptin uygulanabilirliğini gösteren hızlı bir mukavva numune yapımı deneyinin bir sonucu olarak yapılmıştır. O zamandan beri, petek kirişlerin davranışlarını anlamak için çok sayıda araştırma geliştirme çalışmasına ihtiyaç duyulmuştur (Knowles, 1991).

1.7. Önceki Çalışmalar

23 adet petek kirişlerinin sonlu elemanlar metodu analizi (A. Sayed ve ark., 2022) tarafından yapılmıştır. Ele alınan iki kirişi örneğini deneysel olarak araştırdıktan sonra elde edilen sonuçları sayısal modellemesini sonlu elemanlar yöntemi ile yapan analizden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Ayrıca, başlık kalınlığının, kiriş uzunluğunun ve gövde boşluk tipinin (trapez, dikdörtgen, üçgen) petek kirişlerin davranışına etkisini incelenmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre sonlu elemanlar yöntemine göre bulunan serbest titreşim davranışının doğru olduğu söylenmiştir. Buna göre dolu gövdeli kiriş tipine göre kalınlıkta en az %33 oranında tasarruf sağlanabilmektedir. Birinci moda göre üçgen boşluk tipi petek kirişin iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır. Üçgenin açılarının mod şekil fonksiyonlarını ve serbest titreşim frekanslarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bazı durumlarda ise kalınlık ve üçgen açılara arasında doğrusal bir etki olduğu gözlemlenmiştir.

ISMB 300 petek kirişinin statik ve dinamik davranışı (Mathur ve ark., 2021) tarafından analiz edilerek, gerilme, yer değiştirme, kayma gerilmesi, genlik değerleri

ve serbest titreşim frekans değerleri gibi parametreler araştırılmıştır. Çalışmalarında hafif düzgün yayılı yük etkisinde olan 0.6h petek kirişini sonlu elemanlar paket programı ANSYS18'i kullanmışlardır.

El-Dehemy (2017), ABAQUS programını kullanarak petek kirişlerin non-lineer statik ve dinamik davranışını araştırarak boşluk tipinin bu davranışlarına etkisini araştırmıştır. Çalışmalarına istinaden petek kirişlerinin gövdesinde açılan boşluk tipinin mühendislik amaçlar ile ilişkili olduğu, rijitliği düşürdüğünü ve yer değiştirme değerlerinin arttığını rapor etmiştir.

Chung ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışmada ise gövdesinde delik bulunan çelik kirişlerinin yapısal özellikleri araştırılmıştır. Bu kirişler için eğilme momenti – kesme kuvveti eğrilerin gövde boşluk tipine bağlı olarak elde etmiştir. Ayrıca, boşluk tipine bağlı olarak kirişlerin yük kapasitelerinin belirlenebilmesi için de grafikler hazırlamıştır. Vierendeel kırılma mekanizması ilgili detaylı sonuçlar ve öneriler sunmuştur. Sonlu elemanlar analizi yardımı ile çeşitli şekil ve boyutlardaki gövde boşlukları için kesme kapasitesi belirlenmiştir.

De'Nan ve ark. (2017)'e göre petek kirişlerinde oluşacak şekil değiştirmeler düzlem-içi yüklemelerden kaynaklanan yer değiştirmeler ve akma sınırına oluşan parçalardan meydana gelmektedir. Çalışmalarında boşluk tipinin basit eğilmenin etkisinde olan basit mesnetli kirişin davranışını üzerindeki etkileri doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Ele alınan boşluk tipleri ise altıgen, sekizgen ve kare olarak kabul edilmiştir. Araştırmalarına göre kare boşluk tipinin durumunda yer değiştirmelerin düşük çıktığı görülmüştür.

Lotfollahi-yaghin ve Ahmadi (2008), petek kirişlerin dinamik davranışını incelenmiştir. Çeşitli yük durumları için kirişleri analiz etmiştir. Yük değerlerine göre yapıların farklı davranış gösterdiğini incelenmiştir. Çalışmalarında dinamik davranışı sayısal olarak inceleyebilmek için sonlu elemanlar metodunda dayalı ANSYS programını kullanmıştır. Çalışmalarının ilk adımı olarak konsol petek kirişlerin dinamik davranışı araştırılarak mod şekilleri incelenmiştir. Büyük gövde boşlukları ele alınan kiriş elemanlarının dinamik yük taşıma kapasitesinin düştüğü ortaya çıkmıştır. Daha sonra çalışmada ele alınan dolu ve boşluk gövdeli I kirişler keyfi dinamik yük etkisinde analiz edilmiştir.

Akgöner ve ark. (2020) tarafından üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi uygun olarak dairesel boşluklu petek kirişlerin eğilme ve yanal burulmalı burkulma analizi yapılmıştır. Kullanılan sonlu elemanlar metodunun doğrulanması mevcut literatür sonuçlarının karşılaştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar doğrulandıktan sonra petek kirişler için birçok parametrik çalışma yapılmıştır. Yapılan araştırmada ise dairesel boşluk tipine ait çap, boşluklararsı mesafe ve plak rijitlik değerlerinin elastik burkulma ve eğilme davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analizlerinde geometrik ve malzeme nonlineer özelliklerini de dahil etmiştir. Ayrıca yanal burulmalı burkulma için teorik hesaplama metodu da araştırılmıştır. Burulmalı burkulma için AISC360-16 ve TSDC-2016 metodların daha doğru sonuçlar verdiği rapor edilmiştir.

Doori ve Noori (2021), ABAQUS programını kullanarak boşluk tipinin petek kirişlerin statik davranışı üzerindeki etkisini sayısal olarak üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Boşluk alanını sabit alıp boşluk tipini değiştirerek aynı yayılı yük etkisinde bulunan kirişler için deplasman ve gerilme değerlerini elde etmiştir. Ayrıca aynı kirişte farklı tip boşluk şekli kullanarak da analizler gerçekleştirilmiştir. Gerilme ve yer değiştirmeler için elde edilen sonuçlar rapor edilmiştir.

Dairesel boşluklu kat petek kirişlerin statik ve dinamik yükler etkisindeki davranışı (Abdulkhudhur ve ark., 2020) tarafından ele alınmıştır. ANSYS programı ile 3 boyutlu simülasyon modelleri kurulmuştur. Kirişlerin gövdelerinde bulunan boşlukların kesme dayanımının düşürdüğünü ve deplasman değerlerinin artırdığını rapor etmişlerdir. Dinamik davranışta ise yer değiştirmelerinin yük frekansına bağlı olarak değiştiğini sunmuşlardır.

ISM150 VE IC225 petek kirişler diyagonal desteklerin etkisi (Deepa ve Jayalekshmi, 2020) tarafından araştırılmıştır. Ayrıca boşlukların kenarında kullanılan kavislerin açısının önemi de vurgulanmıştır. Ele alınan problemlerin analizinde 3 boyutlu sonlu elemanlar metoduna dayalı paket programlar kullanılmıştır. Gövdede açılan deliklerin dik kenarlarında Vierendeel mekanizmasına dayalı kırılmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumlarda köşelerde plastik mafsallar oluşmakta olup Vierendeel kırılmasını engellemek için diyagonaller kullanılmıştır. Kullanılan petek kirişinin yük taşıma kapasitesi ISMB150 kirişin 1.51 katına olarak çıkmıştır. Elde

edilen lineer analiz sonuçlarına göre boşluk kenarlarındaki gerilme yığılmalarında ve boşlukların köşelerinde oluşan kırılmalarda da azalma görülmüştür.

Salah (2022), hibrit tipi petek kirişlerin kırılmasını tahmin edebilmek için sonlu elemanlar metodu geliştirmiştir. Geliştirilen metotta malzeme ve geometrik özelliklerinin doğrusal olmadığı kabul edilmiştir. Sonlu eleman metodundan elde edilen sonuçların doğrulanması için mevcut deneysel veriler kullanılarak hibrit tipi petek kirişlerinin nihai mukavemet değerleri elde edilmiştir. Parametrik çalışmalarda, başlık kalınlığı ve açıklık ile kiriş yüksekliğinin oranı kullanılmıştır. Hibrit tipi petek kirişlerinin elastik olmayan yanal buruşma dayanımı için tasarım formülü da bu yazarlar tarafından sunulmuştur.

Morkhade ve ark. (2019), ise gövde boşluğunun hibrit tipi petek kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında 410 MPa çelik başlıkta ve 250 MPa çelik ise kirişin gövdesinde kullanılmıştır. Yapılan analizler ANSYS programı ile gerçekleştirilerek geometrik ve malzeme özelliklerinin nonlineer olduğu varsayılmıştır. Kırılma ve göçme modları, yük – deplasman davranışını ve gerilme yığılmaları bulunarak boşluk tipinin bu değerlere olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Parametrik sonuçlar, hibrit tipi petek kirişlerin homojen tipi kirişlerden %40 oranında daha güçlü olduğunu göstermiştir. Her iki kiriş modelinde de Vierendeel mekanizmasının baskın kırılma modu olduğu gözlemlenmiştir.

Rodrigues ve ark. (2007)'e göre yüksek katlı yapıların sıhhi ve elektrik tesisatı gibi binanın iç tesisatları petek kirişlerin boşluklarından geçilebilir, yani çelik kirişlerde açılan gövde delikleri hizmet amaçlı kullanılabilir. Bu araştırma ekibi de sonlu elemanlar metodunu kullanarak profil tipinin, gövde boşluğunun konumunun vb. gibi parametreler için parametrik çalışmalar yapmıştır. Sundukları çalışmaya göre gövdede uzunluk boyunca kaynaklı destek elemanlarının kullanılması kirişin yük taşıma kapasitesine olumlu bir etki yapmaktadır.

Hosseinpour ve Sharifi (2021), çelik kirişin burkulması üzerine gövde buruşmasının etkisini araştırmıştır. Bu amaçla bir dizi doğrusal olmayan sonlu eleman modeli geliştirilmiş olup petek kirişlerin buruşması ile ilgili deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Malzemenin ve geometrinin doğrusal olmayan davranışları dikkatli bir şekilde modele uyarlanmıştır. Ayrıca, geliştirilen modeller kullanılarak

kiriş uzunluğu, çeliğin sınıfı ve kesit geometrik özellikleri için parametrik çalışmalar yapılmış olup bu özelliklerinin buruşma davranışına etkisi rapor edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda düşük dereceli çelikten yapılan ve başlık kalınlığı yüksek olan kirişlerin daha ekonomik olduğu saptanmıştır.

Grilo ve ark. (2018), dairesel boşluklu petek kirişlerin gövde burkulmasını incelemiştir. Çalışmalarında dairesel boşluklu petek kirişlerin kesme kuvveti mukavemet için deneysel ve nümerik verilere bağlı bir formül geliştirmişlerdir. Deneysel gerçekte ölçekli çelik kirişleri kullanmışlardır. Analizde düşey ve yanal yer değiştirmelerin yanısıra burkulma sonucu oluşan deplasman değerleri de hesaplanmıştır. Parametrik çalışmaların yapılabilmesi için ABAQUS programını kullanmışlardır. Gövdenin burkulması için 597 nümerik modelleme sonucunda elde ettikleri formülü rapor etmişlerdir. Önerdikleri metodu çeşitli geometrik ve malzeme özellikleri için doğrulamışlardır. Sundukları çalışmadaki formülün doğruluğunu göstererek mevcut metotlara göre daha etkin olduğunu rapor etmişlerdir.

Oval boşluklu petek kirişlerin nümerik analizi (Setiawan ve ark., 2018) tarafından yapılmıştır. Ele alınan kiriş problemleri için açıklık ile kiriş yükseklik oranı değişken parametre olarak kabul edilmiştir. Kiriş yüksekliği ile boşluk genişliği arasındaki oran ile kiriş genişliği ile boşluk genişliği arasındaki oran sabit olarak alınmıştır. Sonlu elemanlar analizi için hazır paket programı olan STRAND7 kullanılmıştır. Deneysel veriler kullanılarak nümerik sonuçlar doğrulanmıştır. Karşılaştırmalar göre yapılan sonlu eleman analizinin sonuçlarının doğruluğu saptanarak kesit özelliklerinin doğru bir şekilde modellendiği ispat edilmiştir.

Dervinis ve Kvedaras (2008), tarafından yapılan araştırmada çeşitli parametrelere sahip petek kirişler kullanılmıştır. Bu parametreler kirişin uzunluğunu, kiriş gövde kalınlığını, kiriş gövde yüksekliğini, gövdede açılan deliğin ölçülerini ve kesit ile ilgili buna benzer özellikleri içermektedir. Nonlineer sonlu eleman analizlerinde yukarıdaki geometrik özelliklerinin etkisi de dikkate alınmıştır. Kirişin üst başlığı düz bir yüzey elemanına kurularak yayılı yük etkisinde olduğu düşünülmüştür. Çalışmalarında geleneksel olmayan metotların kullanılmasını önermekte olup, iyi tasarım sonuçlarını elde etmişlerdir.

Nawar ve ark. (2021), petek çelik kirişlerin sünekliği iyileştirmek ve büyük deformasyon kinematiği yoluyla patlama enerjisini dağıtmak için statik

mukavemetini yaklaşık olarak hesaplamıştır. Petek kirişlerin statik davranışına mesnet koşullarının ve farklı güçlendirme tekniklerinin (kapalı deliler, düşey destekleyiciler) etkisini araştırmak için yarı-statik deneyleri gerçekleştirmiştir. Benzer şekilde bu amaç ile sonlu eleman modeli de geliştirerek tüm durumlar için deneysel veriler ile iyi uyum için olduğu görülmüştür. Farklı açıklık değerleri kullanılarak en az efektif olan açıklık/yükseklik oranı belirlenmiştir. Düşey destekleyiciler ve bulonlu birleşim araçları kullanıldığında ise çelik petek kirişlerin çekme kuvvetleri etkisinde daha çok deforme olabileceği rapor edilmiştir.

Chen ve ark. (2014) ise petek kirişlerin dinamik analizi için analitik bir metot önermiştir. Çalışmalarında ise gövde için kayma etkilerinin serbest titreşim frekanslarını nasıl etkilediğini araştırmıştır. Hamilton prensibini kullanılarak petek kirişlerin serbest titreşim davranışını idare eden basit kapalı bir çözüm sunmuştur. Serbest titreşim frekansları üzerindeki kayma deformasyon etkisi petek kirişlerin kesit özelliklerine, kirişin gövde kalınlığına ve gövde boşluklarının arasındaki mesafeye bağlı oldukları gösterilmiştir. Ayrıca yüksek modlarda ise kayma deformasyon etkisinin çok önemli olduğu rapor edilmiştir.

Gu (2014), da benzer şekilde petek kirişlerin serbest titreşim davranışının incelenmesi için kayma deformasyon ve dönme ataleti etkilerini dikkate almıştır. Elde edilen sonuçlara göre, gövdesinde küçük kesme kuvveti bulunan petek kirişlerinin serbest titreşim frekansları dönme ataletinin etkisinde olduğu görülmüştür.

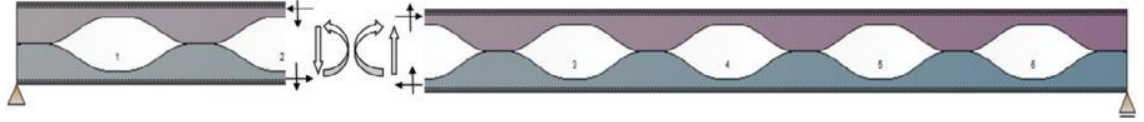
Morkhade ve ark. (2020), tarafından yapılan araştırmada gövde boşlukların etrafından konulan destek elemanlarının etkinliğini araştırmak için lineer olmayan nümerik analizler yapılmıştır. Destek elemanları kullanıldıktan sonra kirişin sağlamlığı %44 oranında artmıştır. Ayrıca kirişlerin mukavemeti de %36 oranında artmıştır. Gövde boşlukların etrafından kullanılan destek elemanları gövde burkulmasını engellemiştir. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş kirişlerin ikisi de Vierendeel mekanizması ile kırılmıştır.

Vivek ve ark. (2018), tarafından yapılan araştırmada ise, ince gövdeli konsol petek kirişlerin serbest titreşim davranışını araştırmış ve harmonik dinamik analizi yapılmıştır. ANSYS ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kirişler hem dolu gövdeli hem de boşluklu gövdeli olarak çözülmüştür. ANSYS ile çözüm yapılırken

SHELL63 elemanı kullanılmıştır. Gövde açıklıklarının doğal frekanslar üzerindeki etkisini belirlemek için, dairesel gövde boşlukları olan ve olmayan değişken kesitli kirişler üzerinde serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Farklı durumlar için pik genlik ve serbest titreşim frekansları sunulmuştur. Dairesel gövde boşlukları olan simetrik kesitli ve değişken kesitli kirişler, gövde boşlukları olan ve olmayan kirişler arasında en yüksek serbest titreşim frekanslarına ve en yüksek harmonik genlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak gövde boşluklarının ve kesit özelliklerinin petek kirişlerin dinamik davranışını etki ettiği rapor edilmiştir.

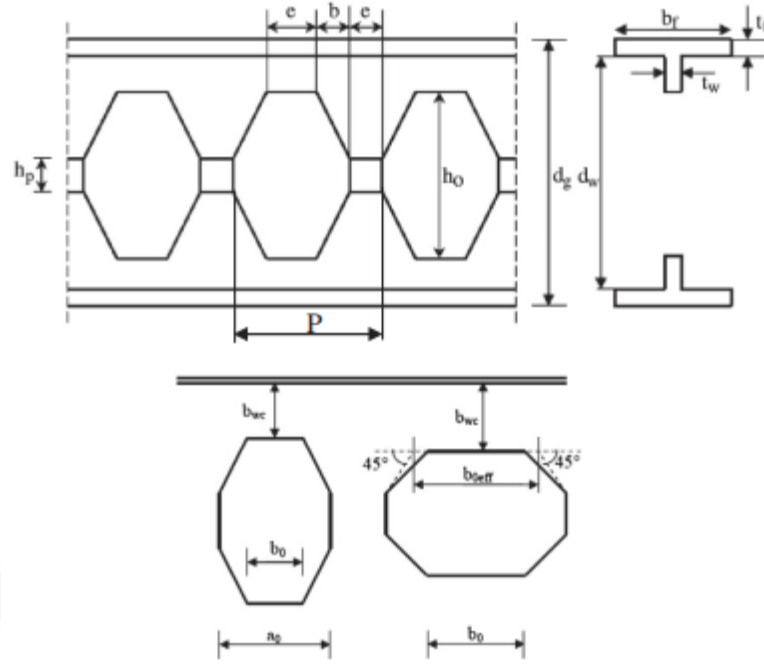
Frans ve ark. (2017), tarafından altıgen boşluklu petek kirişlerin davranışını sayısal olarak incelenmiş olup boşluk açılarının ve boşluklar arasındaki mesafelerinin etkileri araştırılmıştır. ABAQUS/CAF v6.11 yardımı ile sonlu elemanlar modeli kurulmuştur ve Von-Mises gerilmeleri elde edilmiştir. Bu çalışma, petek kirişler için olası göçmenin bir akma mekanizması olacağını göstermiştir, çünkü gövdede açılan altıgen boşluk kirişin gövdesinde plastik bölge oluşmasına sebep olabilir.

Durif ve Bouchaïr (2012), tam ölçekli ve sinüzoidal boşluklu petek kirişlerin göçme modlarını araştırmıştır. Birinci göçme modu, boşluk kenarlarında 4 adet plastik mafsalının oluşması veya gövdenin sinüzoidal bölgesinde burkulmanın oluşması olarak rapor edilmiştir. İkinci göçme modu ise yeni olup yazılan kodlar ile desteklenmediği anlaşılmıştır. Bu mod ilk defa ArcelorMittal tarafından Angelina Kirişleri için tanımlanmıştır. Gövde boşluklarının çevresi de teste tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar metoduyla hesaplanan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sunulan çalışma ile ilgili görseller şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Sinüzoidal boşluklu petek kiriş numunesi (Durif ve Bouchair, 2012)

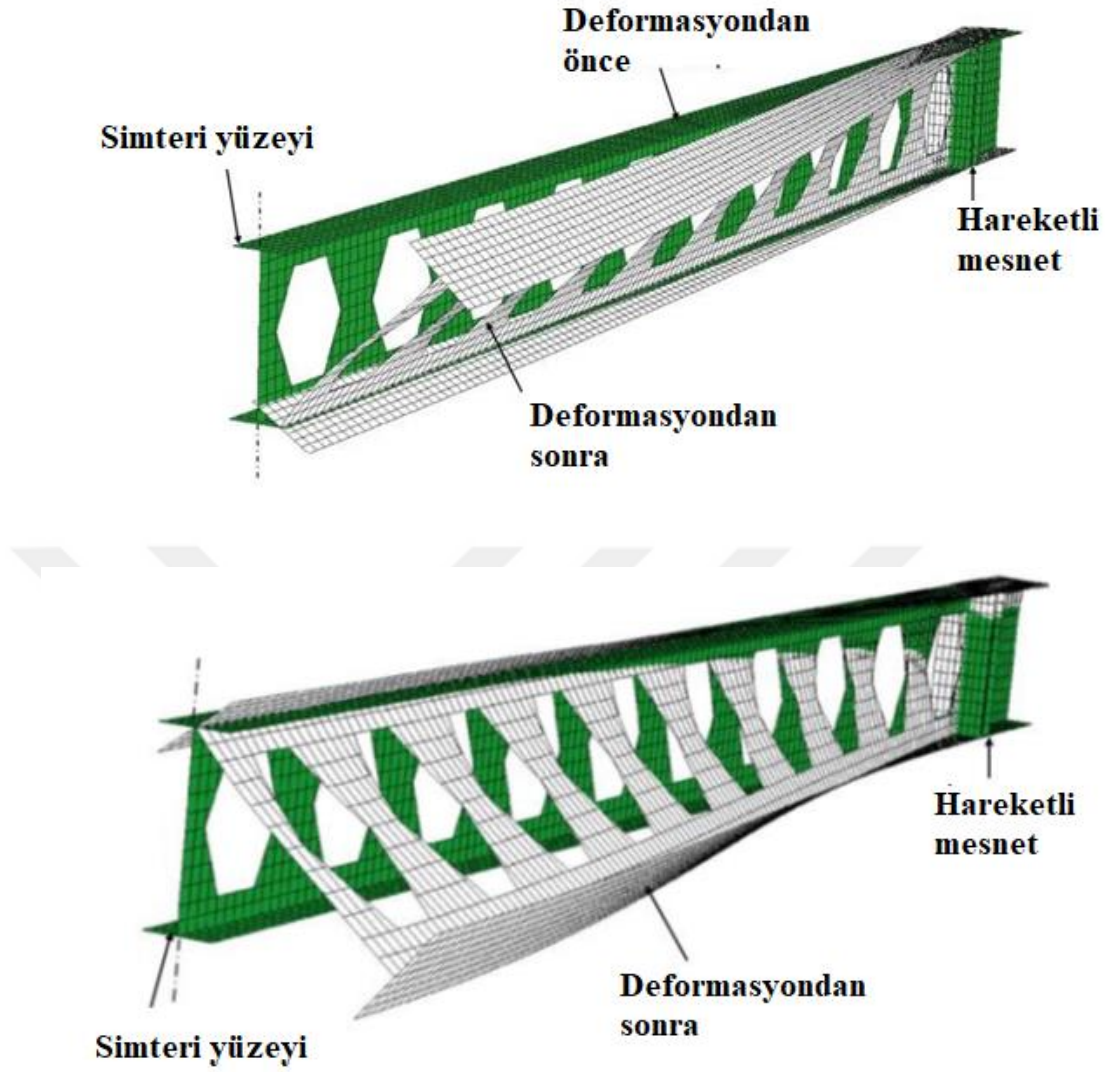
Soltani ve ark. (2012), MSC/NASTRAN modelini kullanarak altıgen ve sekizgen boşluklu petek kirişlerin davranışını araştırmıştır. Nümerik model kurulurken hem malzeme hem de geometri için doğrusal olmayan özellikler dikkate alınmıştır. Geliştirilen model kullanılarak petek kirişlerin taşıyabileceği maksimum yük ile göçme mekanizmesi tahmin edilebilir. Bu model kurulurken şekil 9’da verilen kiriş için elde edilen deneysel veriler kullanılmıştır. Sonuç olarak, en düşük burkulma modu şeklinde alınan ilk yanal sapmanın maksimum genliğinde yapılan bir değişikliğin, değiştirilen mod üzerinde hiçbir etkisi olmamıştır.



Şekil 9. Sekizgen ve altıgen boşluklu petek kirişi (Soltani ve ark., 2012)

E.S.Ismail ve ark. (2015), ABAQUS programını kullanarak 96 adet farklı boşluklu petek kiriş ve kompozit kirişlerin modellerini kurmuştur. Bu kirişlerin davranışını çeşitli düşey yükler için yaparak kesit geometrisinin, beton dayanımının, bağlayıcı konumunun, kiriş uzunluğunun ve beton döşeme kalınlığının burkulma ve yapısal davranışları üzerindeki etkilerini sayısal olarak araştırmıştır. Sonlu elemanlarının sonuçlarına göre çelik – beton kompozit petek kirişler için çeşitli öneriler yapılmıştır. Gövde kalınlığının artırılması, göçmesi burkulma tarafından idare edilen kirişler için, başlangıç rijitliğindeki nihai yükü ve sünekliği artırmaktadır.

Ellobody (2011), tarafından da 96 petek kiriş numunesi ele alınmıştır. Bu yazar tarafından kiriş kesit özelliklerinin, çelik dayanımının, kiriş uzunluğunun ve narinlik oranının kiriş burkulması ve kırılma gerilmeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. ABAQUS programı ile model kurulurken çeşitli boşluk mesafeleri ve açıları dikkate alınmıştır. Değerler ile ilgili detaylı bilgileri için ilgili kaynağa başvuru yapılabilir. Basit mesnetli kirişler için lineer olmayan sonlu eleman analizi geliştirilmiştir. Sonlu eleman metodundan elde edilen sonuçlar Avusturya kodları ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Kirişlerin yüksek ve normal mukavemet değerlerini elde edebilmek için üç boyutlu sonlu eleman modeli kurulmuştur. Şekil.10’da yazar tarafından sunulan çalışmadaki yanal burulmalı burkulma modu sunulmuştur.



Şekil 10. Yanal Burkulmalı Burulma (Ellobody, 2011)

Showkati ve ark. (2012), tarafından 9 adet numune kullanılarak (Şekil 11) petek kirişlerin burkulması deneysel olarak araştırılmıştır. Yazarlar tarafından yapılan deneyin sonuçları, bildirilen deneysel analitik ve sayısal çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve AISC 360-05 kod gereklilikleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada yanal desteklerinin burkulmaya olan etkisi de detaylı olarak araştırılmıştır.



a) Mesnetler

b) Yanal destekler

Şekil 11. Yanal destekli petek kiriş (Showkati ve ark., 2012)

Wakchaure ve Sagade (2012a) sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS14 programını kullanarak I kesitli petek kirişlerin davranışını araştırmıştır. Ele alınan kirişin basit mesnetli olduğu ve iki noktasında yüklendiği varsayılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan analiz sonuçlarına göre petek kirişi, boşluk derinliğinin 0.6 h olana kadar iyi davranış gösterdiği rapor edilmiştir. Bu sonucu elde etmek için hem yer değiştirme hem de çeşitli göçme modları kullanılmıştır. (Wakchaure ve Sagade, 2012a) tarafından yapılan bu araştırmada kullanılan kirişlerin görselleri ise şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12.Petek kiriş deneyi (Wakchaure ve Sagade, 2012a)

Shaikh ve Autade (2016), petek kirişlerin burkulma davranışını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmalarında oval kenarlı dikdörtgen boşluk, altıgen boşluk ile dairesel boşluk durumlarını incelemiştir. Bu yazarlar tarafından yapılan deneyler sonucunda oluşan göçme şekil 13'te verilmiştir. Kirişin gövdesinde oluşan bu burkulma modu gövdede yanıl destek elemanların yerleştirilmesi ile giderilebilir. Çalışmaları sonucunda tarafsız ekseninde gerilmelerin sıfır olduğunu göstermiştir.



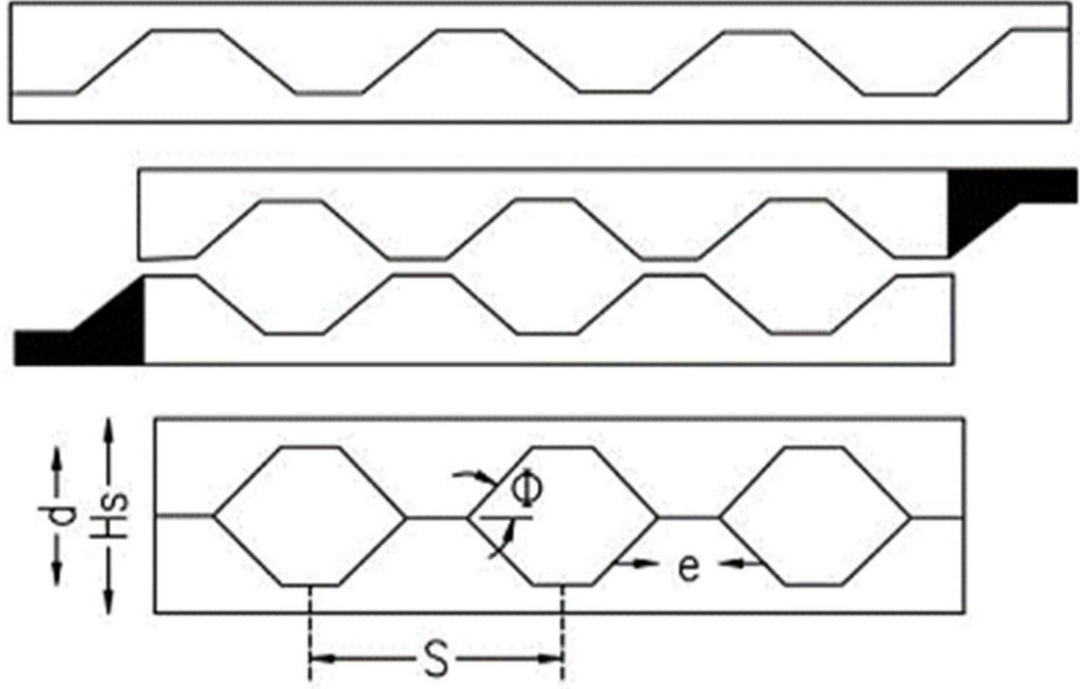
Şekil 13.Petek kirilerin deney düzeneği (Shaikh ve Autade, 2016)

Kohnepooshi ve Showkati (2009), tarafında yapılan araştırmada ise eğilme rijitliğini hesabıyla ilgili detaylar sunulmuştur. Eğilme rijitliğinin belirlenmesi konusunda ise burulma rijitliği, San-Venant rijitliği, kayma düzeltme katsayıları ve petek kirişlerin uzama rijitliği özellikleri de dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda birçok boşluk tipini içeren petek kirişleri göz önüne bulundurulmuştur. Burulma katsayısının elde edilebilmesi için non-lineer analizler yapılmıştır. Bu yazarların araştırmalarına göre eğilme kapasitende yüzde dört bir düşüş gözlemlenmiştir. Ele alınan bazı özel durumlar için ise sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Alan atalet

momenti 2.4 kat artırılarak kirişin burkulmasız eğilme durumu gösterilmiştir. Elde edilen burulma katsayısı ve elde edilen denklemlerin literatür ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Anupriya ve Jagadeesan (2013) tarafından ANSYS14 programı kullanılarak petek kirişlerin sonlu eleman analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kayma göçmesi gözlemlenmiştir. Diyagonal ve dikme olarak konulan destekler kullanıldığında ise düşey yer değiştirmelerde ve deformasyonlarda azalmalar belirlenmiştir. Bu yazarlar tarafından sunulan sonuçlara göre kesme kuvveti için konulan desteklerin petek kirişlerin genel mukavemetini de artırmaktadır. Dikme desteklerin kullanılması durumunda ise düşey yer değiştirmelerin %20 oranında düştüğü görülmüştür. Dikme ve diyagonal desteklerin kullanılması durumunda ise yer değiştirmelerin %60 oranında düştüğü rapor edilmiştir.

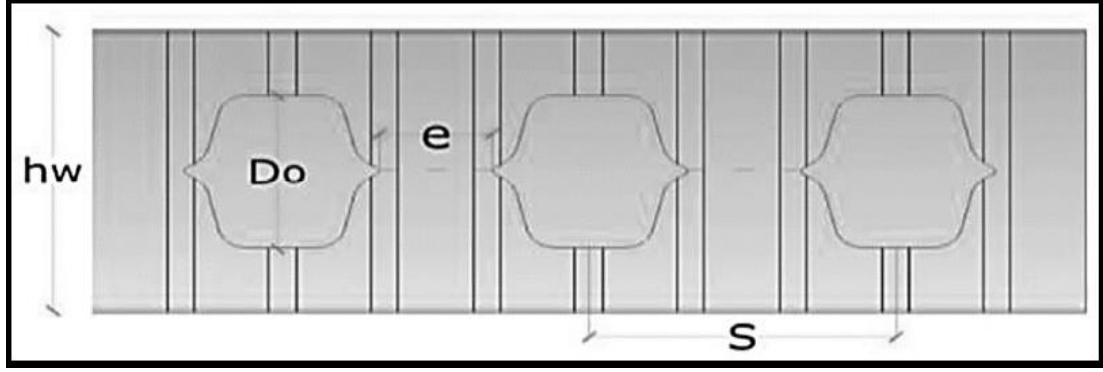
Şekil 14'te gösterilen petek kirişler için optimum tasarım ile ilgili çalışmalar yapan (Sorkhabi ve ark., 2014)'e göre kesme yüksekliği, kesme açısı, uzunluk boyunca boşluk sayısı ve boşluklar arasında mesafe önemli tasarım parametre olarak belirlenmiştir. Yaptıkları çalışmada kesme yöntemi ve kaynak yöntemi ile elde edilen petek kirişlerin maliyet performans karşılaştırılması da sunulmuştur. En iyi tasarımın yapılabilmesi için önemli olarak gösterilen parametreler kaynak fiyatı, kesme fiyatı ve kirişin öz ağırlığı olarak belirlenmiştir. Yazarlar tarafından sunulan çalışmada ise bu parametreler detaylı olarak araştırılarak optimum tasarım ortaya çıkarılmıştır. Petek kirişlerin optimizasyonu için iki farklı algorithmadan yararlanılmıştır. Her iki logaritmadan elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu gösterilmiştir. Genetik algoritmaya göre parçacık sürü optimizasyonu daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca, sonuçlarda standart sapma değerlerinin az olduğu görülmüştür.



Şekil 14.Petek kirişlerin yapım şekli (Sorkhabi ve ark., 2014)

P. Wang ve ark. (2016), sonlu elemanlar metodunu kullanarak düşey yüklerin etkisinde olan petek kirişlerin elastik burkulma davranışını incelemiştir. Kirişlerin burulma dayanımını hesaplamak için ince plak burkulma teorisini kullanmıştır. Ayrıca çalışmalarında burulma dayanımının bulunabilmesi için burulma katsayısını hesaplamıştır. Kullanılan burulma katsayısının kolay ve etkin bir şekilde elde edilebilmesi için bir metot önermişlerdir. Bu değerler sonlu elemanlar yöntemiyle birlikte etkin bir şekilde kullanılabilmiştir.

Mohanan (2016), tarafından Şekil 15'te gösterilen değişken derinlik ve delik boyutunda oluklu boşluklu petek I-kirişi incelenmiştir. Çalışmalarında, kabuk sonlu elemanı dayalı sayısal yöntem kullanarak basit mesnetli petek kirişlerin burulmalı burkulmasını araştırmıştır. Yanal burulmalı burkulma etkisinde olan kesitli petek bir kirişin yük deplasman ve moment-dönme davranışlarının elde edilmesi için doğrusal olmayan analiz ve sonlu eleman modelleri kullanılmıştır ve bunu gerçekleştirmek için ANSYS programından yararlanılmıştır.



Şekil 15. Oval boşluklu petek kiriş örneği (Mohanana, 2016)

Kwani ve Wijaya (2017), AISC teknik şartnamelerinin petek kirişler gibi prizmatik olmayan kirişlerde kritik momentin hesaplanmasını yapmak için bir yöntem sağlamadığı durumlarda yanal burulmalı burkulmayı incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemine dayalı ADINA v8.9 programı kullanılmıştır. Basit mesnetli petek kirişlerin yanal burkulmalı burulma davranışını detaylı bir şekilde incelemiştir. petek kirişler için düzeltme faktörlere ait denklemleri elde etmiş ve elastik olmayan burkulma davranışını araştırmıştır. Ayrıca, petek kirişlerin kırık moment değerlerinin hesaplanabilmesi için yeni denklemler önermiştir.

Zhou ve ark. (2018), tarafından petek kirişlerin analizi için nonlineer sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan modeller kaynak ve kesme imalat süreçlerini simüle edebilir. Kesit özelliklerinin artık termal gerilmeler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre $(s/w, d/D)$ oranlarının artık gerilmeler üzerindeki etkilerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca artık gerilmelerin dağılımı da araştırılarak yorumlanmıştır.

Hadeed ve Hussain Alshimmeri (2019), boşlukların petek kirişlerin yapısal davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılmasını amaçlamıştır. Bu sebep ile ABAQUS programının 6.4 versiyonunu kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile üç adet basit mesnetli petek kirişi analiz etmiştir. Bu araştırmacıların elde ettiklerine sonuçlara göre , orijinal dolu gövdeli kirişe kıyasla petek kirişlerde orta açıklıkta düşey deplasmanda bir azalma ve yük taşıma kapasitesinde bir artış gösterdi.

Estrada ve ark. (2006), petek kirişler ile standart dolu gövdeli kirişlerin maliyet performansını karşılaştırmıştır. Aynı yük kapasitesine sahip petek kirişlerinin dolu gövdeli kirişlere göre daha avantajlı olduğu sunulan çalışmada rapor edilmiştir. Sonuç olarak, petek kirişlerin binada kullanım için daha çekici hale geldiği belirlenmiştir. Yapılan araştırmaya göre petek kirişlerin kullanımı, 100'den fazla kiriş kullanıldığında ekonomik hale gelirken, küçük projelerde ve 40 ft'den daha az kirişlerde maliyet tasarrufu çok az olur veya hiç sağlanmaz.

W Zaarour (1996), tarafından 12 adet petek kiriş numunesi test edilerek gövde burkulması araştırılmıştır. Burkulma yüklerini tahmin etmek için, elastik olmayan davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiştir. Önceki çalışmalarda benzer sınır koşullarına sahip olan petek kirişlerin burkulması için elde edilen sonuçlar için grafik formunda sonuçlar elde edilmiştir. Benzer şekilde deneysel yöntemlere ek olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak burkulma yükleri hesaplanmıştır. Her iki yöntem ile elde edilen maksimum yük değerleri uyumlu olmuştur. Tasarım için iyi bir temel ve genel bir çözüm sunmak için önceki iki yöntemle uygun bir geometri aralığı sağlanmıştır.

B. R. Redwood ve Demirdjian (1998), tarafından 3 adet petek kirişi test edilmiştir. Gövde burulması sunulan çalışmanın amacı olup test edilen tüm kirişlerde gözlemlenmiştir. Burkulma yükleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elastik analiz ile tahmin edilmiştir. Test sonuçları, burkulma yükünün (moment/kesme) oranına bağlı olmadığını göstermiştir. Maksimum değerlerdeki test yükleri, sonlu elemanlar yönteminden elastik analiz ile elde edilen, gövdenin yüksek kesme kuvvetlerine karşı tahmin edilen dayanım kuvvetini aştığı görülmüştür. Deformasyon modları gövdenin burkulma sonrası davranışı olarak bazı durumlarda ise gövdenin yanal burulması olarak elde edilmiştir. Göçme yükü, testin sınırlamalarına bağlı olarak (moment/kesme) oranının artışına bağlı değildir. Bu çalışmada verilen sonuçlar, düzgün yayılı yük altındaki basit mesnetli kirişler için geçerlidir.

R. G. Redwood (2000), tarafından yapılan araştırmadan elde edilen kompozit petek kirişler, kompozit olmayan petek kirişlerden daha yüksek eğilme ve kesme kapasitelerine sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bileşik kirişlerin standart yöntemleri kullanılarak tahmin edilen eğilme direncini arttırmada bileşik etki etkisi ve maksimum moment noktalarından mesafe ile kesme bağlantısının derecesinin

düşürmesi gerektiği vurgulanmıştır. Vierendeel mekanizmasını güçlendirme olasılığının sınırlı olması nedeniyle, kompozit petek kirişler için kesme direncindeki artış kesin olarak tahmin edilebilir.

Yapılan literatür taramasına göre, boşluk tipinin (kare, beşgen, altıgen, ve dairesel) farklı sınır koşullarına sahip olan petek kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışına etkisini üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz eden herhangi başka bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu tezde, ankastre – ankastre, ankastre – sabit, ve ankastre – serbest petek mesnet koşullarına sahip olan petek kirişlerinin üç boyutlu sonlu eleman analizi ANSYS workbench ile yapılmıştır. Yapılan analizler statik ve dinamik olmak üzere iki ana gruptan oluşmaktadır. Analizler IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240 ve IPE300 gibi çeşitli profiller için yapılmıştır. Tezin temel amacı boşluk tipinin petek kirişlerin eğilme ve serbest titreşim davranışına etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaç ile petek kirişlerinde dairesel, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere 4 adet farklı boşluk tipi dikkate alınmıştır. Ayrıca bu kirişler boşluksuz olarak da modellenmiştir. Bu kapsamda, her profil için kiriş uzunluğu, gövde boşluk alanı ve boşluklar arası mesafesi kenarda bulunan gövde boşluğu ile mesnet arasındaki mesafe tüm kiriş modelleri için sabit tutularak sadece gövde boşluk tipi değiştirilmiştir. Statik durumu için ise sadece basınç yük için incelenmiştir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi boşluk tipinin yanısıra mesnet türlerinin de ele alınan yapı elemanlarının serbest titreşim frekansları, yer değiştirme, von-Mises gerilmeleri, maksimum kayma gerilmeleri üzerindeki etkileri detaylı olarak araştırılmış hem liste hem de grafik olarak sunulmuştur.

İKİNCİ BÖLÜM

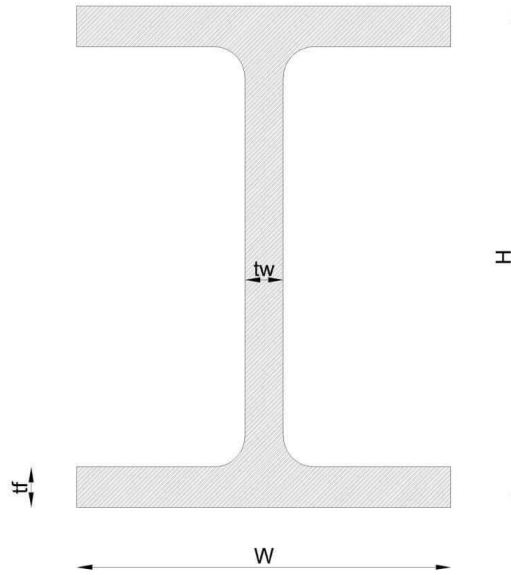
MATERYAL VE METOT

2.1. Giriş

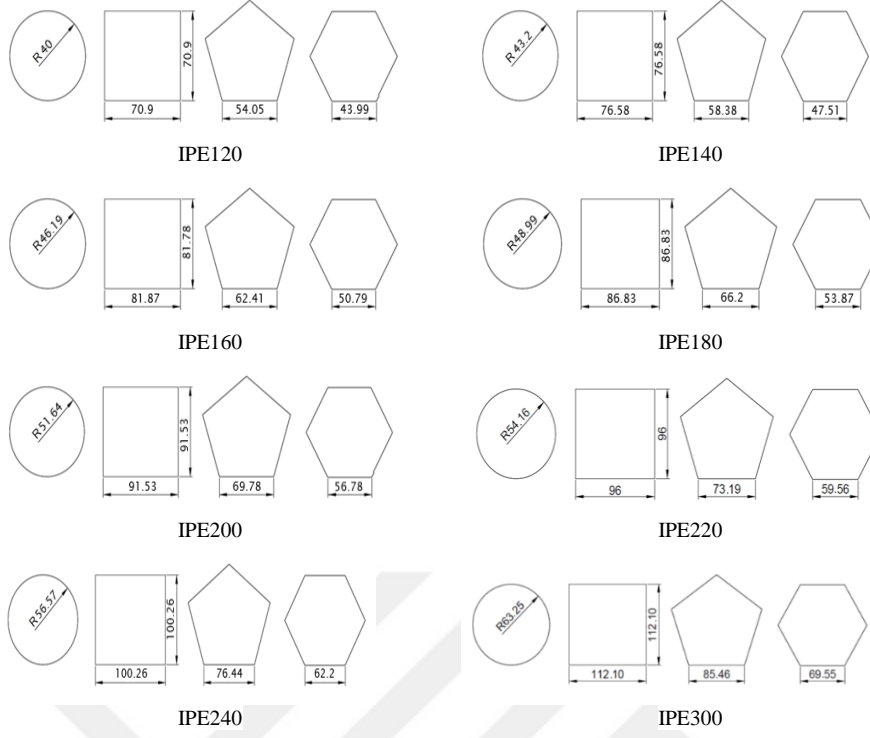
Bu tez çalışmasında, gövde boşluk geometrisinin çelik petek kirişlerin statik ve dinamik davranışına etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Bu bölümde, kullanılan kirişlerin geometrik özellikler, ölçüleri, malzeme özellikleri, sınır koşulları, kullanılan sonlu eleman metodu, sonlu eleman ağı ile ilgili bilgi ve nümerik modelleme prosedürü sunulmuştur.

2.2. Kesit ve Boşluk Geometrisi

Bu çalışmada farklı geometrik özelliklerine sahip petek kirişlerin davranışını incelemek için sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS Workbench 2022 R1 programı kullanılmıştır. Çalışmada, IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240 ve IPE300 çelik profilleri analiz edilmiştir. Her profil hem boşluksuz olarak hem de her biri için dairesel, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere dört adet farklı boşluk tipi dikkate alınarak incelenmiştir. Kirişin geometrisi şekil 16'da boşlukların ölçüleri ise şekil 17'de sunulmuştur.



Şekil 16. Kirişin geometrisi



Şekil 17. Gövdede açılan boşlukların geometrisi

2.3. Malzeme Özellikleri

Malzeme özellikleri Tablo 1’de listelenmiştir.

Tablo 1.Malzeme özellikleri

Elastisite modülü (Pa)	Poison oranı	Kütleli Yoğunluk (kg/m^3)	Bulk Modülü	Kayma modülü (Pa)
2.E+011	0.3	7850	1.6667E+011	7.6923E+010

2.4. Geometrik Özellikler

Şekil 16’da verilen kiriş ve şekil 17’de verilen boşluk tipleri için geometrik ölçüler verilecektir. Bu çalışmada ele alınan petek kirişin uzunluğu 3 metre olarak dikkate alınmıştır. Tüm durumlarda boşluk sayısı 15 adet ve iki boşluğun geometrik merkezleri arasındaki ölçü (α) 0.18 metre, kenar boşluğunun geometrik merkezi ile mesnet arasındaki ölçü (β) 0.24 metre olarak alınmıştır. Bu geometrik özellikler Tablo (2 – 3)’te detaylı bir şekilde listelenmiştir.

Tablo 2. Gövde boşluklarının geometrik özellikleri

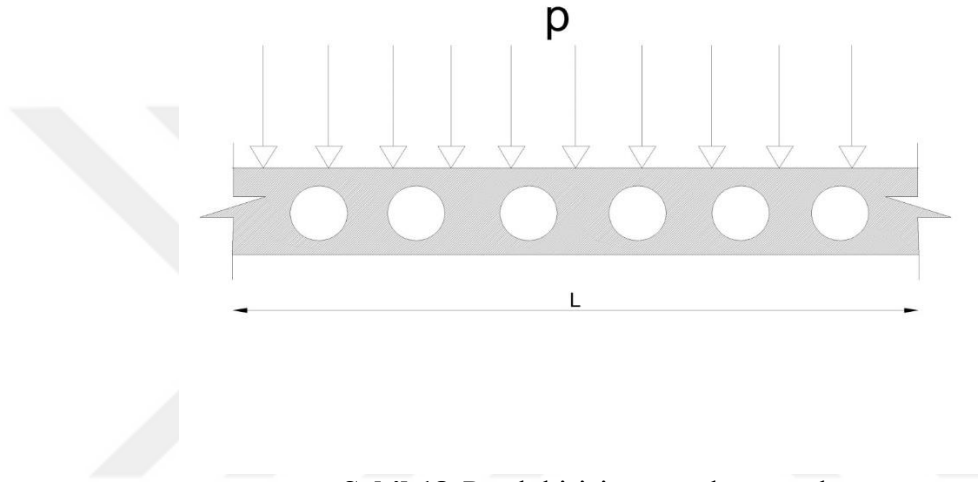
Model	Profil Tipi	Boşluk Tipi	Boşluk Alanı (mm ²)	α (m)	β (m)	Boşluk Sayısı
I	IPE120	Dairesel	5026.55	0.18	0.24	15
II		Kare	5026.55	0.18	0.24	15
III		Beşgen	5026.55	0.18	0.24	15
IV		Altıgen	5026.55	0.18	0.24	15
I	IPE140	Dairesel	5862.96	0.18	0.24	15
II		Kare	5862.96	0.18	0.24	15
III		Beşgen	5862.96	0.18	0.24	15
IV		Altıgen	5862.96	0.18	0.24	15
I	IPE160	Dairesel	6702.64	0.18	0.24	15
II		Kare	6702.64	0.18	0.24	15
III		Beşgen	6702.64	0.18	0.24	15
IV		Altıgen	6702.64	0.18	0.24	15
I	IPE180	Dairesel	7539.89	0.18	0.24	15
II		Kare	7539.89	0.18	0.24	15
III		Beşgen	7539.89	0.18	0.24	15
IV		Altıgen	7539.89	0.18	0.24	15
I	IPE200	Dairesel	8377.65	0.18	0.24	15
II		Kare	8377.65	0.18	0.24	15
III		Beşgen	8377.65	0.18	0.24	15
IV		Altıgen	8377.65	0.18	0.24	15
I	IPE220	Dairesel	9216	0.18	0.24	15
II		Kare	9216	0.18	0.24	15
III		Beşgen	9216	0.18	0.24	15
IV		Altıgen	9216	0.18	0.24	15
I	IPE240	Dairesel	10053.61	0.18	0.24	15
II		Kare	10053.61	0.18	0.24	15
III		Beşgen	10053.61	0.18	0.24	15
IV		Altıgen	10053.61	0.18	0.24	15
I	IPE300	Dairesel	12566.41	0.18	0.24	15
II		Kare	12566.41	0.18	0.24	15
III		Beşgen	12566.41	0.18	0.24	15
IV		Altıgen	12566.41	0.18	0.24	15

Tablo 3. Kirişin geometrik lleri

IPE	Yseklik H	Genişlik W	Gövde kalınlığı tw	Başlık kalınlığı tf
120	120	64	4.4	6.3
140	140	73	4.7	6.9
160	160	82	5	7.4
180	180	91	5.3	8
200	200	100	5.6	8.5
220	220	110	5.9	9.2
240	240	120	6.2	9.8
300	300	150	7.1	10.7

2.5. Yüklemler

Petek kirişin üst başlığına 1 KPa'lık bir basıncın uygulandığı varsayılmıştır. Bu yükün belirlenmesinin herhangi belli bir nedeni olmayıp yalnız boşluk tipinin geometrisinin ele alınan petek kirişlerin statik davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için böyle seçilmiştir. Petek kirişine uygulanan yük şekil 18'de sunulmuştur.



Şekil 18. Petek kirişine uygulanan yük

2.6. Mesnet Koşulları

Bu çalışmada, ankastre – ankastre, ankastre – sabit ve ankastre – serbest olmak üzere üç çeşit farklı mesnet koşulları için çözümler yapılmıştır. Sınır koşulları ile ilgili detaylar Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te verilen "i" kirişin sol ucunu "j" ise kirişin sağ ucunu temsil etmektedir. ANSYS Workbench programında sınır koşullarının tanımlanabilmesi sürecinde ankastre mesnedi için "Fixed" özelliği kullanılırken sabit mesnet için ise gerekli koşullar "Remote Displacement" komutu ile tanımlanmıştır. Serbest uc için ise herhangi bir sınır koşulu girilmemiştir.

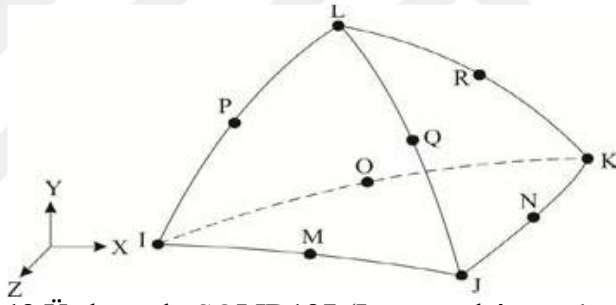
Tablo 4. Sınır koşulları

Mesnet Tipi	Sınır koşulları	
	i	j
Ankastre – Ankastre (A-A)	$Rot_z = Rot_y = Rot_x = U_z = U_y = U_x = 0$	$Rot_z = Rot_y = Rot_x = U_z = U_y = U_x = 0$
Ankastre - Sabit (A-S)	$Rot_z = Rot_y = Rot_x = U_z = U_y = U_x = 0$	$U_z = U_x = U_y = 0$
Ankastre – Serbest (A-SR)	$Rot_z = Rot_y = Rot_x = U_z = U_y = U_x = 0$	-----

Bu tabloda Rotx, Roty, Rotz sırasıyla x, y, z eksenlerine göre dönme ve Ux, Uy, Uz ise sırasıyla eksenlerine göre doğrultularındaki ötelenmeyi göstermektedir.

2.7. Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması

Sonlu eleman ağı oluşturulurken ANSYS'ın otomatik özellikleri kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında, SOLID187 üç boyutlu sonlu elemanı kullanılmıştır. SOLID 187 elemanın geometrisi şekil 19'da çizilmiştir. Bu elemanın toplam 10 adet düğüm noktası var her düğüm noktasında toplam 3 adet serbestlik derecesi vardır. Kullanılan bu eleman düzgün olmayan geometrilerin sonlu eleman analizi için uygun olup kuadratik özelliklere sahiptir. Elemanın serbestlik dereceleri ise her düğüm noktasının x,y ve z eksenleri doğrultularında ötelenmelerden oluşmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi sonlu eleman ağı oluşturulurken "Mesh" ayarları değiştirilmemiştir. Her bir giriş modeli için sonlu eleman sayısı ile düğüm sayısı Tablo 5'te listelenmiştir.



Şekil 19.Üç boyutlu SOLID187 (Lengvaský ve ark., 2013).

Tablo 5.Sonlu eleman ağı ile ilgili detaylar

Profil Tipi	Model	Gövde boşluk geometrisi	Sonlu eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı
IPE120	I	Dairesel	5128	11002
	II	Kare	4505	9468
	III	Beşgen	3257	6595
	IV	Altıgen	5209	11157
	V	Boşluksuz	5297	10834
IPE140	I	Dairesel	5345	11684
	II	Kare	4475	9455
	III	Beşgen	4980	10603
	IV	Altıgen	5178	11179
	V	Boşluksuz	5208	10704
IPE160	I	Dairesel	5034	11027
	II	Kare	4189	8895
	III	Beşgen	4568	9815
	IV	Altıgen	4640	10178

IPE180	V	Boşluksuz	4882	10074
	I	Dairesel	5289	11660
	II	Kare	4146	8820
	III	Beşgen	4455	9605
	IV	Altıgen	4856	10614
	V	Boşluksuz	4863	10389
IPE200	I	Dairesel	5210	11632
	II	Kare	4175	8958
	III	Beşgen	4439	9644
	IV	Altıgen	4818	10574
	V	Boşluksuz	5017	10685
IPE220	I	Dairesel	5394	12051
	II	Kare	3874	8418
	III	Beşgen	4221	9211
	IV	Altıgen	4651	10287
	V	Boşluksuz	4692	10122
IPE240	I	Dairesel	5458	12442
	II	Kare	3676	8160
	III	Beşgen	3951	8894
	IV	Altıgen	4301	9875
	V	Boşluksuz	520	3315
IPE300	I	Dairesel	3697	8326
	II	Kare	3426	7721
	III	Beşgen	3719	8472
	IV	Altıgen	4217	9666
	V	Boşluksuz	480	3211

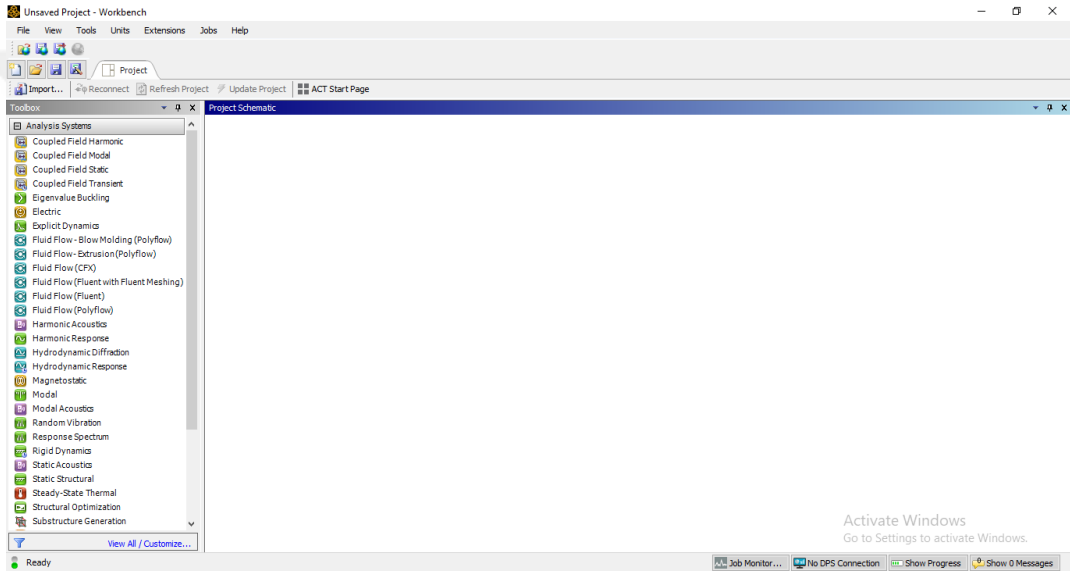
2.8. Modelin Kurulması

2.8.1. Statik Analiz

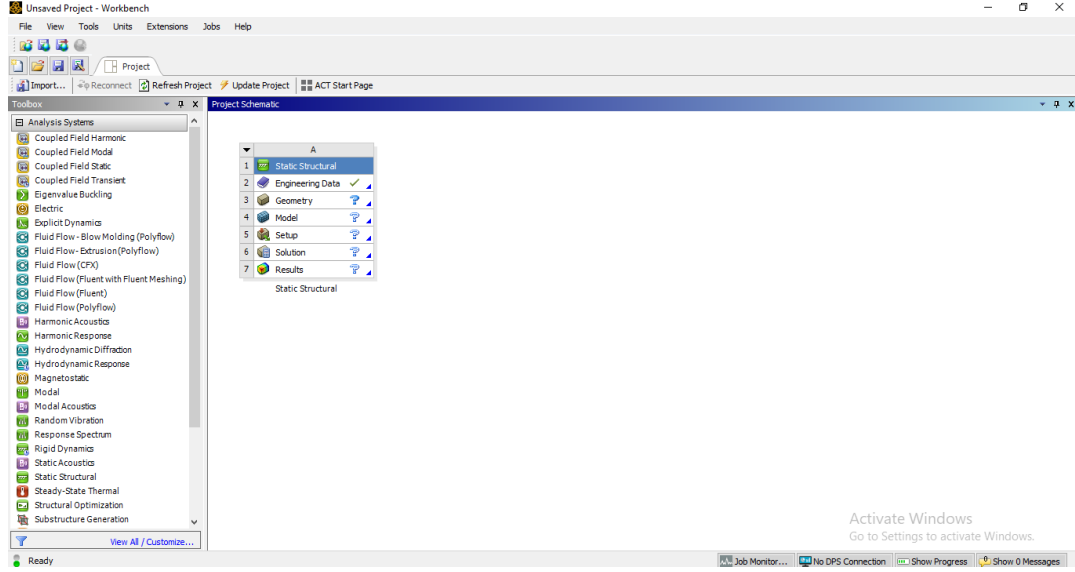
Statik analiz ile ilgili modelin kurulabilmesi için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir. WorkBench ara yüzü Şekil 20’de çizilmiştir.

- WorkBench programı açılarak “static structural” sekmesi tıklanıp “Project schematic” bölümüne sürüklenmiştir (Şekil 21).
- “Opening Engineering Data” sekmesine çift tıklanarak gerekli malzeme özellikleri girilmiştir (Şekil 22).
- “Geometry” sekmesine sağ tıklanıp “edit geometry in design modeler” altı programının açılması için komut verilmiştir.
- “modeling and sketching” sekmesinde “XY Plane” düzlemine tıklanmıştır (Şekil 23).

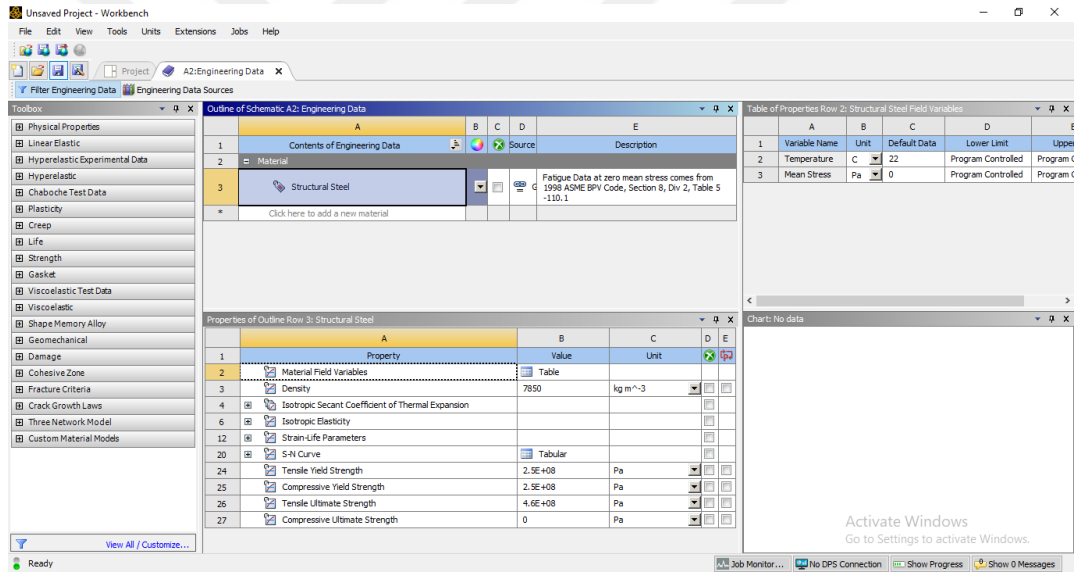
- Geometri oluşturulduktan sonra “Model” sekmesine tıklanarak “Mechanical” alt programı açılır.
- Bu aşamada ise sonlu eleman ağı oluşturulur. Eleman ve düğüm sayısı analiz süresini etkilediği için bu adımda en uygun parametrelere kullanıcı tarafından belirlenmelidir (Şekil 24).
- Sonraki aşamada ise sınır koşulları (Şekil 25) girilerek yük değerleri de tanımlanır (Şekil 26).
- Hesaplanması istenilen büyüklükler işaretlenerek ve problem “Solve” sekmesine tıklanarak çözülür (Şekil 27).



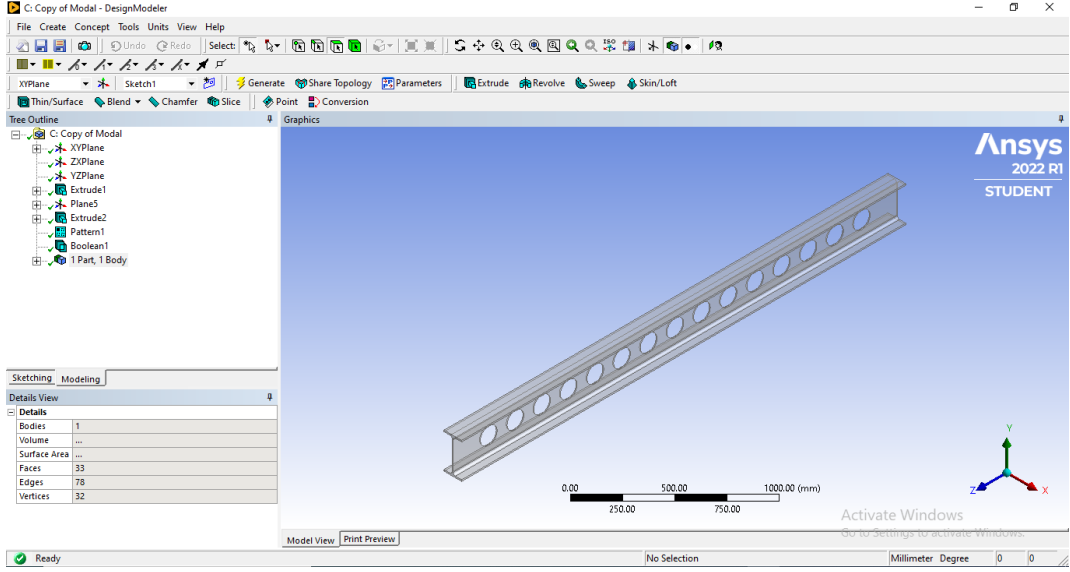
Şekil 20. ANSYS 2022 R1 programının ara yüzü



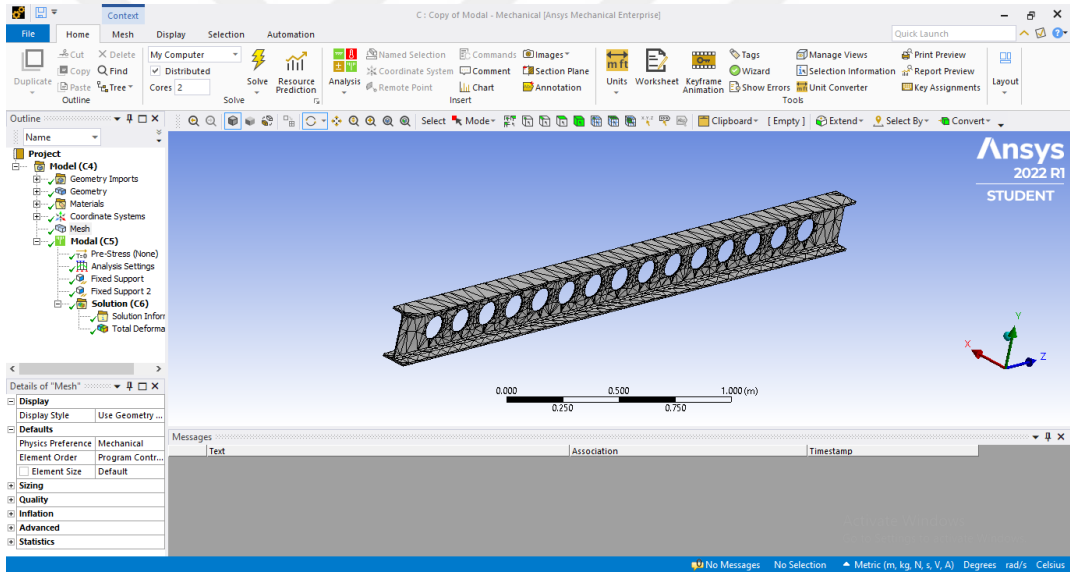
Şekil 21. Malzeme özelliklerin girilmesi için ANSYS 2022 R1 programının ara yüzü



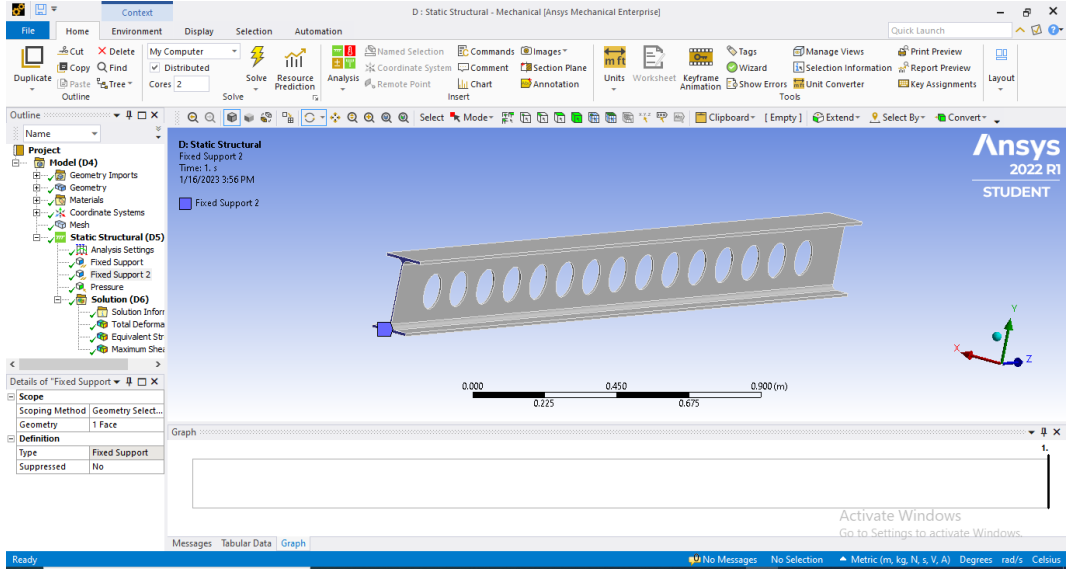
Şekil 22. Malzeme özelliklerin girilmesi



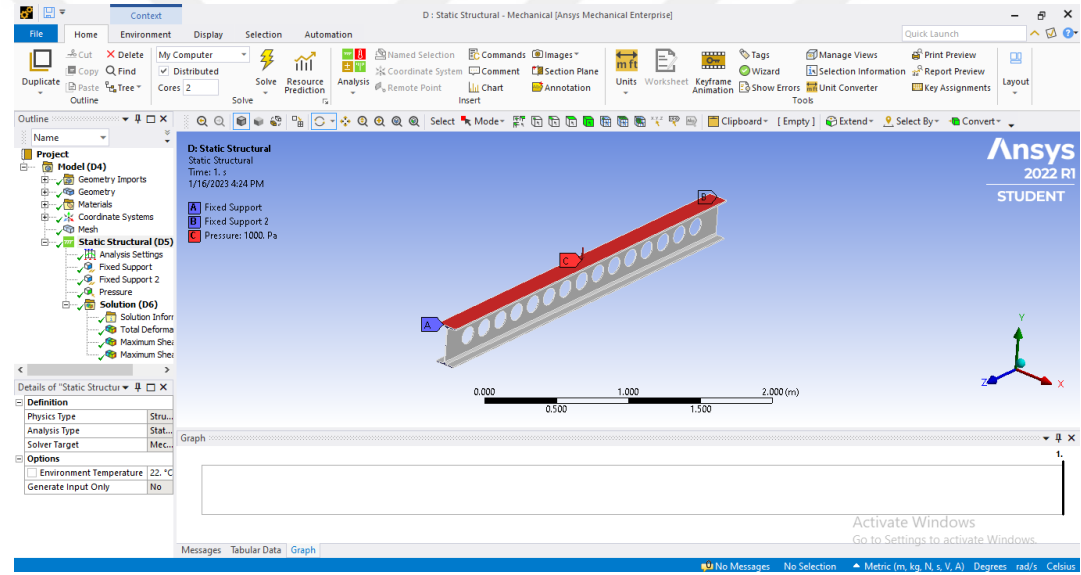
Şekil 23. Geometrik modelinin oluşturulması



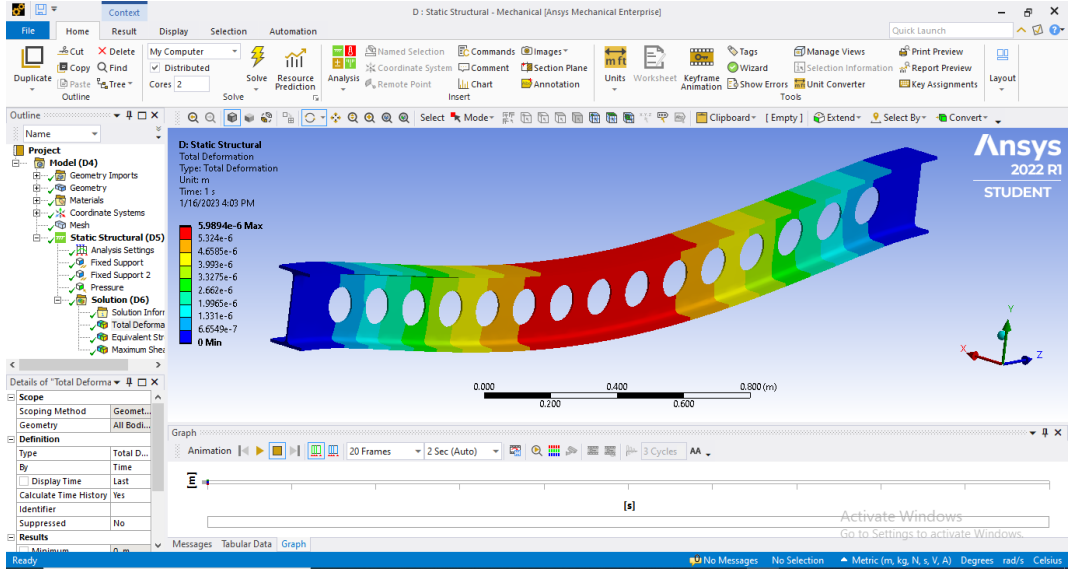
Şekil 24. Sonlu eleman ağının oluşturulması



Şekil 25. Mesnet koşullarının girilmesi



Şekil 26. Dış yüklerinin girilmesi



Şekil 27. Sonuçların elde edilmesi

ANSYS Workbench 2022 R1 programı yardımı ile statik davranış için yer değiştirmeler, Von-Mises gerilmeleri ve maksimum kayma gerilmeleri elde edilerek grafik formunda sunulmuştur.

2.8.2. Serbest Titreşim Analizi

Dinamik analiz için WorkBench programı açılarak “modal” sekmesi tıklanıp “Project schematic” bölümüne sürüklenmiştir. Serbest titreşim davranışı analizinde mesnet koşulları, geometrik özellikler ve sonlu eleman ağı önceki bölüm gibi yapılırken sisteme etki eden herhangi bir dış yük girilmemektedir. Serbest titreşim analizinin sonucunda kirişe ait serbest titreşim frekansları ve mod şekilleri elde edilip bu tezde sunulmuştur.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Statik Analiz

Çalışmanın bu bölümünde petek kirişlerin statik davranışı üç boyutlu sonlu elemanlara dayalı ANSYS Workbench 2022 R1 programı yardımıyla yapılmıştır. Boşluk geometrisinin petek kirişlerin performansı üzerindeki etkisi detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Önceki bölümde de belirtildiği gibi kirişin üst başlığına 1000 Pa'lık bir basınç uygulanmıştır. Bu yükün belirlenmesinin herhangi belli bir nedeni olmayıp yalnız boşluk tipinin geometrisinin ele alınan petek kirişlerin statik davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için böyle seçilmiştir. Petek kirişlerin eğilme davranışı incelenirken IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240 ve IPE300 olmak üzere sekiz adet farklı çelik profil tipi kullanılmıştır. Bu profillerin her biri için daire, kare, beşgen ve altıgen şeklinde boşluk tipi belirlenmiştir. Ayrıca bu kirişler boşluksuz olarak da modellenmiştir. Bu kapsamda, her profil için kiriş uzunluğu, gövde boşluk alanı ve boşluklar arası mesafesi kenarda bulunan gövde boşluğu ile mesnet arasındaki mesafe tüm kiriş modelleri için sabit tutularak sadece gövde boşluk tipi değiştirilmiştir.

Sonlu elemanlar prosedürü kullanılarak yüz yirmi farklı model üretilmiş ve analiz edilmiştir. Boşluk tipinin statik davranışı üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için boşluk geometrisini yanı sıra ankastre – ankastre, ankastre – sabit ve ankastre – serbest mesnet koşulları için de sonuçlar hesaplanmıştır. Statik davranışını sonuçları olarak yer değiştirmeler ve gerilmeler hesaplanmıştır. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri ise Tablo 1'de verilmiştir.

3.1.1. Petek Kirişlerin Yer Değiştirme Sonuçları

Statik analizi sonucunda elde edilen en büyük toplam yer değiştirmelerin değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Bu yer değiştirme değerleri dairesel, kare, beşgen ve altıgen boşluk geometrisine sahip ve boşluksuz olan 8 adet IPE petek kirişleri için elde edilmiştir.

Tablo 6.Petek kirişleri için elde edilen en büyük düşey yer değiştirme değerleri (m)

Profil Tipi	Model Tipi	Gövde boşluk Tipi	En büyük toplam yer değiştirme (m)		
			Ankastre – Ankastre	Ankastre – Sabit	Ankastre – Serbest
IPE120	I	Dairesel	2.499E-05	4.893E-05	1.046E-03
	II	Kare	2.554E-05	4.960E-05	1.048E-03
	III	Beşgen	2.425E-05	4.820E-05	1.043E-03
	IV	Altıgen	2.508E-05	4.905E-05	1.047E-03
	V	Boşluksuz	2.283E-05	4.588E-05	1.017E-03
IPE140	I	Dairesel	1.755E-05	3.371E-05	7.035E-04
	II	Kare	1.851E-05	3.481E-05	7.069E-04
	III	Beşgen	1.791E-05	3.426E-05	7.068E-04
	IV	Altıgen	1.772E-05	3.388E-05	7.048E-04
	V	Boşluksuz	1.576E-05	3.129E-05	6.839E-04
IPE160	I	Dairesel	1.314E-05	2.458E-05	4.927E-04
	II	Kare	1.377E-05	2.523E-05	4.936E-04
	III	Beşgen	1.333E-05	2.473E-05	4.935E-04
	IV	Altıgen	1.311E-05	2.451E-05	4.923E-04
	V	Boşluksuz	1.129E-05	2.212E-05	4.751E-04
IPE180	I	Dairesel	1.030E-05	1.873E-05	3.621E-04
	II	Kare	1.098E-05	1.955E-05	3.656E-04
	III	Beşgen	1.044E-05	1.890E-05	3.649E-04
	IV	Altıgen	1.028E-05	1.872E-05	3.638E-04
	V	Boşluksuz	8.642E-06	1.672E-05	3.519E-04
IPE200	I	Dairesel	8.244E-06	1.462E-05	2.712E-04
	II	Kare	8.949E-06	1.541E-05	2.740E-04
	III	Beşgen	8.365E-06	1.476E-05	2.720E-04
	IV	Altıgen	8.262E-06	1.463E-05	2.713E-04
	V	Boşluksuz	6.657E-06	1.265E-05	2.613E-04
IPE220	I	Dairesel	7.126E-06	1.219E-05	2.137E-04
	II	Kare	7.887E-06	1.305E-05	2.170E-04
	III	Beşgen	7.230E-06	1.233E-05	2.147E-04
	IV	Altıgen	7.136E-06	1.220E-05	2.136E-04
	V	Boşluksuz	5.501E-06	1.027E-05	2.044E-04
IPE240	I	Dairesel	5.989E-06	9.935E-06	1.667E-04
	II	Kare	6.736E-06	1.085E-05	1.701E-04
	III	Beşgen	6.089E-06	1.008E-05	1.672E-04
	IV	Altıgen	5.958E-06	9.926E-06	1.664E-04
	V	Boşluksuz	4.470E-06	8.207E-06	1.606E-04
IPE300	I	Dairesel	4.748E-06	7.416E-06	1.031E-04
	II	Kare	5.690E-06	8.518E-06	1.077E-04
	III	Beşgen	4.962E-06	7.649E-06	1.042E-04
	IV	Altıgen	4.785E-06	7.460E-06	1.033E-04
	V	Boşluksuz	3.113E-06	5.526E-06	9.562E-05

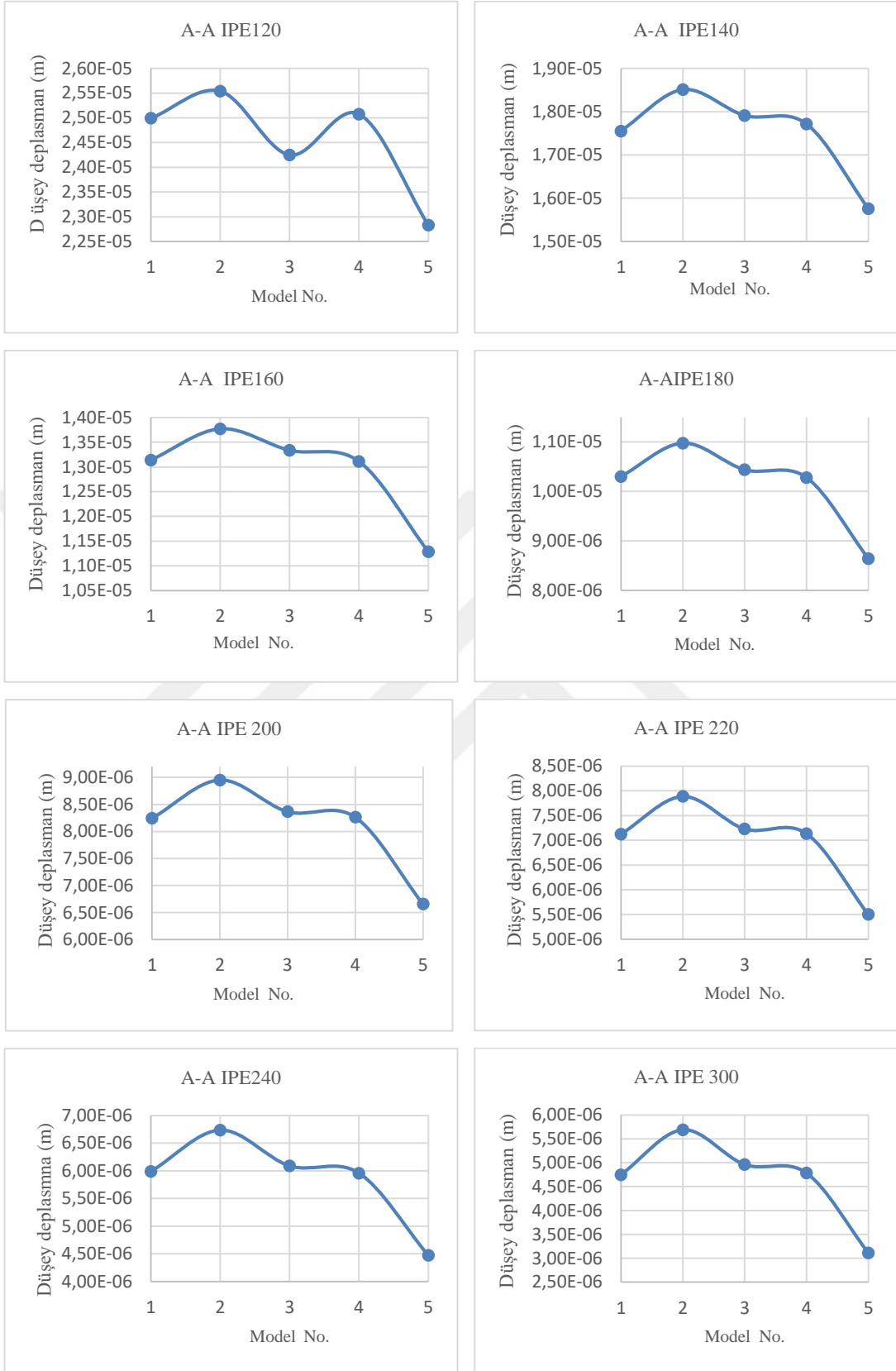
Tablo 6'dan da görüldüğü gibi gövde boşluk tipinin geometrisi petek kirişlerin toplam yer değiştirmelerine önemli oranda etki yapmaktadır. Ankastre – Ankastre, Ankastre – sabit, ankastre- serbest mesnetli durumlarda IPE120 profili için en düşük toplam yer değiştirmeler sırasıyla boşluksuz ve gövdesinde beşgen boşluğu olan

kirişlerde oluşmaktadır. IPE120 profilli petek kirişinde, oluşan en büyük toplam yer değiştirmeler ise kare biçimli boşluk tipi kullanıldığında meydana gelmektedir.

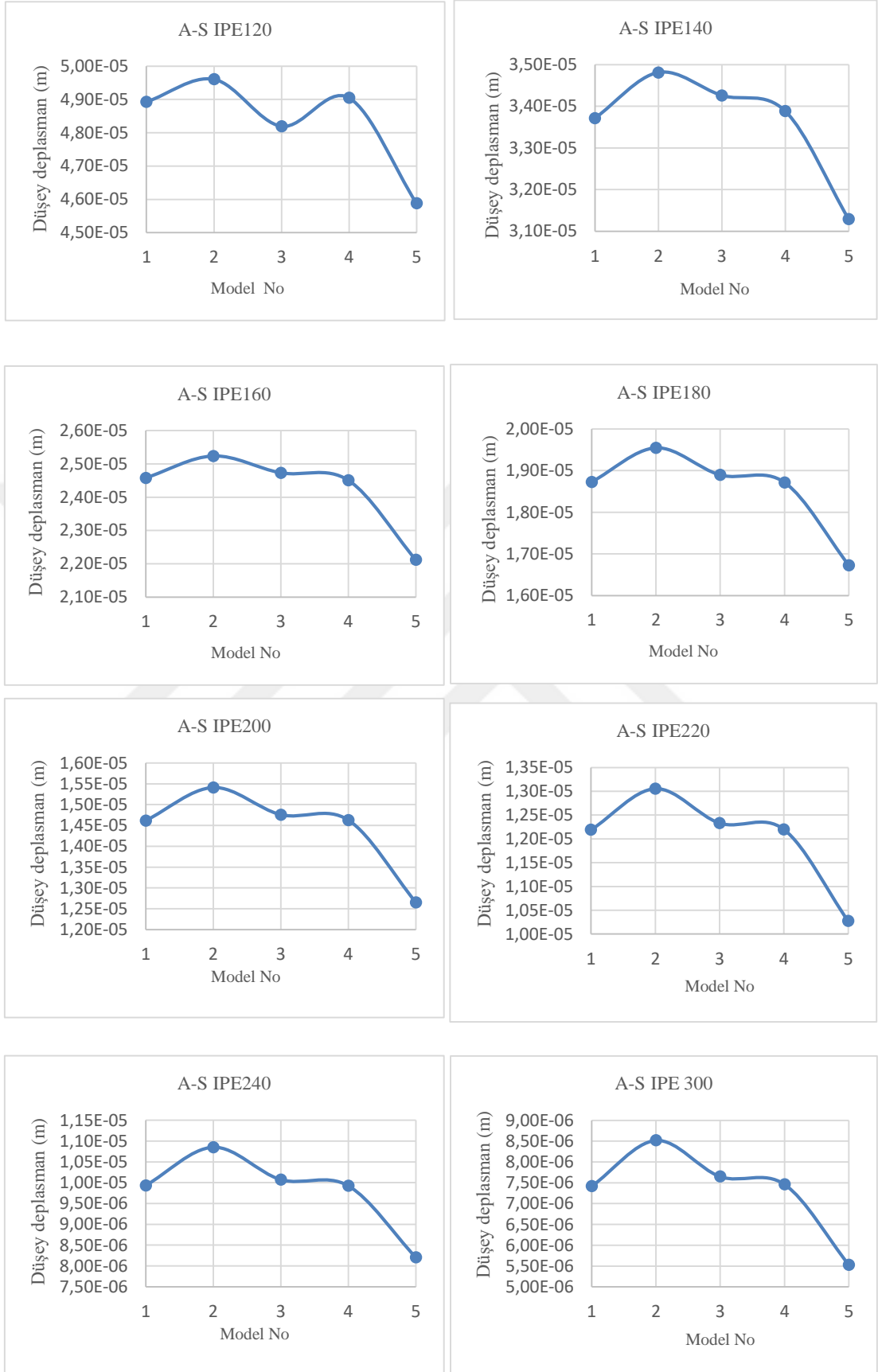
Tüm mesnet koşullarında IPE140, IPE 160, IPE 180, IPE200, IPE220, IPE240 ve IPE300 tipi profillerden yapılmış petek kirişlerinde ise en düşük toplam yer değiştirmeler sırasıyla gövdesinde boşluksuz ve dairesel boşluklu durumlarda gözlemlenmiştir. Önceki profil tipine benzer şekilde bu durumlarda da en büyük toplam yer değiştirmeler kare boşluklu petek kirişinde oluşmaktadır.

Mesnet durumları karşılaştırıldığında ise en düşük toplam yer değiştirmeler iki ucu ankastre mesnetli petek kirişlerinde oluşurken en büyük toplam yer değiştirmeler ise konsol tipi petek kirişlerinde oluşmaktadır.

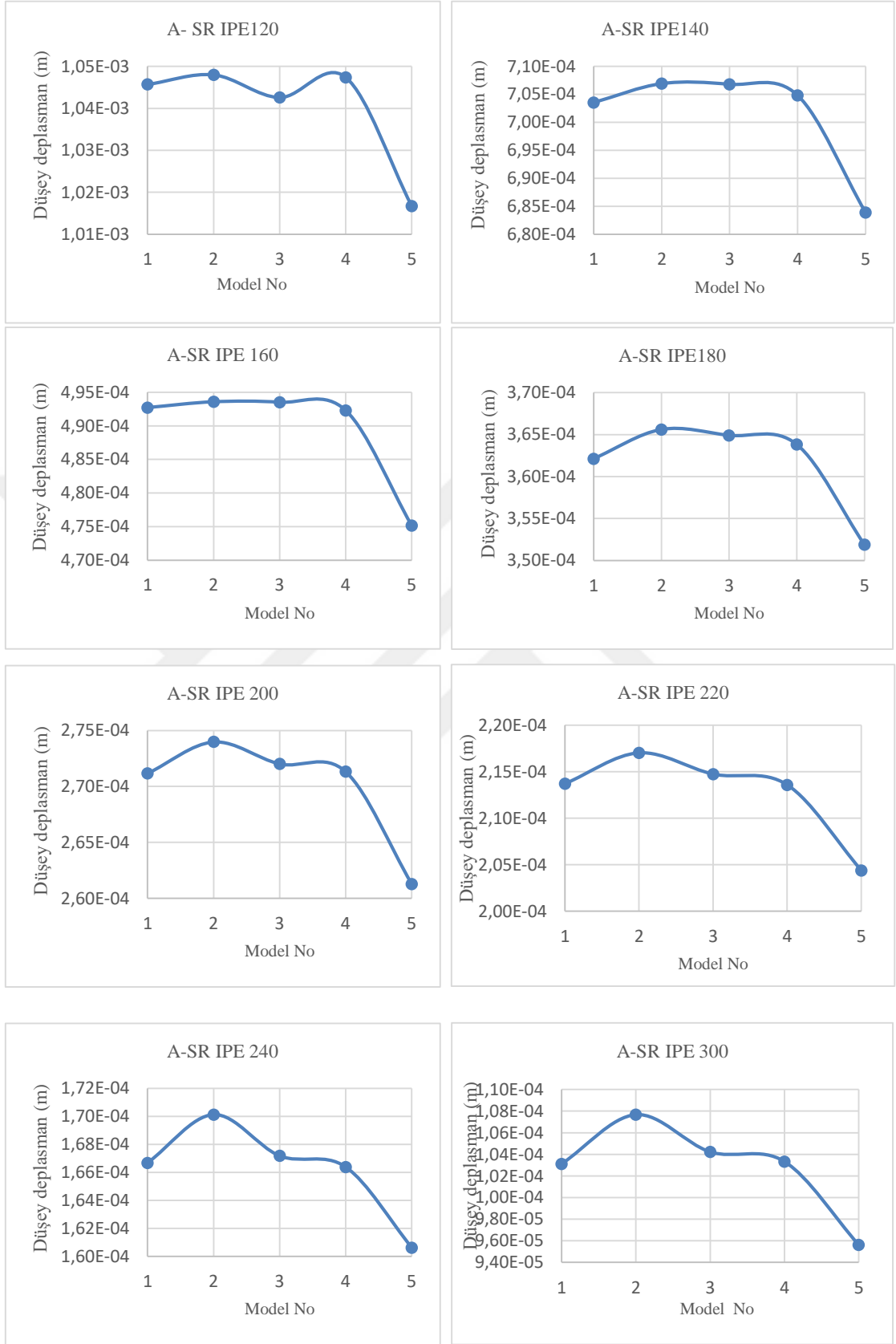
Elde edilen sonuçların daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Tablo 6’da verilen sonuçlar, şekil (28-30) ve şekil (37-39) arasında IPE120, IPE180 ve IPE 240 profillerinin ankastre – ankastre mesnetli durumu için çizilmiştir.



Şekil 28. Ankastre – Ankastre mesnet durumu için profil tipine bağlı deplasman eğrileri



Ŗekil 29. Ankastre - Sabit mesnet durumu için profil tipine bağlı deplasman eğrileri



Şekil 30. Ankastre – Serbest mesnet durumu için profil tipine bağlı deplasman eğrileri

Şekil (28 – 30) incelendiğinde mesnet boşluk tipi ve mesnet koşulları için daha önce yapılan yorumların benzeri yapılabilir. Mesnet koşullarına bağlı olarak en büyük yer değiştirmeler sırasıyla ankastre – serbest, ankastre – sabit ve ankastre – ankastre mesnetli kirişlerde oluşmaktadır.

3.1.2. Gerilme Analizi

Tezin bu bölümünde ise ANSYS ile yapılan üç boyutlu sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen gerilme değerleri sunulacaktır.

3.1.2.1. von-Mises gerilemleri

Statik analizi için yukarıda verilen kesit profilleri ve mesnet koşulları için en büyük von-Mises gerilemleri elde edilmiş olup Tablo 7 'de listelenmiştir.

Tablo 7.En büyük von Mises gerilme değerleri (Pa)

Profil Tipi	Model No	Gövde boşluğunun geometrisi	En büyük von Mises gerilmesi (Pa)		
			Ankastre - Ankastre	Ankastre - Sabit	Ankastre – Serbest
IPE120	I	Dairesel	1.107E+06	1.403E+06	5.759E+06
	II	Kare	1.428E+06	1.914E+06	5.689E+06
	III	Beşgen	1.081E+06	1.378E+06	5.711E+06
	IV	Altıgen	1.661E+06	2.173E+06	6.874E+06
	V	Boşluksuz	1.021E+06	1.526E+06	6.123E+06
IPE140	I	Dairesel	9.551E+05	1.291E+06	4.461E+06
	II	Kare	1.503E+06	1.866E+06	4.468E+06
	III	Beşgen	1.344E+06	1.804E+06	5.665E+06
	IV	Altıgen	1.433E+06	1.864E+06	5.501E+06
	V	Boşluksuz	7.801E+05	1.146E+06	4.606E+06
IPE160	I	Dairesel	9.555E+05	1.252E+06	3.469E+06
	II	Kare	1.215E+06	1.617E+06	3.561E+06
	III	Beşgen	1.479E+06	1.984E+06	4.855E+06
	IV	Altıgen	1.204E+06	1.643E+06	4.529E+06
	V	Boşluksuz	6.598E+05	9.334E+05	3.725E+06
IPE180	I	Dairesel	8.556E+05	1.061E+06	2.912E+06
	II	Kare	1.040E+06	1.229E+06	2.932E+06
	III	Beşgen	1.286E+06	1.242E+06	2.861E+06
	IV	Altıgen	1.105E+06	1.443E+06	3.702E+06
	V	Boşluksuz	5.666E+05	8.498E+05	3.338E+06
IPE200	I	Dairesel	8.138E+05	1.024E+06	2.521E+06
	II	Kare	9.436E+05	1.229E+06	2.525E+06
	III	Beşgen	9.095E+05	1.153E+06	2.493E+06
	IV	Altıgen	1.004E+06	1.246E+06	3.048E+06
	V	Boşluksuz	4.567E+05	6.659E+05	2.628E+06

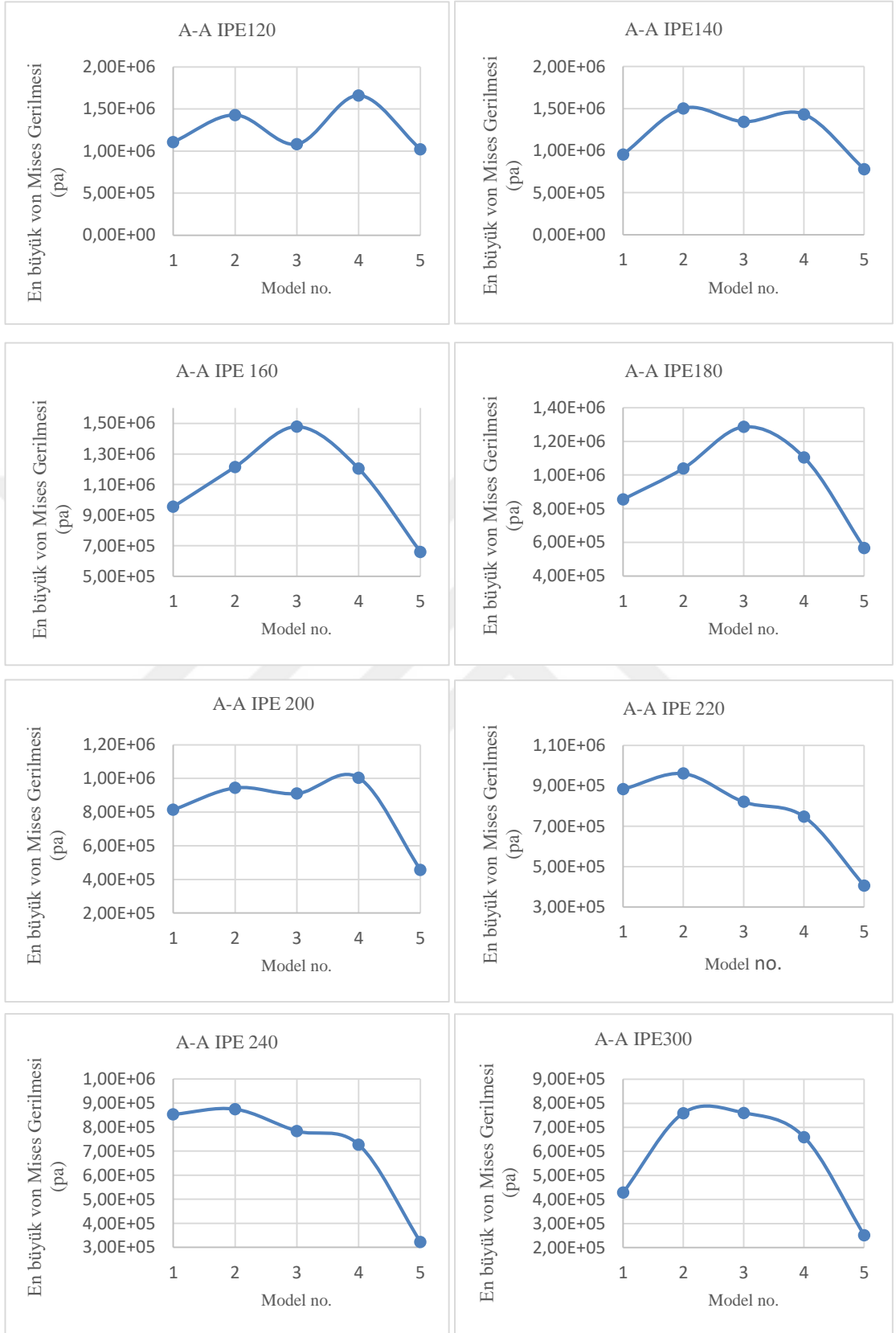
IPE220	I	Dairesel	8.835E+05	1.100E+06	2.174E+06
	II	Kare	9.604E+05	1.232E+06	2.424E+06
	III	Beşgen	8.204E+05	1.055E+06	2.134E+06
	IV	Altıgen	7.475E+05	9.806E+05	2.132E+06
	V	Boşluksuz	4.067E+05	5.906E+05	2.328E+06
IPE240	I	Dairesel	8.531E+05	1.076E+06	1.998E+06
	II	Kare	8.748E+05	1.132E+06	2.212E+06
	III	Beşgen	7.840E+05	1.003E+06	2.037E+06
	IV	Altıgen	7.272E+05	9.242E+05	1.930E+06
	V	Boşluksuz	3.225E+05	4.622E+05	4.861E+05
IPE300	I	Dairesel	4.289E+05	1.081E+06	1.988E+06
	II	Kare	7.593E+05	1.049E+06	2.125E+06
	III	Beşgen	7.602E+05	9.263E+05	1.727E+06
	IV	Altıgen	6.597E+05	8.414E+05	1.588E+06
	V	Boşluksuz	2.518E+05	4.411E+05	1.337E+06

Tablo 7’den de görüldüğü gibi gövde boşluk geometrisinin kirişlerde oluşan von-Mises gerilmeleri üzerinde önemli etkisi vardır. Ankastre – Ankastre , Ankastre – sabit ve Ankastre – serbest mesnet durumları için IPE120 profilinde en küçük von Mises gerilmeleri sırasıyla dolu gövdeli ve beşgen tipi boşluk kullanıldığında oluşurken en büyük von Mises gerilme değerlerinin ise altıgen boşluk tipinin kullanıldığı petek kirişler olduğu görülmüştür. IPE140 tipi profili için ise en küçük von Mises gerilmeleri sırasıyla dolu gövdeli kesit ve daireysel boşluklu kirişlerde meydana gelmektedir. Bu profil için ise en büyük von Mises gerilmeleri ankastre – ankastre ve ankastre – sabit mesnetli kiriş için kare boşluk tipinde, konsol kiriş için ise beşgen boşluk tipinde meydana gelmektedir. IPE160 profili için ise en küçük von Mises gerilmeleri sırasıyla dolu gövdeli ve daireysel boşluklu petek kirişlerinde oluşmakta olup en büyük von Mises gerilmeleri ise beşgen tipi boşluklu petek kirişlerinde meydana gelmektedir.

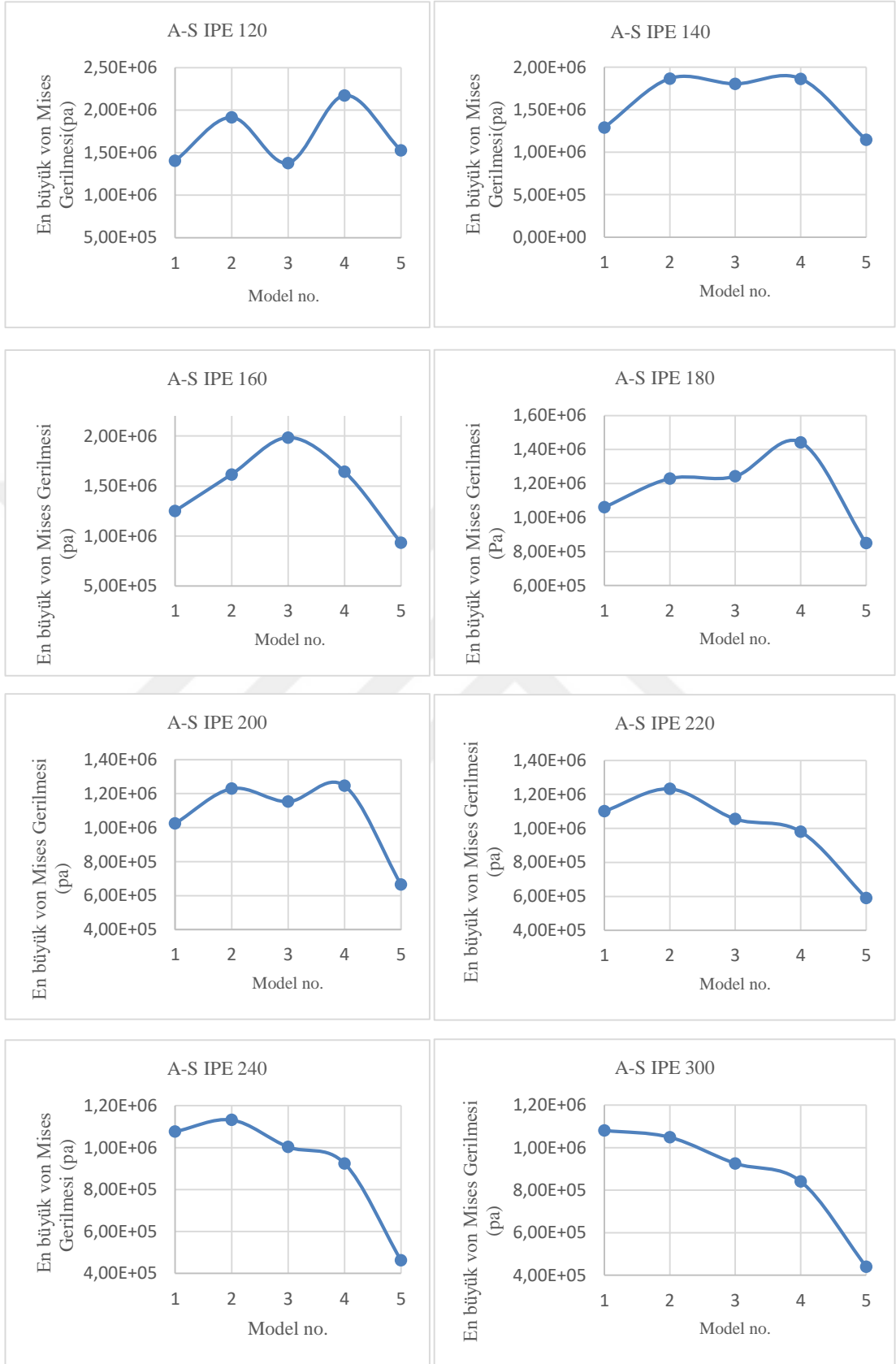
IPE180 profili için en küçük von-Mises gerilmeleri ankastre-ankastre ve ankastre- sabit mesnet durumları sırasıyla dolu gövdeli kesit ve daireysel boşluklu petek kirişinde, konsol kirişinde ise beşgen boşluklu petek kirişinde meydana gelmektedir. Bu profil tipi için en büyük von Mises gerilmeleri mesnet durumlarına göre değişiklik göstermektedir, şöyle ki; ankastre- ankastre mesnetli durumu için von Mises gerilme değerleri beşgen boşluk tipinde, ankastre – sabit ve ankastre – serbest mesnetli durumlarda ise en büyük von Mises gerilme değerleri altıgen tipi boşluk kullanıldığına oluşmaktadır.

İki ucu ankastre mesnetli ve ankastre – sabit IPE200 profilli petek kirişinde von Mises gerilme değerleri sırasıyla dolu gövde ve dairesel boşluk tipinde en küçük değerleri alırken, konsol tipi petek kirişinde ise en küçük von Mises gerilme değerleri beşgen tipi boşluk durumunda hesaplanmıştır. IPE200 profilinin tüm mesnetli durumları için en büyük von Mises gerilme değerleri altıgen tipi boşluk tipi kullanıldığında olduğu saptanmıştır. IPE220 ve IPE240 profillerinin tüm mesnet koşulları için en küçük von Mises gerilmeleri sırasıyla dolu gövdeli ve altıgen boşluklu petek kirişlerinde olduğu ortaya çıkarılmıştır. En büyük von Mises gerilmeleri ise kare tipi boşluk tipi kullanıldığı durumunda oluşmaktadır.

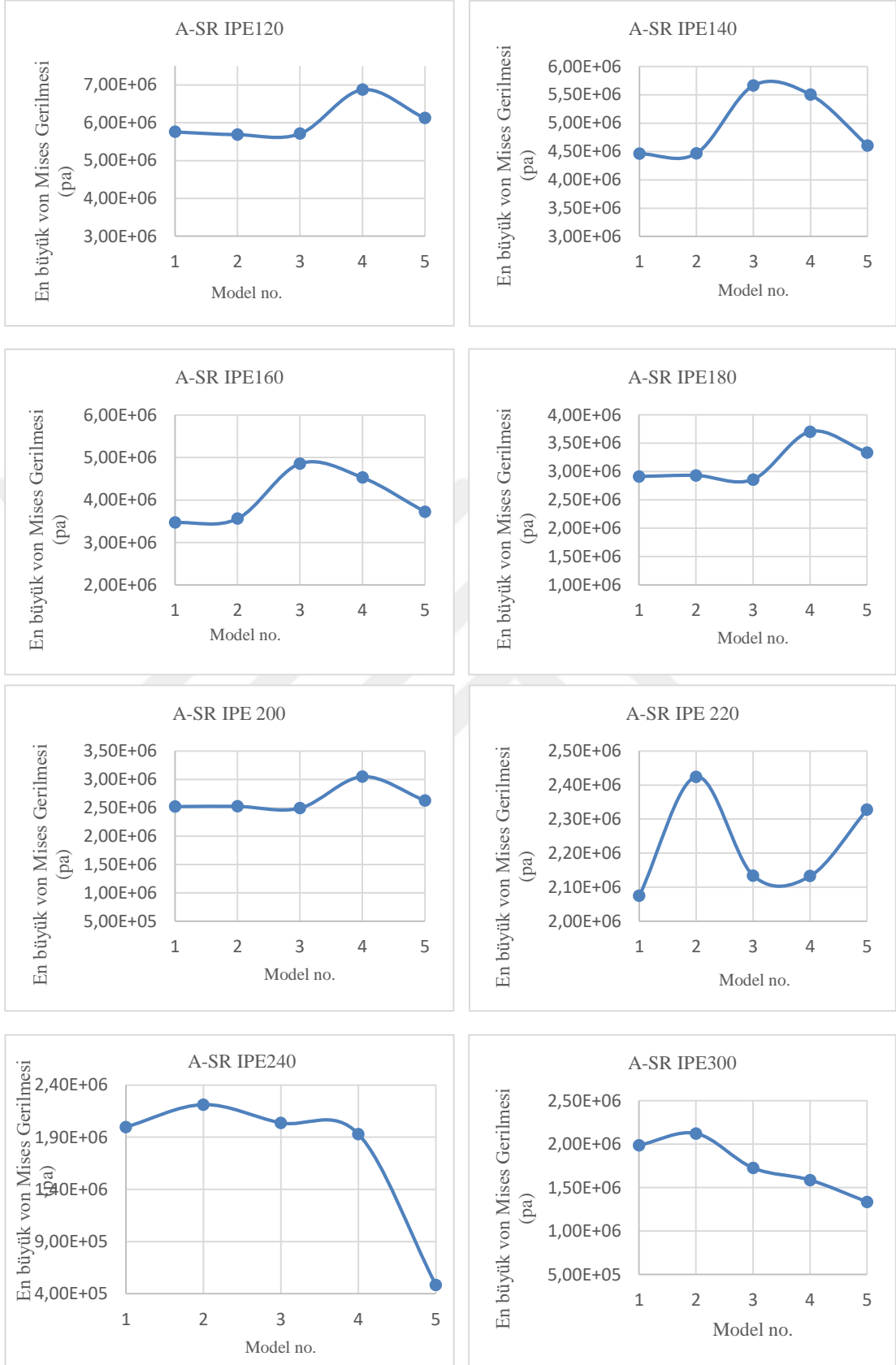
Ankastre- ankastre mesnetli IPE300 profili için en küçük von Mises gerilmeleri sırasıyla dolu gövdeli ve dairesel boşluk tipinde meydana gelirken ankastre – sabit ve ankastre – serbest mesnetli durumlarında en küçük gerilme değerleri altıgen boşluk tipinde oluşmaktadır. IPE300 profil için en büyük von Mises gerilmeleri ankastre – ankastre mesnetli durum için beşgen boşluk tipinde, ankastre – sabit mesnet durumunda dairesel boşluk tipinde ve konsol kiriş için ise kare boşluk tipi kullanıldığında oluşmuştur. Gerilme sonuçlarının daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Tablo 7’de verilen gerilme değerleri şekil (31-33) ’de ve ankastre – sabit mesnetli IPE120, IPE180 ile IPE240 kirişler için şekil (40 -42)’de çizilmiştir.



Şekil 31. Ankastre - Ankastre mesnet durumu için elde edilen en büyük von Mises gerilme grafikleri



Şekil 32.Ankastre - Sabit mesnet durumu için elde edilen en büyük von Mises gerilme grafikleri



Şekil 33.Ankastre - Serbest mesnet durumu için elde edilen en büyük von Mises gerilme grafikleri

Şekil (31 -33) incelendiğinde mesnet türlerinin en büyük von – Mises gerilme sonuçları üzerine etkisi görülebilir. En büyük von-Mises gerilmeleri konsol kirişte ve en küçük von – Mises gerilmeleri ise Ankastre – Ankastre mesnet durumunda olduğu bulunmuştur.

3.1.2.2. Maksimum kayma gerilimi

Statik analizi için yukarıda verilen kesit profilleri ve mesnet koşulları için en büyük maksimum kayma gerilmeleri elde edilmiş olup Tablo 8’de listelenmiştir.

Tablo 8.Petek kirişleri için elde edilen en büyük kayma gerilmesi değerleri(pa).

Profil Tipi	Model No	Gövde boşluk geometrisi	En büyük maksimum kayma gerilmesi (pa)		
			Ankastre - Ankastre	Ankastre - Sabit	Ankastre – Serbest
IPE120	I	Dairesel	5.622E+05	7.044E+05	2.806E+06
	II	Kare	7.895E+05	1.057E+06	2.880E+06
	III	Beşgen	5.903E+05	7.195E+05	2.875E+06
	IV	Altıgen	8.669E+05	1.142E+06	3.554E+06
	V	Boşluksuz	5.274E+05	7.873E+05	3.146E+06
IPE140	I	Dairesel	4.823E+05	6.519E+05	2.266E+06
	II	Kare	7.944E+05	9.978E+05	2.268E+06
	III	Beşgen	7.161E+05	9.603E+05	3.107E+06
	IV	Altıgen	7.554E+05	9.761E+05	2.872E+06
	V	Boşluksuz	4.019E+05	5.928E+05	2.367E+06
IPE160	I	Dairesel	4.783E+05	6.265E+05	1.770E+06
	II	Kare	6.678E+05	8.884E+05	1.933E+06
	III	Beşgen	7.937E+05	1.065E+06	2.590E+06
	IV	Altıgen	6.357E+05	8.670E+05	2.362E+06
	V	Boşluksuz	3.476E+05	4.846E+05	1.925E+06
IPE180	I	Dairesel	4.301E+05	5.402E+05	1.494E+06
	II	Kare	5.792E+05	6.824E+05	1.499E+06
	III	Beşgen	6.845E+05	6.788E+05	1.520E+06
	IV	Altıgen	5.861E+05	7.666E+05	1.963E+06
	V	Boşluksuz	3.029E+05	4.563E+05	1.780E+06
IPE200	I	Dairesel	4.098E+05	5.180E+05	1.291E+06
	II	Kare	5.271E+05	6.868E+05	1.377E+06
	III	Beşgen	4.979E+05	6.257E+05	1.323E+06
	IV	Altıgen	5.282E+05	6.551E+05	1.610E+06
	V	Boşluksuz	2.422E+05	3.506E+05	1.371E+06
IPE220	I	Dairesel	4.443E+05	5.586E+05	1.082E+06
	II	Kare	5.347E+05	6.852E+05	1.351E+06
	III	Beşgen	4.450E+05	5.619E+05	1.153E+06
	IV	Altıgen	3.815E+05	4.991E+05	1.139E+06
	V	Boşluksuz	2.173E+05	3.142E+05	1.225E+06
IPE240	I	Dairesel	4.285E+05	5.435E+05	1.013E+06
	II	Kare	4.840E+05	6.265E+05	1.234E+06
	III	Beşgen	4.155E+05	5.414E+05	1.112E+06

IPE300	IV	Altıgen	3.837E+05	4.993E+05	1.019E+06
	V	Boşluksuz	1.685E+05	2.410E+05	9.218E+05
	I	Dairesel	4.289E+05	5.481E+05	1.014E+06
	II	Kare	4.166E+05	5.751E+05	1.177E+06
	III	Beşgen	3.321E+05	4.685E+05	8.849E+05
	IV	Altıgen	3.884E+05	4.310E+05	8.415E+05
	V	Boşluksuz	1.323E+05	2.419E+05	6.982E+05

Von-Mises gerilmelerinde olduğu gibi boşluk tipi petek kirişlerinde oluşan maksimum kayma gerilmelerini de etkilemektedir. IPE120 profili için en küçük maksimum kayma gerilmesi ankastre-ankastre mesnetli durumda sırasıyla dolu gövdeli kesit ve dairesel boşluklu petek kirişinde, ankastre - sabit ve konsol kirişinde ise dairesel boşluklu petek kirişinde meydana gelmektedir. En büyük maksimum kayma gerilme değerleri ise altıgen tipi boşlukta meydana gelmektedir.

IPE140 profili için en küçük maksimum kayma gerilmesi ankastre-ankastre ve ankastre - sabit mesnet durumları sırasıyla dolu gövdeli kesit ve dairesel boşluklu petek kirişinde, konsol kirişinde ise dairesel boşluklu petek kirişinde meydana gelmektedir. Bu profil tipi için en büyük maksimum kayma gerilmesi mesnet durumlarına göre değişiklik göstermektedir, şöyle ki; ankastre- ankastre ve ankastre – sabit mesnetli durumu için en büyük maksimum kayma gerilmesi kare boşluk tipinde, ankastre – serbest mesnetli durumlarda ise en büyük maksimum kayma gerilmesi beşgen tipi boşluk kullanıldığına oluşmaktadır. IPE160 profilinde en düşük maksimum kayma gerilmeleri sırasıyla dolu gövdeli ve dairesel boşluklu petek kirişlerinde oluşmaktadır. Bu profil için en büyük maksimum kayma gerilmeleri ise beşgen tipi boşluk kullanıldığı zaman saptanmıştır.

IPE180 profili için en küçük maksimum kayma gerilmesi ankastre-ankastre ve ankastre - sabit mesnet durumları sırasıyla dolu gövdeli kesit ve dairesel boşluklu petek kirişinde, konsol kirişinde ise dairesel boşluklu petek kirişinde meydana gelmektedir. IPE180 profilinde en büyük maksimum kayma gerilmeleri mesnet koşullarına bağlı olarak değişmektedir, şöyle ki; iki ucu ankastre mesnetli kirişte en büyük maksimum kayma gerilmeleri beşgen boşluklu, ankastre – sabit ve ankastre - serbest mesnetli kirişlerde ise en büyük maksimum kayma gerilmeleri altıgen boşluklu durumda gözlemlenmiştir.

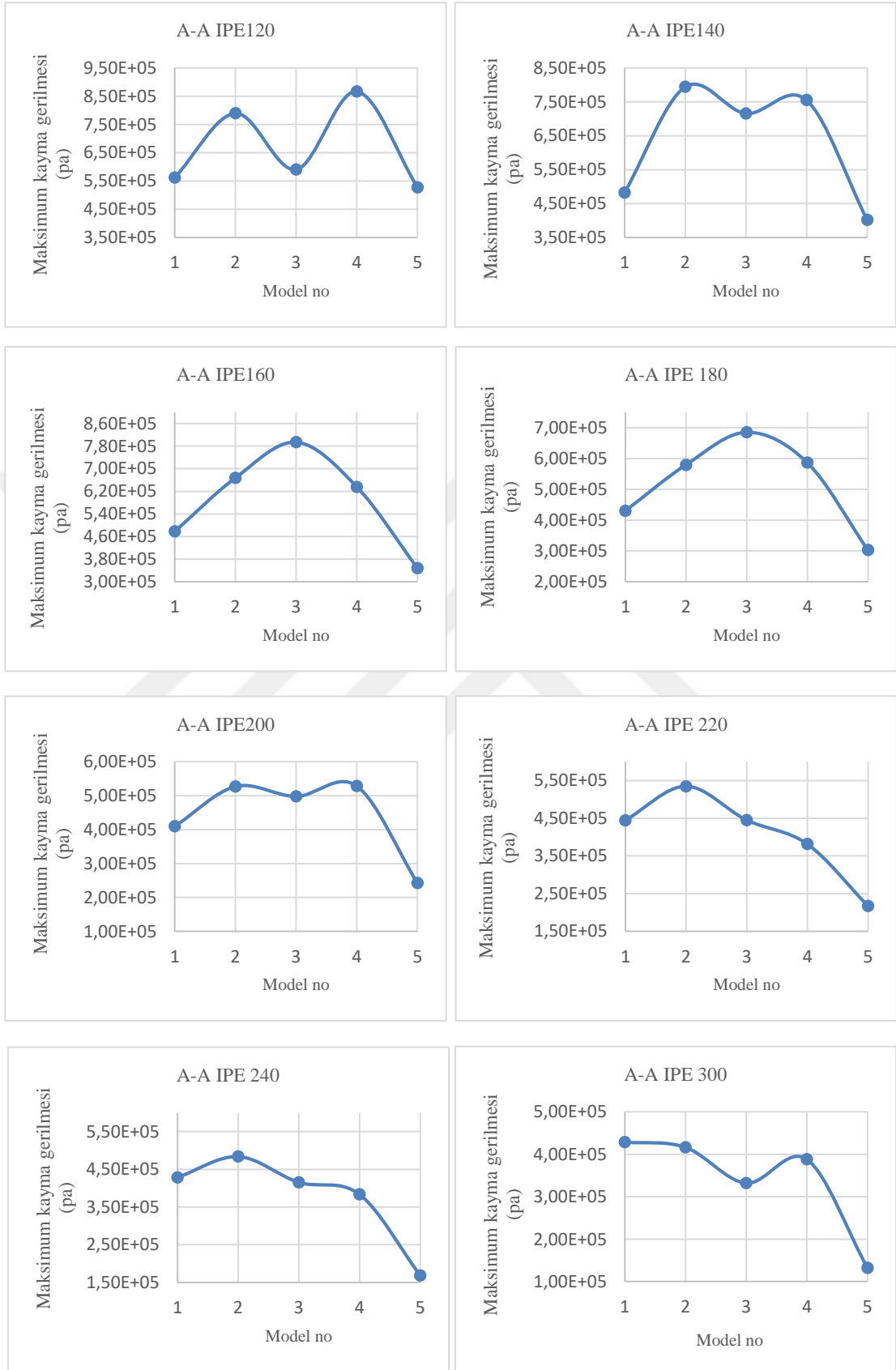
IPE200 profilli petek kirişlerde ankastre – ankastre ve ankastre – sabit mesnetli kirişlerde en düşük maksimum kayma gerilmeleri sırasıyla dolu gövdeli ve

dairesel boşluklu petek kirişlerde oluşurken konsol petek kirişinde ise en düşük maksimum kayma gerilmesi dairesele petek kirişinde elde edilmiştir. Bu profilde en büyük maksimum kayma gerilmeleri ankastre – ankastre ve ankastre – serbest mesnet durumları için altıgen boşluklu kirişte, ankastre – sabit mesnetli kiriş için ise en büyük maksimum kayma gerilmeleri kare tipi boşluk durumunda oluşmaktadır.

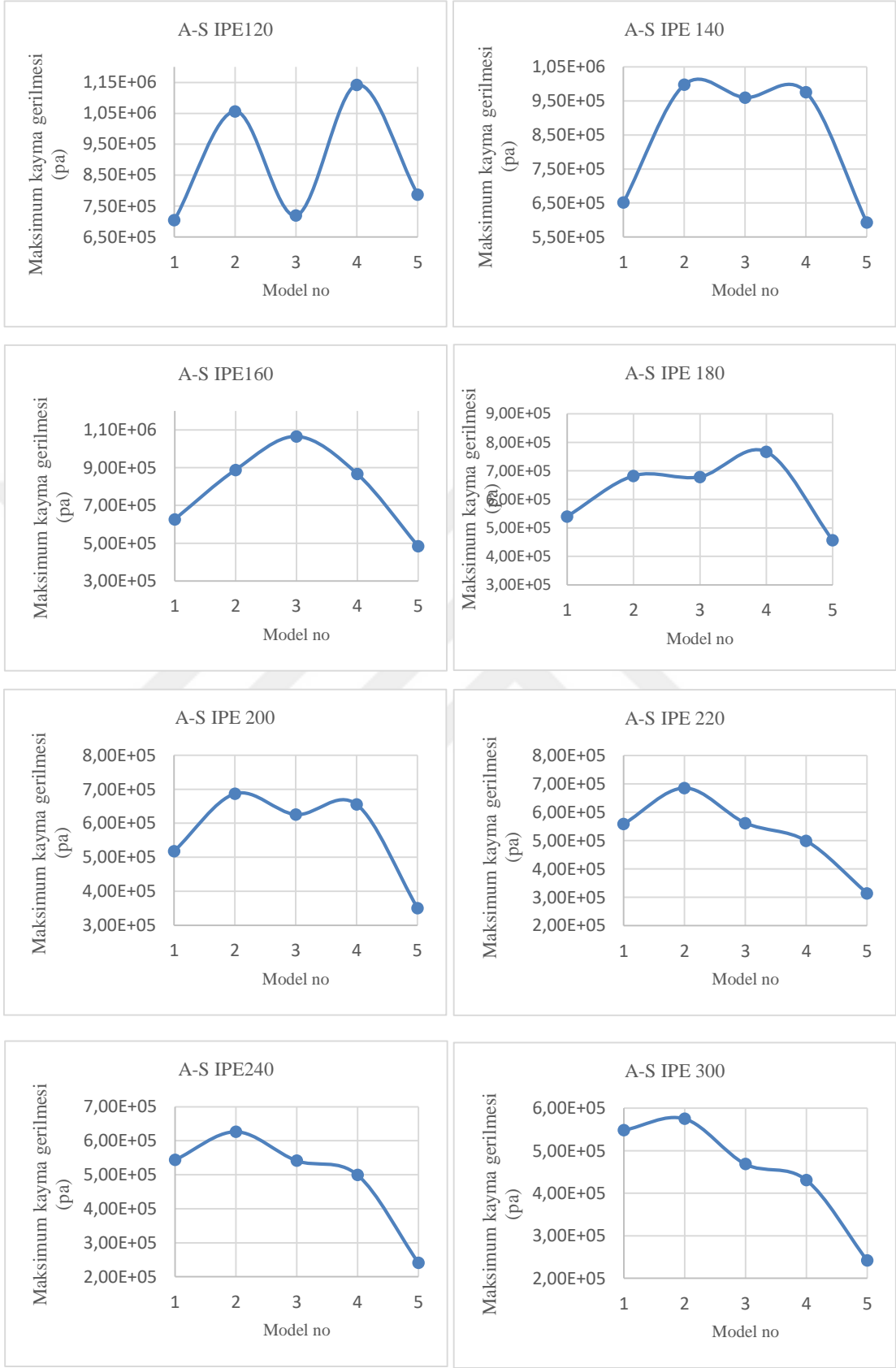
IPE220 ve IPE240 profilleri için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu iki profil için en düşük maksimum kayma gerilmeleri ankastre – ankastre ve ankastre – sabit mesnetleri için sırasıyla boşluksuz ve altıgen boşluklu ve ankastre – serbest mesnetli kiriş ise dairesele boşluklu durumlarda gözlemlenmiştir. Bu iki profil için en büyük maksimum kayma gerilme değerlerinin ise kare boşluklu petek kirişlerinde olduğu saptanmıştır. IPE300 profili için en küçük maksimum kayma gerilmeleri ankastre – ankastre mesnetli durumunda sırasıyla dolu gövdeli ve beşgen boşluklu, ankastre – sabit ve ankastre – serbest mesnetli durumlarında ise altıgen boşluklu petek kirişinde saptanmıştır. IPE300 kesitli petek kirişinde oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri de mesnet durumlarına bağlı olarak değişmektedir. Ankastre – ankastre mesnetli kirişte dairesele boşluklu durumunda diğer iki mesnetli durumda ise kare boşluklu petek kirişlerde en büyük maksimum kayma gerilmeleri gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçların daha iyi bir şekilde yorumlanabilmesi için Tablo 8’de listelenen değerler grafik formunda şekil (34 -36) ve şekil (43 – 45)’te ise ankastre - serbest mesnetli IPE120, IPE180 ve IPE240 kirişler için sunulmuştur.

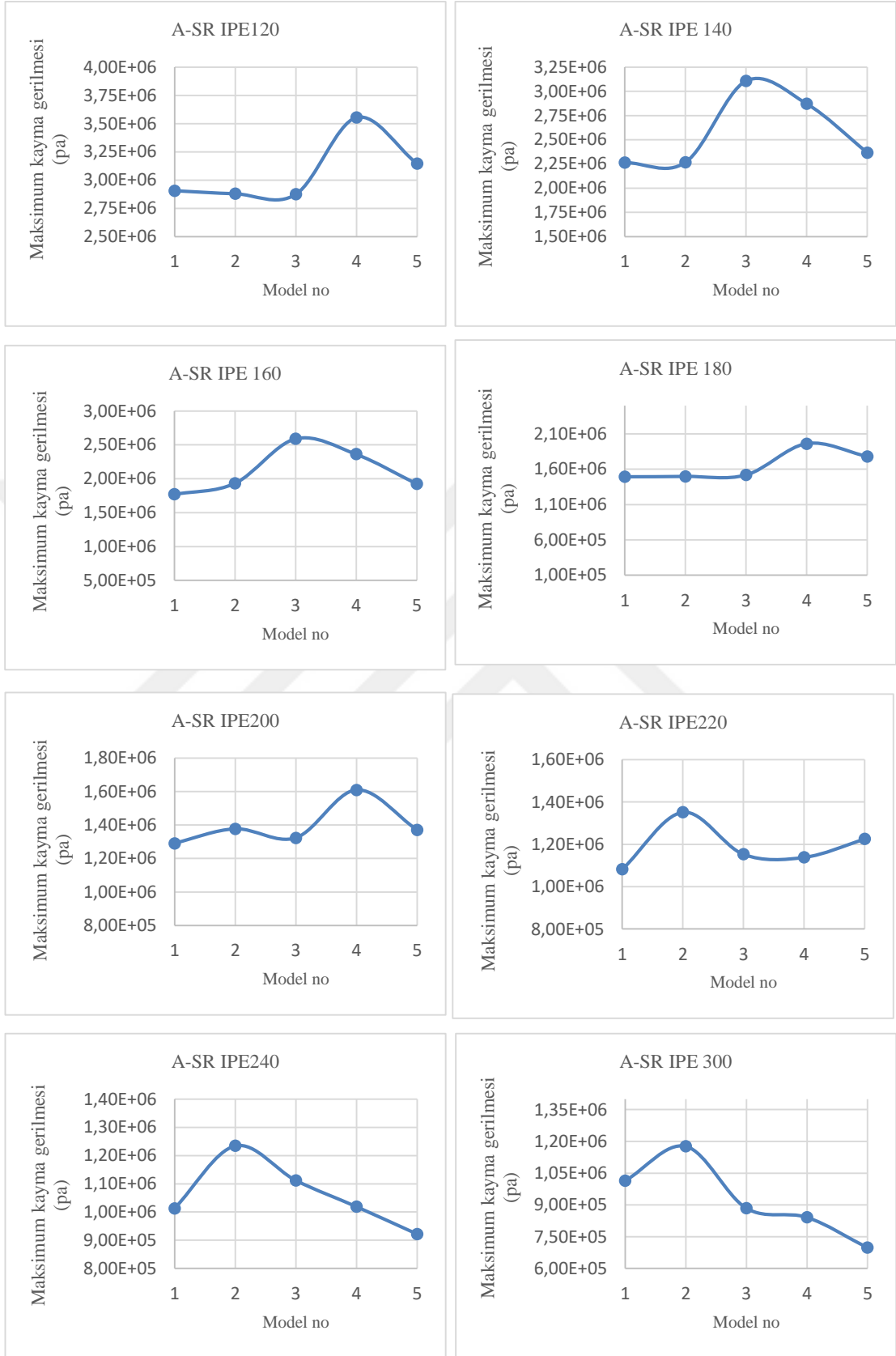
Şekil (34 -36)’dan de görüldüğü gibi mesnet türleri maksimum kayma gerilmesini etkilemektedir. En düşük kayma gerilmesi sırasıyla ankastre – ankastre , ankastre – sabit ve ankastre- serbest mesnet durumlarında oluşmaktadır.



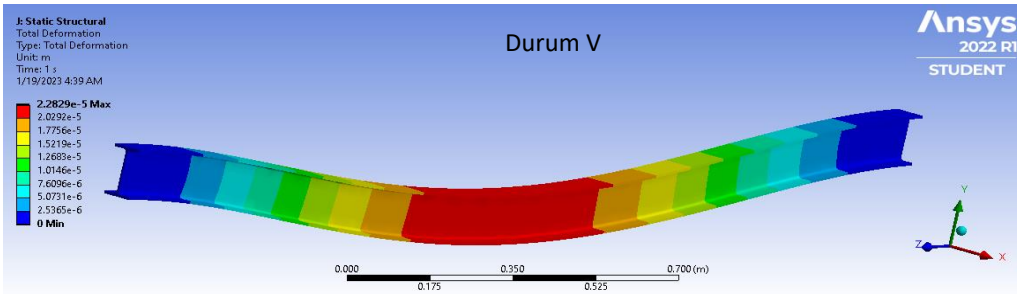
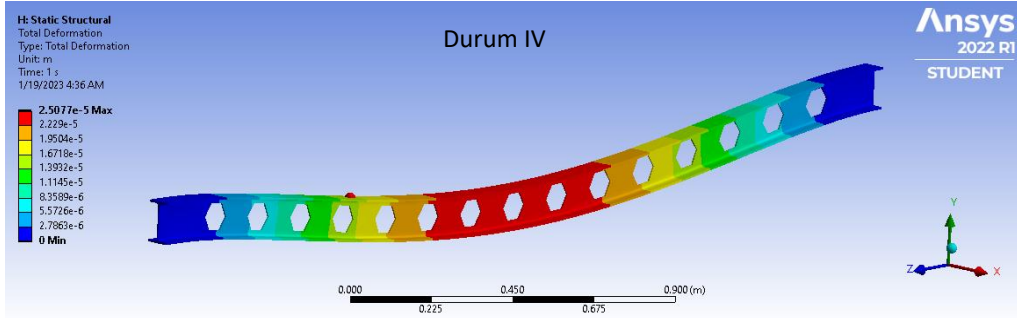
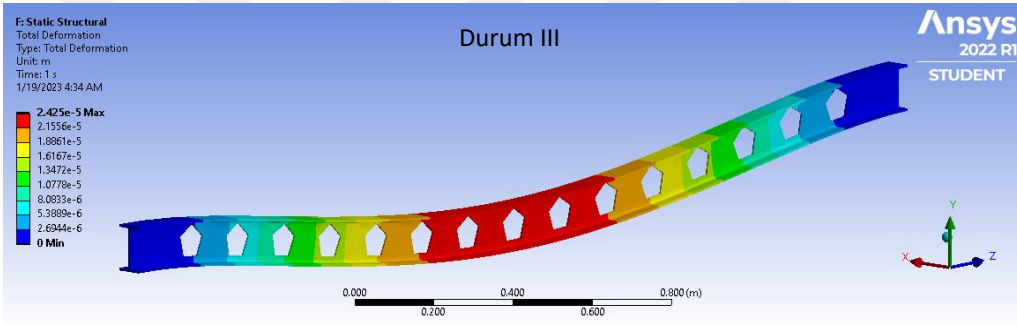
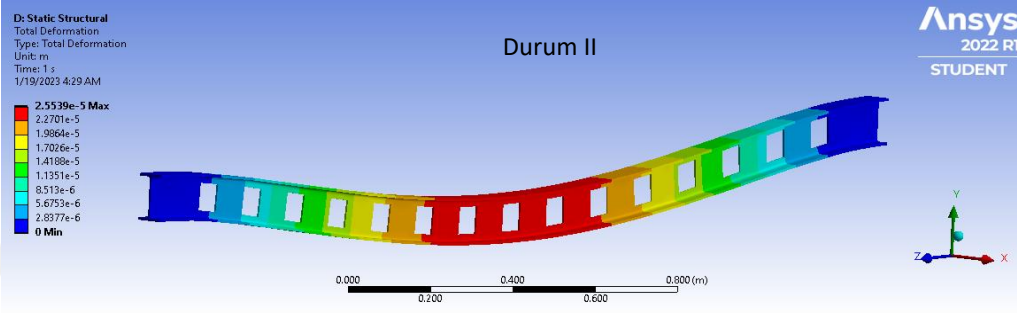
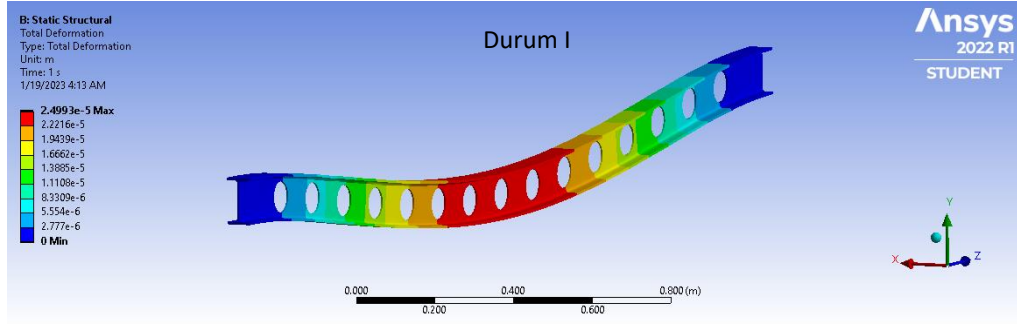
Şekil 34. Ankastre - Ankastre mesnet durumu için elde edilen en büyük maksimum kayma gerilmesi grafikleri



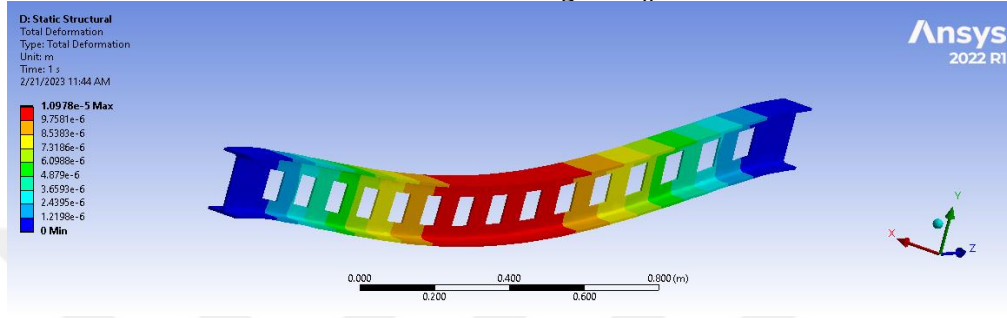
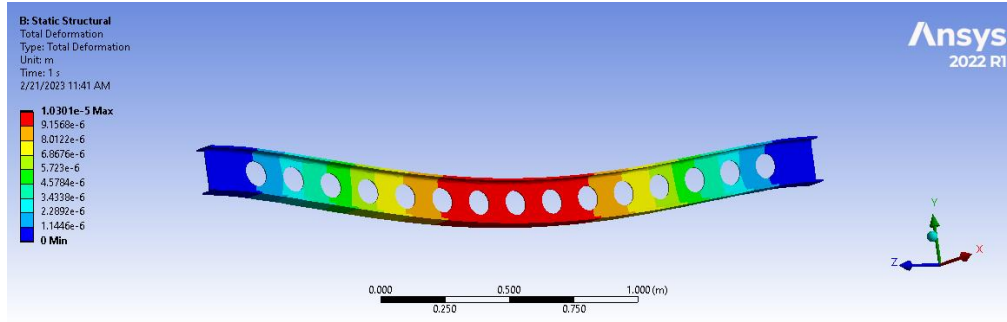
Şekil 35. Ankastre - Sabit mesnet durumu için elde edilen en büyük maksimum kayma gerilmesi grafikleri



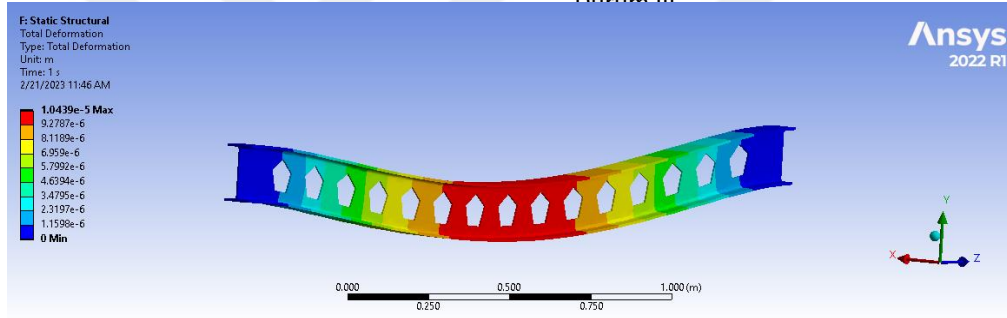
Şekil 36. Ankastre - Serbest mesnet durumu için elde edilen en büyük maksimum kayma gerilmesi grafikleri



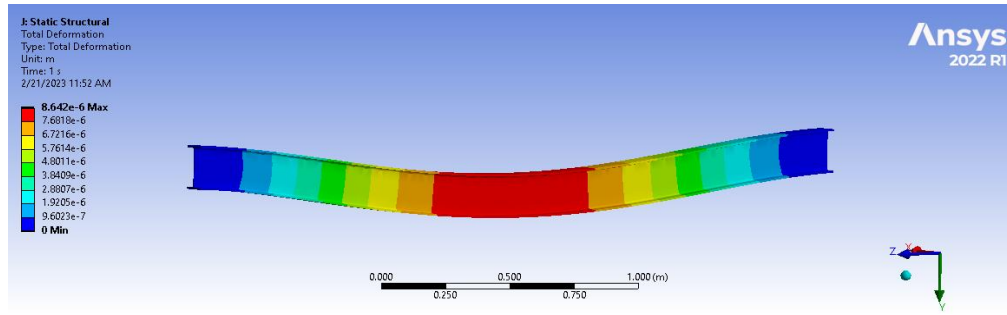
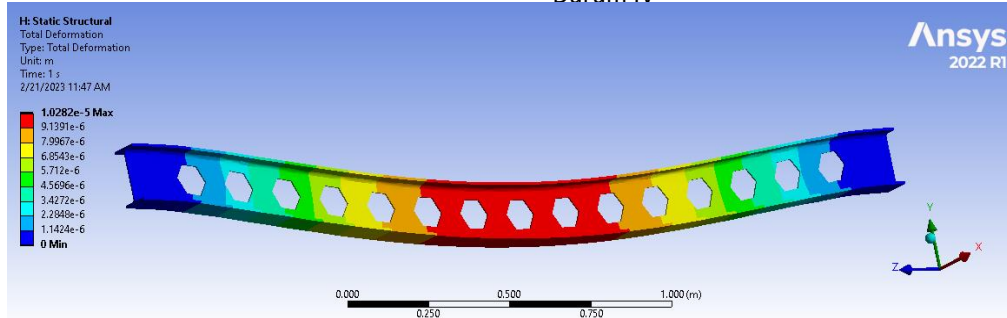
Şekil 37. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 120 - petek kirişi için toplam yer değiştirme değerleri



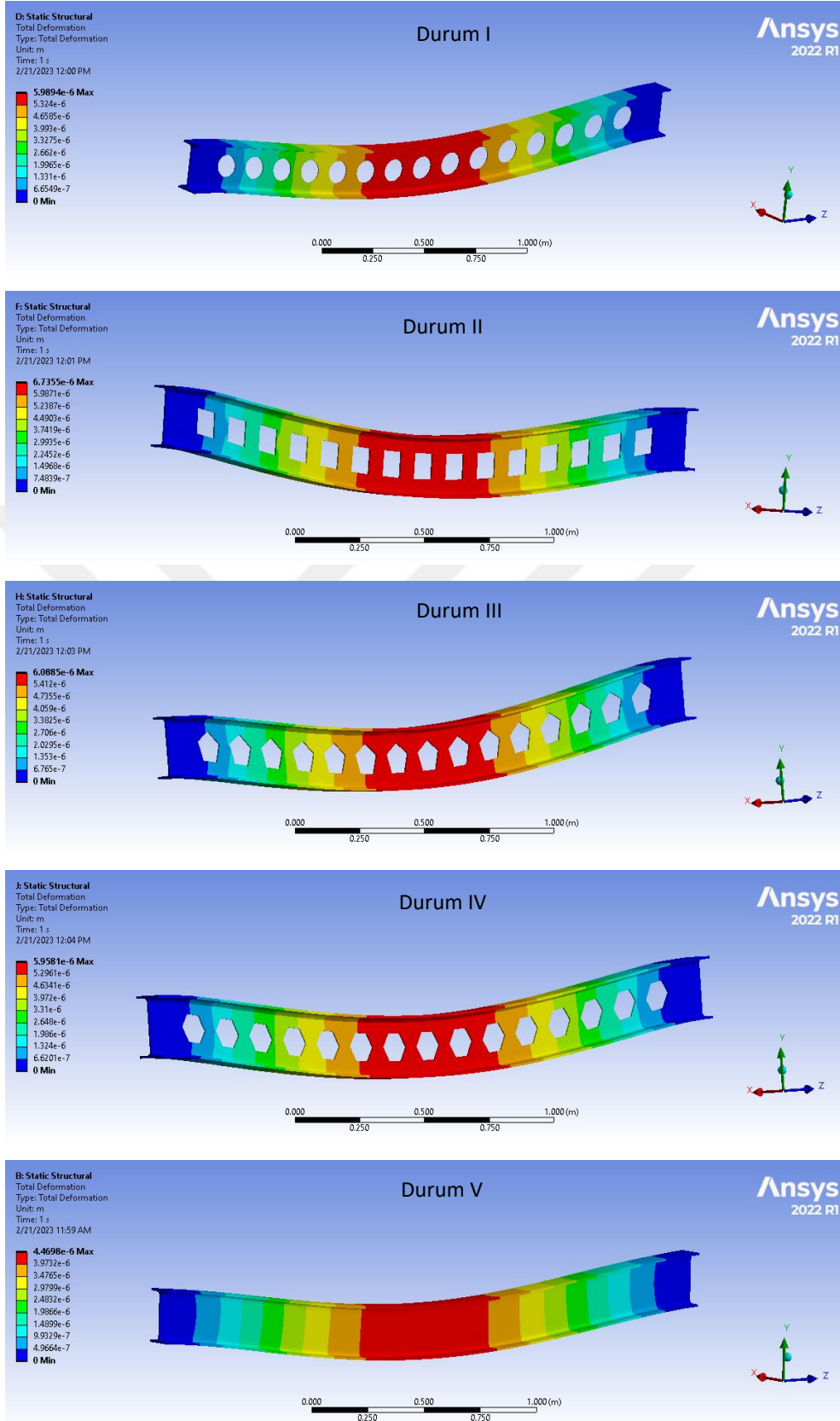
Durum III



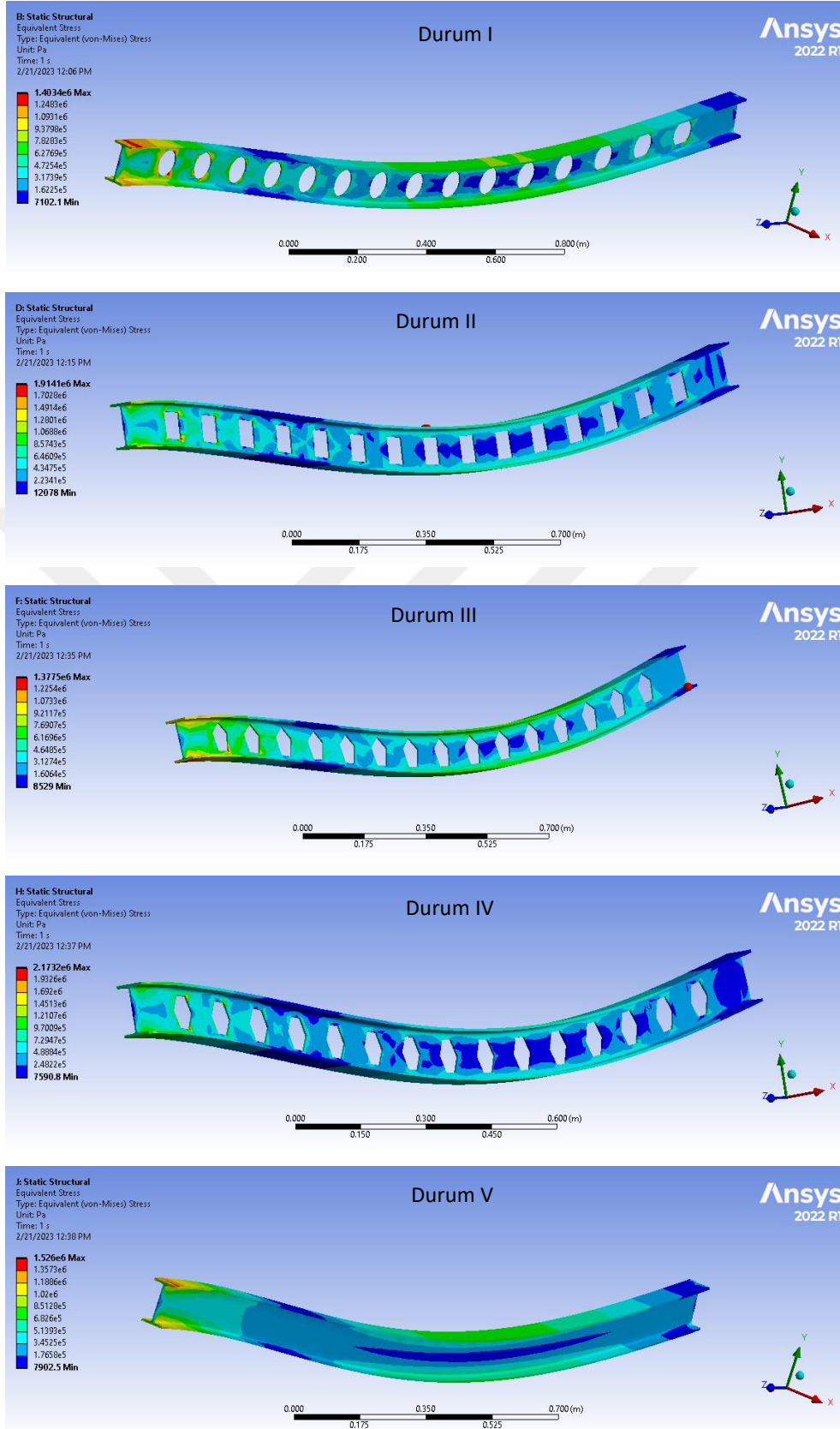
Durum IV



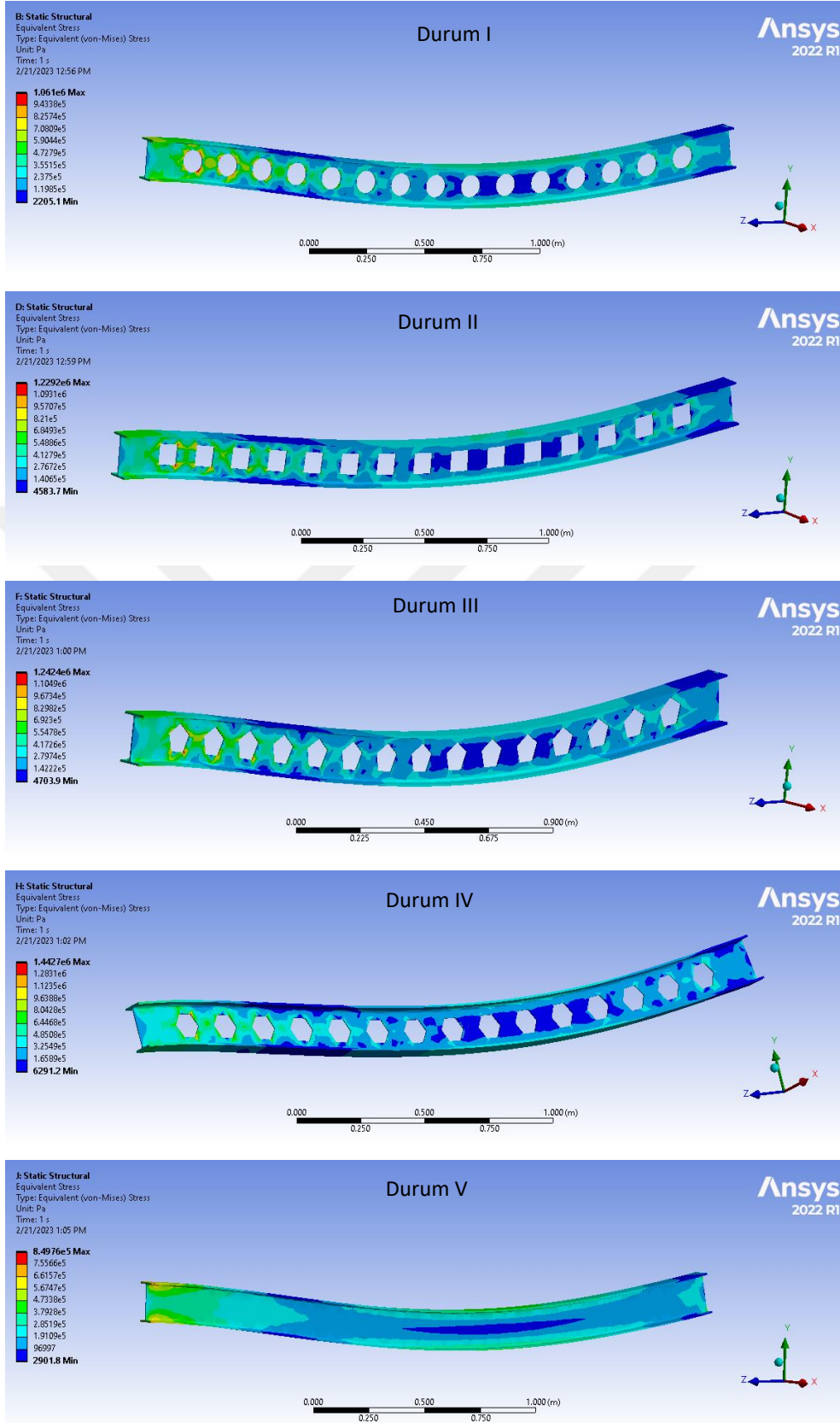
Şekil 38. Ankastré – Ankastré mesnetli IPE 180 - petek kirişi için toplam yer değıştirme değeri



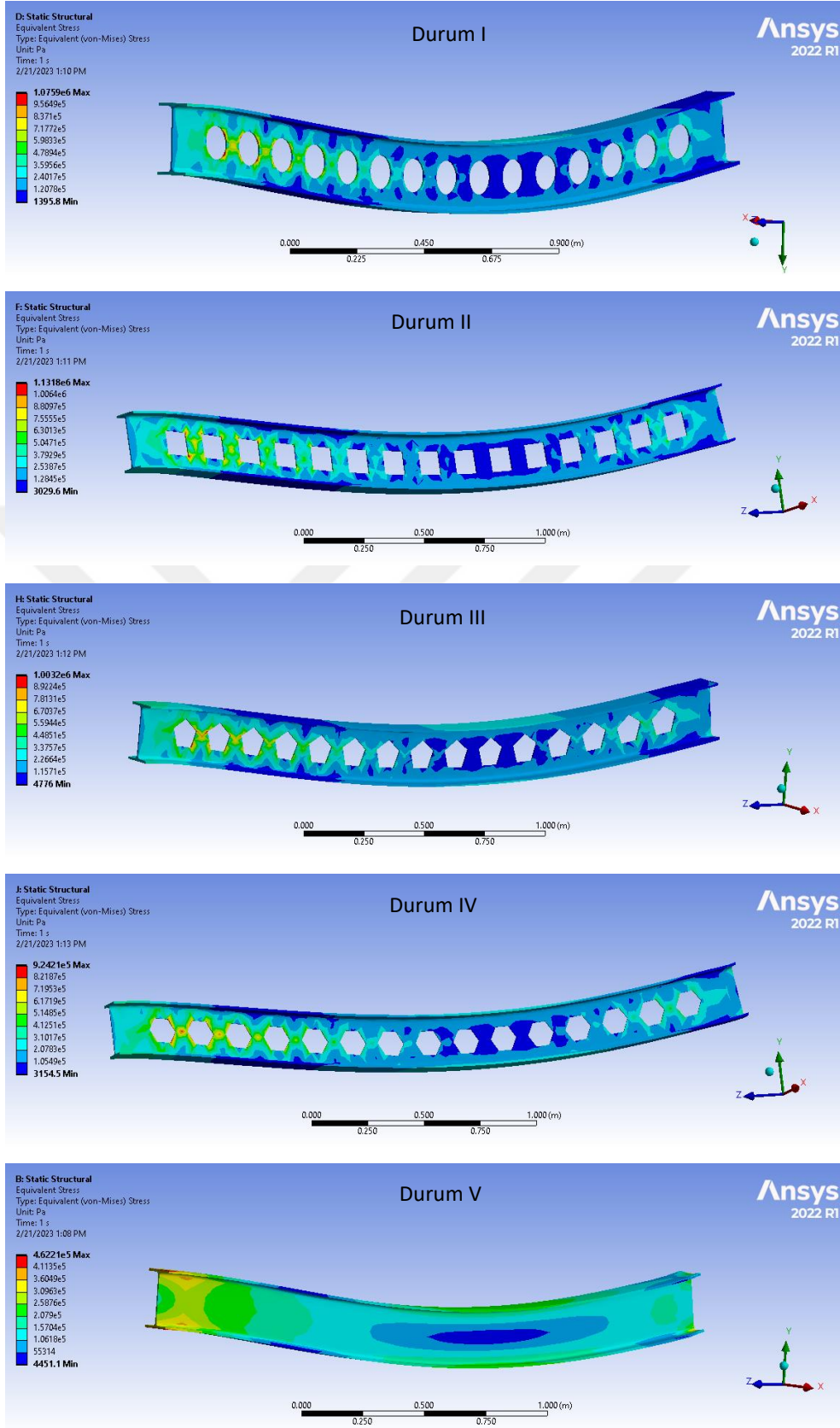
Şekil 39. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 240 - petek kirişi için toplam yer değiştirme değerleri



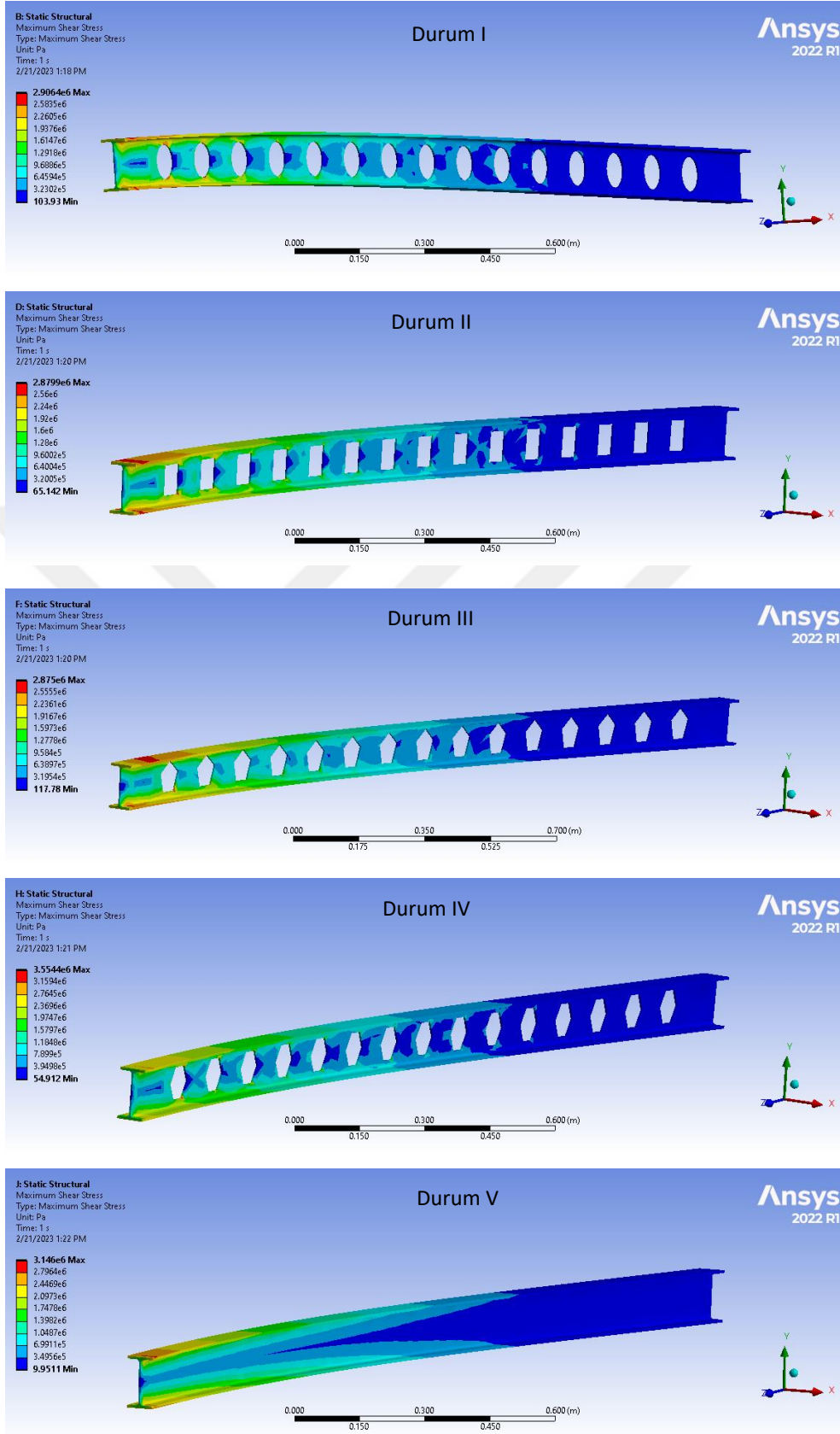
Şekil 40. Ankastre – sabit mesnetli IPE 120 - petek kirişi için von Mises gerilme dağılımları



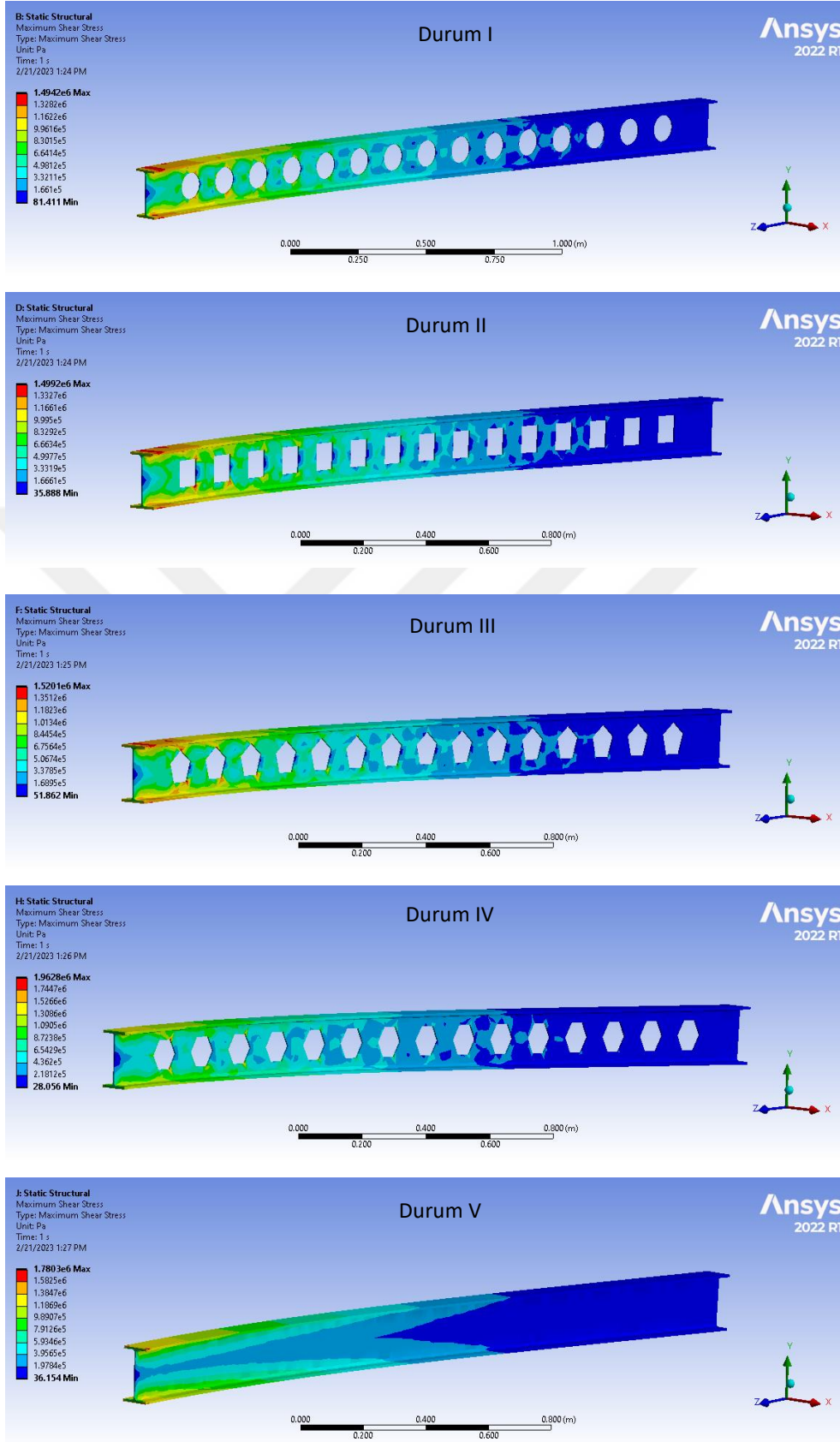
Şekil 41. Ankastre – sabit mesnetli IPE 180 - petek kirişi için von Mises gerilme dağılımları



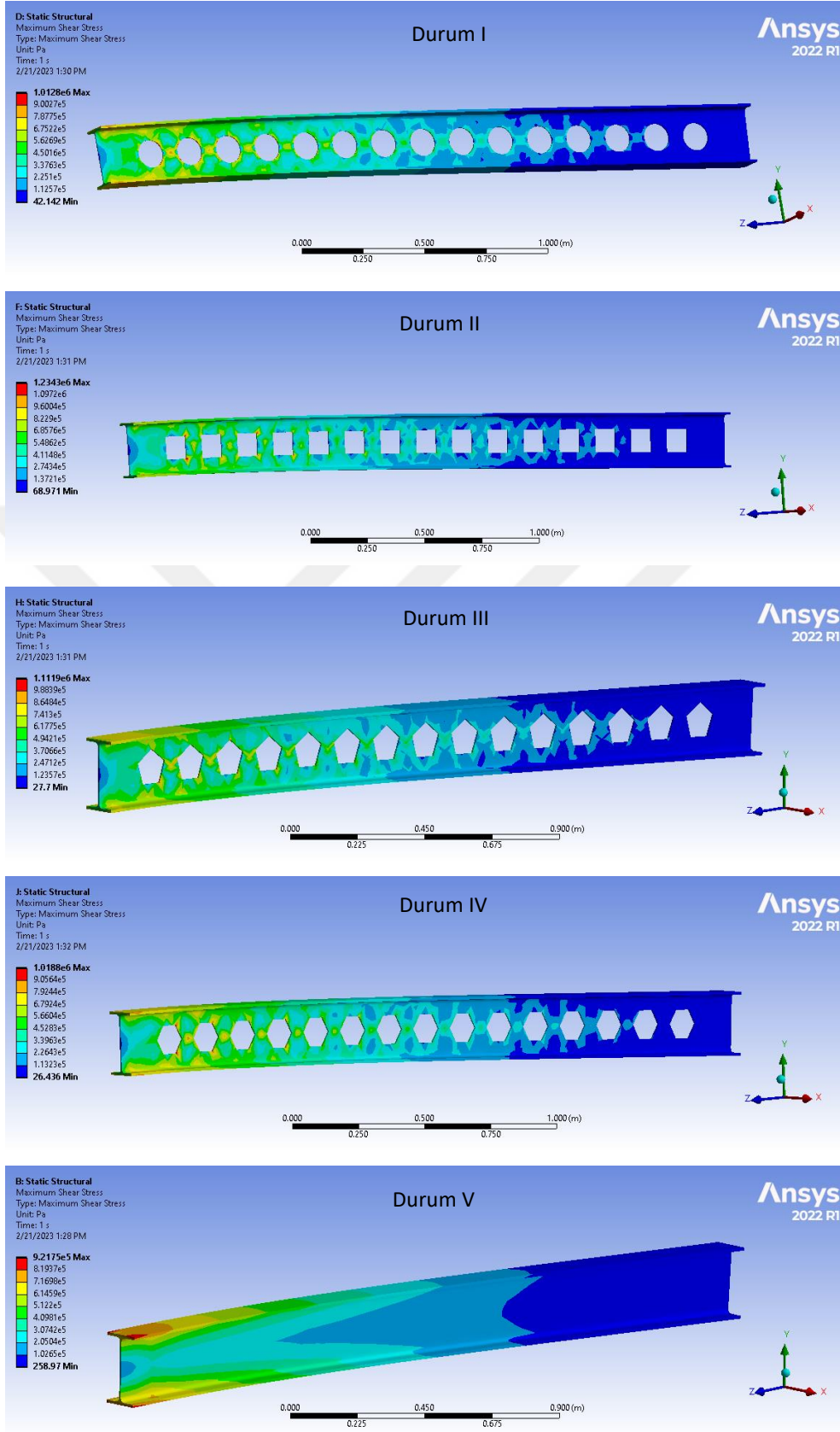
Şekil 42. Ankastre – sabit mesnetli IPE 240 - petek kirişi için von Mises gerilme dağılımları



Şekil 43. Ankastré – serbest mesnetli IPE 120 - petek kiriş i için maksimum kayma gerilmes i dağılımları



Şekil 44. Ankastr – serbest mesnetli IPE 180 - petek kirişi için maksimum kayma gerilmesi dağılımları



Şekil 45. Ankastré – serbest mesnetli IPE 240 - petek kiriş i için maksimum kayma gerilmesi dağılımları

3.2. Serbest Titreşim Analizi

Tezin bu bölümünde petek kirişlerin serbest titreşim davranışı üç boyutlu sonlu elemanlar yönetmi yardımıyla incelenmiştir. Analzilerde ANSYS 2022 R1 Workbench paket programı kullanılmıştır. Gövde boşluk geometrisinin doğal serbest titreşim frekansları üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

Bu tezde, IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240, ve IPE300 profilli petek kirişlerin serbest titreşim davranışı incelenmiştir. Statik durumunda olduğu gibi serbest titreşim davranışı analizinde de dairesel, kare, beşgen ve altıgen şekilleri boşluk geometrisi olarak ele alınmıştır. Ayrıca, gövdesinde boşluksuz çelik kirişlerin de serbest titreşim davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda, her profil için kiriş uzunluğu, gövde boşluk alanı ve boşluklar arası mesafesi kenarda bulunan gövde boşluğu ile mesnet arasındaki mesafe tüm kiriş modelleri için sabit tutularak sadece gövde boşluk tipi değiştirilmiştir. Sonlu elemanlar prosedürü kullanılarak yüz yirmi farklı model üretilmiş ve analiz edilmiştir. İncelenen yapı elemanlarının serbest titreşim davranışı üzerindeki gövde boşluğunun etkisini araştırmak için, gövde boşluk türü ve mesnet koşulları için sonuçlar elde edilmiştir.

Malzeme özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir. Ankastre – ankastre ve ankastre – sabit ve ankastre – serbest mesnetli kirişler analzi edilmiştir. Her durum için ilk on serbest titreşim modu ve bu modlara ait mod şekilleri elde edilmiştir.

3.2.1. Serbest Titreşim Frekansları

Nümerik çözümler elde edilirken ANSYS programı kullanılmıştır. İlk on mod için serbest titreşim karakteristikleri hesaplanarak Tablo 9- 32’da listelenmiştir.

3.2.1.1. Profil IPE120

Ankastre- Ankastre, Ankastre- Sabit ve Ankastre -Serbest sınır koşulları için IPE120 profilli petek kirişin serbest titreşim davranışının karakteristikleri hesaplanarak Tablo 9-11’de verilmiştir.

Tablo 9. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE120 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 120 (Ankastre - Ankastre)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	30.282	30.295	31.03	30.265	28.76
2	56.783	56.74	85.962	56.429	54.466
3	83.228	83.262	86.334	83.195	78.989
4	94.102	93.029	95.755	93.892	93.937
5	126.99	128.63	170.8	127.21	122.62
6	162.4	162.56	180.1	162.37	153.91
7	220.47	222.42	246.42	219.65	211.72
8	239.06	233.84	284.21	238.25	246.51
9	266.55	266.97	298.52	266.55	252.05
10	339.34	339.61	427.09	336.68	325.17

Tablo 9, petek kirişlerin serbest titreşim frekansları hakkında temel bilgileri vermektedir. Verilen tablo incelendiğinde petek kirişin gövdesinde bulunan boşluk geometrisinin serbest titreşim frekansları üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Birinci, ikinci, üçüncü, altıncı ve dokuzuncu modlar, beşgen tipi boşluk kullanıldığında en yüksek frekans değerlerine sahiptir. En düşük frekans değeri ise boşluksuz kirişte oluşup, bunu altıgen boşluk tipi takip etmektedir. Dairesel, kare ve altıgen boşluk geometrisine sahip olan petek kirişlerin serbest titreşim frekans değerleri yakındır. dördüncü mod incelendiğine ise en yüksek frekans değerine beşgen tipi boşluk durumunda rastlanmakta olup en düşük frekans değerinin ise kare tipi boşluk durumunda oluştuğu ve boşluksuz ile altıgen boşluklu kirişlerin frekans değerlerinin yakın olduğu saptanmaktadır. Beşinci ve yedinci modlar incelendiğinde ise en yüksek frekans değerleri beşgen tipi boşluk için saptanmıştır, beşinci ve yedinci mod için ise en düşük frekanslar boşluksuz kirişler için elde edilmiştir. Bu mod için dairel ile altıgen boşluklu petek kirişlerin frekans değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Sekizinci mod için ise beşgen boşluk en yüksek frekans değerine sahip olup iken kare boşluklu petek kirişi en düşük frekans değerine sahiptir. Bu mod için de dairel ve altıgen boşluk tipinin sonuçlarının yakın olduğu söylenebilir. Bu çalışmada ele alınan en son mod incelendiğinde ise en yüksek frekans değerinin beşgen kirişte oluştuğunu ve en düşük frekans değerini boşluksuz petek kirişinde görebiliriz. Bu frekans değerleri şekil 46’da grafik formunda da karşılaştırılmıştır.

Tablo 10. Ankastre – Sabit mesnetli IPE120 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 120 (Ankastre - Sabit)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	20.853	20.856	21.2910	20.834	19.821
2	24.2	23.982	36.736	23.646	22.988
3	66.932	66.486	67.672	66.829	64.028
4	67.413	67.416	69.381	67.375	65.87
5	76.601	77.981	120.74	76.824	74.022
6	140.03	140.13	146	140	132.85
7	144.53	147.85	207.38	146.66	139.55
8	202.83	199.71	214.09	202.33	205.19
9	235.89	238.13	250.93	237.38	224.96
10	238.06	240.18	329.58	238.56	226.08

Tablo 10, IPE120 profilinden yapılmış olan ve ankastre – sabit mesnetli petek kirişler için elde edilen serbest titreşim frekansları sunmaktadır. Sekizinci mod dışındaki tüm modlar için en yüksek titreşim frekans değerleri beşgen ve en düşük serbest titreşim frekans değerleri ise boşluksuz kirişte görülmüştür. Bu modlar için dairesele, kare ve altıgen boşluklu petek kirişlerin serbest titreşim frekansları birbirine yakındır. Ele alınan bu kirişin sekizinci modu incelendiğine ise, en yüksek frekansların beşgen boşluklu durumunda en düşük frekansların ise kare boşluklu kirişlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu mod için de dairesele ve altıgen boşluk tipinin sonuçlarının yakın olduğu söylenebilir. IPE120 profili ankastre – sabit mesnetli bu petek kirişi için elde edilen serbest titreşim davranışı Şekil 47’de grafik formunda karşılaştırılmıştır.

Tablo 11. Ankastre – serbest mesnetli IPE120 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 120 (Ankastre – Serbest)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	4.7169	4.7145	4.8126	4.7137	4.5276
2	15.727	15.697	15.783	15.707	15.337
3	24.199	23.981	30.185	23.645	22.987
4	29.568	29.569	36.738	29.544	28.33
5	76.597	77.977	85.22	76.819	74.018
6	82.679	82.685	95.054	82.634	79.078
7	93.873	93.162	120.76	93.747	93.546
8	144.51	147.82	168.8	146.64	139.54
9	161.51	161.62	214.12	161.47	154.1
10	235.93	240.01	251.55	237.99	225.79

Tablo 11, IPE120 profilinden yapılmış olan ve ankastre – serbest mesnetli petek kirişler için elde edilen serbest titreşim frekanslarını sunmaktadır. Yedinci modun dışındaki tüm modlar için en yüksek frekans beşgen boşluklu ve en düşük frekans ise boşluksuz kirişlerde hesaplanmıştır. Dairesel, kare, ve altıgen boşluklu kirişlerin sonuçları ise yakınsamaktadır. Yedinci mod için en yüksek frekans değerleri beşgen boşluklu ve en düşük frekanslar ise kare boşluklu kirişlerde gözlemlenmiştir. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 48’de grafik formunda karşılaştırılmıştır.

3.2.1.2. Profil IPE140

Ankastre- Ankastre, Ankastre- Sabit ve Ankastre -Serbest sınır koşulları için IPE140 profilili petek kirişin serbest titreşim davranışının karakteristikleri hesaplanarak Tablo 12-14’te verilmiştir.

Tablo 12. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE140 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 140 (Ankastre – Ankastre)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	34.564	34.558	34.653	34.587	32.867
2	54.944	54.859	54.857	55.324	54.11
3	94.835	94.84	95.071	94.918	90.107
4	107.46	104.5	106.32	107.01	108.34
5	128.93	128.72	129.23	129.49	126.46
6	184.37	184.42	184.84	184.55	174.89
7	229.99	229.84	231.22	230.7	225.25
8	267.61	256.28	262.01	265.92	280.02
9	300.85	301.07	301.54	301.15	284.45
10	359.96	359.71	360.6	361.41	352.5

Tablo 12, iki ucu ankastre mesnetli ve IPE140 profilinden yapılmış petek kirişlerin serbest titreşim frekanslarını sunmaktadır. Birinci, üçüncü, altıncı, yedinci ve dokuzuncu modlar beşgen tipi boşluk için en yüksek frekans değerine sahip iken boşluksuz kirişler en düşük titreşim frekans değerine sahiptir. Bu modlar için dairel boşluk tipinin sonuçları ile kare ve altıgen boşluk tipinin sonuçları birbirine yakın olarak elde edilmiştir. İkinci mod için kare boşluklu ile beşgen boşluklu kirişlerin serbest titreşim frekansları birbirine yakın değerler alırken altıgen boşluklu kirişlerde en yüksek frekans değerleri ve boşluksuz kirişlerde ise en düşük frekans değerleri elde edilmiştir. Dördüncü ve sekizinci mod için en düşük frekanslar kare boşluklu

kirişte en yüksek frekans değerleri ise sırasıyla boşluksuz ve dairesel boşluklu kirişte oluşmaktadır. Beşinci mod incelendiğinde en yüksek frekans değerlerinin altıgen boşluklu ve en düşük frekans değerlerinin ise boşluksuz kirişlerde olduğu görülebilir. Bu mod için de dairesel boşluklu ve kare boşluklu petek kirişlerin frekansları birbirine yakındır. Bu çalışmada ele alınan onuncu mod incelendiğinde ise en yüksek frekans değerinin altıgen boşluklu kirişte oluştuğunu ve en düşük frekans değerini boşluksuz kirişte görebiliriz. Bu frekans değerleri şekil 49’da grafik formunda verilmiştir.

Tablo 13. Ankastre – Sabit mesnetli IPE140 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 140 (Ankastre - Sabit)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	21.587	21.758	21.779	21.853	21.472
2	23.812	23.808	23.808	23.818	22.656
3	71.732	72.102	74.578	73.588	71.094
4	76.87	75.942	76.56	76.918	73.06
5	77.179	76.858	76.882	77.021	76.425
6	142.21	142.34	149.79	146.1	139.88
7	159.26	159.24	159.33	159.37	151.03
8	229.6	222.11	225.61	228.63	234.96
9	240.1	240.41	253.08	245.5	235.71
10	269.36	269.46	269.53	269.65	254.49

Tablo 13, IPE140 profiline sahip ankastre - sabit mesnetli petek kirişin doğal titreşim frekanslarını gösterilmektedir. Birinci, ikinci, dördüncü, yedinci ve onuncu modlar için en yüksek frekanslar altıgen boşluklu kirişlerde en düşük frekanslar da boşluksuz kirişlerde elde edilmiştir. Bu modlar için dairesel, kare ve beşgen boşluklu petek kirişlerin serbest titreşim frekansları yakınsamaktadır. Üçüncü, altıncı ve dokuzuncu modlar için ise en düşük frekanslar boşluksuz kirişlerde en yüksek frekanslar da beşgen tipi boşluklu kirişlerde oluşmaktadır. Ele alınan bu modlarda ise dairesel ve kare boşluklu petek kirişlerin serbest titreşim analiz sonuçları birbirine yakındır. Beşinci mod için en yüksek frekanslar dairesel boşluklu kirişte en düşük frekanslar boşluksuz kirişte elde edilmiştir. Sekizinci modun en yüksek frekansı boşluksuz kirişte, en düşük frekansı ise gövdesinde kare şeklinde boşluk bulunduran petek kirişinde görülmüştür. Sekizinci mod için serbest titreşimin birbirine yakın

olduğu boşluk tipleri ise dairesel ve altıgendir. Elde edilen frekanslar karşılaştırılmalı olarak şekil 50’de verilmiştir.

Tablo 14. Ankastre – serbest mesnetli IPE140 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 140 (Ankastre - Serbest)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	5.387	5.3867	5.3871	5.3882	5.1782
2	18.353	18.307	18.31	18.344	17.925
3	21.588	21.759	21.78	21.854	21.474
4	33.745	33.748	33.745	33.755	32.387
5	71.735	72.106	74.584	73.59	71.104
6	94.225	94.247	94.226	94.285	90.261
7	107.86	105.76	106.89	107.61	108.33
8	142.21	142.34	149.79	146.11	139.88
9	183.46	183.54	183.52	183.63	175.28
10	240.11	240.42	253.1	245.51	235.72

Tablo 14, ankastre – serbest mesnetli ve IPE140 profilinden yapılmış petek kirişlerin serbest titreşim frekanslarını sunmaktadır. Birinci, üçüncü, dördüncü, altıncı ve dokuzuncu modlar için en yüksek frekanslar altıgen boşluklu kirişlerde en düşük frekanslar da boşluklu kirişlerde elde edilmiştir. Bu modlar için dairesel, kare ve beşgen boşluklu petek kirişlerin serbest titreşim frekansları yakınsamaktadır. İkinci mod için ise en düşük frekanslar boşluksuz kirişlerde en yüksek frekanslar da dairesel tipi boşluklu kirişlerde oluşmaktadır. Ele alınan bu modlarda ise beşgen ve kare boşluklu petek kirişlerin serbest titreşim analiz sonuçları birbirine yakındır. Beşinci, sekizinci ve onuncu modlar için en yüksek frekanslar beşgen boşluklu kirişte en düşük frekanslar boşluksuz kirişte elde edilmiştir. Yedinci modun en yüksek frekansı boşluksuz kirişte, en düşük frekansı ise gövdesinde kare şeklinde boşluk bulunduran petek kirişinde görülmüştür. Yedinci mod için serbest titreşim frekanslarının birbirine yakın olduğu boşluk tipleri ise dairesel ve altıgendir. Elde edilen frekanslar karşılaştırılmalı olarak şekil 51’de verilmiştir.

3.2.1.3. Profil IPE160

Ankastre- Ankastre, Ankastre- Sabit ve Ankastre -Serbest sınır koşulları için IPE160 profilli petek kirişin serbest titreşim davranışının karakteristikleri hesaplanarak Tablo 15-17’de verilmiştir.

Tablo 15. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE160 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 160 (Ankastre – Ankastre)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	38.442	38.372	38.448	38.38	36.503
2	58.253	57.645	58.126	58.09	57.388
3	105.26	105.07	105.25	105.16	99.738
4	118.66	115.74	117.78	118.66	122.17
5	138.03	137.77	137.9	137.89	134.93
6	203.87	203.66	204.01	203.72	192.91
7	247.89	247.59	248.09	248.06	243.42
8	287.98	276.69	284.98	288.13	310.56
9	330.35	330.6	330.69	330.68	311.44
10	384.56	386.27	389.93	390.45	382.75

Tablo 15, iki ucu ankastre mesnetli ve IPE160 profilinden yapılmış petek kirişlerin serbest titreşim frekansları verilmektedir. Bu profil için birinci, altıncı, yedinci ve dokuzuncu modlar beşgen tipi boşluk için en yüksek frekans değerine sahip iken boşluksuz kirişler en düşük serbest titreşim frekans değerine sahiptir. Bu modlar için kare, dairesele ve altıgen boşluklu kirişlerin serbest titreşim sonuçları birbirine yakın olarak elde edilmiştir. İkinci, üçüncü ve beşinci modlar için altıgen boşluklu ile beşgen boşluklu kirişlerin titreşim frekansları birbirine yakın değerler alırken dairesele boşluklu kirişlerde en yüksek frekans değerleri ve boşluksuz kirişlerde ise en düşük frekans değerleri elde edilmiştir. Dördüncü ve sekizinci mod için şöyle yorumlar yapılabilir; en yüksek serbest frekans titreşim değerleri sırasıyla boşluksuz ve altıgen boşluklu kirişler için elde edilirken en düşük doğal titreşim frekansları kare boşluklu petek kirişlerinde oluşmaktadır. Bu modlarda dairesele ve altıgen boşluklu kirişlerin serbest titreşim frekansları birbirine yakın çıkmıştır. Onuncu moda bakıldığında, en yüksek frekansın altıgen ve beşgen boşluklu kirişlerde olduğu ve en düşük frekans değerlerinin ise boşluksuz ve dairesele boşluklu kirişlerde olduğu görülmektedir. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 52’de grafik formunda da çizilmiştir.

Tablo 16. Ankastre – Sabit mesnetli IPE160 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 160 (Ankastre - Sabit)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	22.592	22.03	22.365	22.326	22.016
2	26.494	26.436	26.49	26.446	25.157
3	75.383	74.131	75.303	75.358	74.446
4	85.349	85.1	85.359	85.249	80.941
5	86.431	85.207	86.093	86.435	86.752
6	151.26	150.48	151.6	151.72	148.09
7	176.29	176.04	176.4	176.09	166.88
8	250.4	243.07	248.88	250.62	253.31
9	258.05	257.52	258.7	258.82	262.86
10	296.47	296.38	296.52	296.46	279.55

Ankastre – sabit mesnetli IPE160 petek kirişine ait elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 16’da verilmiştir. Birinci ve ikinci modlar için en yüksek frekanslar dairesel boşluklu kirişte ve en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişte oluşmuştur. Bu modlar için beşgen, kare ve altıgen boşlukluların kirişin sonuçları birbirine yakındır. Dördüncü, yedinci ve onuncu modlar incelendiğinde ise en yüksek frekansların beşgen boşluklu ve en düşük frekansların ise boşluksuz kirişte olduğu görülmüştür. Beşinci, sekizinci ve dokuzuncu modlarda en yüksek frekans değerleri boşluksuz kirişlere aitken en düşük frekanslar ise kare tipi boşluklu kirişlere aittir. Altıncı mod irdelendiğinde ise en düşük frekansların boşluksuz kirişlerde ve en yüksek frekans değerlerinin de sırasıyla altıgen ve beşgen boşluklu kirişlerde olduğu görülmektedir. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 53’te grafik formunda da çizilmiştir.

Tablo 17. Ankastre – serbest mesnetli IPE160 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE160 (Ankastre - Serbest)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	5.9977	5.9827	6.0002	5.9901	5.7488
2	20.962	20.89	20.945	20.95	20.501
3	22.592	22.03	22.365	22.326	22.018
4	37.538	37.47	37.563	37.496	35.975
5	75.384	74.132	75.303	75.358	74.448
6	104.61	104.45	104.66	104.58	99.981
7	120.15	118.04	119.72	120.28	122.66
8	151.26	150.48	151.6	151.72	148.1

9	203.02	202.86	203.22	202.98	193.57
10	258.05	257.53	258.7	258.82	253.32

Ankastre – serbest mesnetli IPE160 petek kirişine ait elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 17’de verilmiştir. Birinci, dördüncü, altıncı ve dokuzuncu modlar için en yüksek frekanslar beşgen boşluklu kirişte ve en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişte oluşmuştur. Bu modlar için dairesel, kare ve altıgen boşlukların kirişin sonuçları birbirine yakındır. İkinci, üçüncü ve beşinci modlar incelendiğinde ise en yüksek frekansların dairesel boşluklu ve en düşük frekansların ise boşluksuz kirişte olduğu görülmüştür. Yedinci mod için en yüksek frekans değerleri boşluksuz kirişlere aitken en düşük frekanslar ise kare tipi boşluklu kirişlere aittir. Sekizinci ve onuncu modlar irdelendiğinde ise en düşük frekansların boşluksuz kirişlerde ve en yüksek frekans değerlerinin de sırasıyla altıgen ve beşgen boşluklu kirişlerde olduğu görülmektedir. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 54’te grafik formunda da çizilmiştir.

3.2.1.4. Profil IPE180

Ankastre- Ankastre, Ankastre- Sabit ve Ankastre -Serbest sınır koşulları için IPE180 profilli petek kirişin serbest titreşim davranışının karakteristikleri hesaplanarak Tablo 18-20’de verilmiştir.

Tablo 18. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE180 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 180 (Ankastre- Ankastre)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	42.738	42.691	42.73	42.713	40.666
2	59.384	58.977	59.626	59.172	57.549
3	116.64	116.52	116.71	116.59	110.79
4	129.3	125.1	128.5	129.33	135.08
5	144.58	144.23	144.63	144.83	141.08
6	224.05	224.29	224.48	224.41	212.2
7	265.09	265.64	265.83	265.43	259.58
8	307.62	293.03	305.35	307.47	335.29
9	318.63	324.5	328.98	326.63	337.65
10	355.54	357.06	357.58	357.49	376.88

Tablo 18’de IPE180 profilinde yapılmış iki ucu ankastre mesnetli petek kirişlerinin serbest titreşim frekans değerleri listelenmiştir. Birinci mod değerlerine bakıldığında en yüksek titreşim frekansları dairesel ve beşgen boşluklu kirişlerde

oluşmuştur. En düşük titreşim frekans değerlerinin boşluksuz kirişlerde olduğu belirlenmiştir. Üçüncü ve ikinci modlarda en yüksek titreşim frekansları sırasıyla beşgen, dairesel ve altıgen boşluklu kirişlerde oluşurken en düşük titreşim frekans değerleri ise boşluksuz ve kare boşluklu kirişlerde meydana gelmiştir. Dördüncü ve sekizinci modlar incelendiğinde en yüksek frekanslar boşluksuz kirişlerde en düşük frekanslar ise kare boşluklu kirişlerde meydana gelmektedir. Bu modlar için dairesel ve altıgen boşluklu kirişlerin sonuçları birbirine yakındır. Beşinci modda en yüksek frekans değeri altıgen boşluklu kirişte oluşmakta ve en düşük frekans ise sırasıyla dolu gövdeli ve kare boşluklu kirişlerde meydana gelmektedir. Altıncı ve yedinci modların en yüksek frekans değerleri beşgen ve en küçük frekans değerleri ise boşluksuz kirişlerde bulunmuştur. Dokuzuncu mod için de benzer şekilde en yüksek frekanslar boşluksuz kirişte en düşük frekanslar ise sırasıyla dairesel ve kare boşluklu kirişlerinde bulunmuştur. Onuncu mod için beşgen ve altıgen boşluklu kirişlerin frekansları birbirine yakın olurken en düşük frekanslar dairesel boşluklu kirişlerde en yüksek frekanslar ise boşluksuz kirişte hesaplanmıştır. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 55’te grafik formunda da verilmiştir.

Tablo 19. Ankastre – Sabit mesnetli IPE180 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 180 (Ankastre-Sabit)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	21.587	21.255	21.445	21.414	20.436
2	29.453	29.422	29.454	29.438	28.051
3	73.825	73.115	74.571	73.809	71.044
4	94.613	93.42	94.643	94.579	89.943
5	95.469	94.506	95.02	95.481	96.569
6	155.09	154.14	155.28	155.4	150.64
7	194.07	194.19	194.24	194.23	183.95
8	271.08	260.82	269.37	271.15	266.71
9	272.91	272.81	273.44	273.32	288.06
10	311.53	314.7	318.16	319.56	303.49

Tablo 19, ankastre – sabit mesnetli ve IPE180 profilinden yapılmış petek kirişlerin serbest titreşim analiz sonuçları verilmektedir. Birinci ve dördüncü mod için en yüksek frekanslar sırasıyla dairesel ve beşgen boşluklu kirişlerde ve en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişlerde oluşmaktadır. İkinci, üçüncü ve yedinci modlar

için ise en yüksek frekanslar beşgen boşluklu petek kirişte en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişte oluşmuştur. Dairesel, kare ve altıgen boşluklu kirişlerin serbest titreşim frekans değerleri yakınsamaktadır. Beşinci ve dokuzuncu modlar için en yüksek frekanslar boşluksuz kirişlerde en düşük frekanslar ise kare boşluklu petek kirişlerinde hesaplanmıştır. Altıncı ve onuncu modlar incelendiğinde ise en düşük frekans değerlerinin boşluksuz kirişlerde en yüksek titreşim frekanslarının ise altıgen boşluklu kirişte olduğu görülmüştür. Sekizinci mod için ise en yüksek frekansların altıgen boşluklu ve en düşük frekansların kare boşluklu kirişte olduğu bulunmuştur. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 56’da grafik formunda da çizilmiştir.

Tablo 20. Ankastre – serbest mesnetli IPE180 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 180 (Ankastre - Serbest)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	6.6758	6.6697	6.6694	6.6727	6.4203
2	21.587	21.255	21.445	21.414	20.436
3	23.534	23.445	23.478	23.547	23.071
4	41.75	41.71	41.738	41.73	40.063
5	73.825	73.115	74.571	73.809	71.044
6	116.07	115.93	116.13	116.01	111.06
7	132.23	129.05	131.48	132.31	136.09
8	155.09	154.14	155.28	155.4	150.64
9	223.68	223.85	224.05	223.99	213.25
10	272.86	272.81	273.44	273.32	266.72

Tablo 20’de ankastre – serbest mesnetli ve IPE180 profilinden yapılmış petek kirişlerin serbest titreşim analiz sonuçları verilmektedir. Birinci, ikinci ve dördüncü mod için en yüksek frekanslar sırasıyla dairese ve beşgen boşluklu kirişlerde ve en yüksek frekanslar ise boşluksuz kirişlerde oluşmaktadır. Üçüncü ve sekizinci modlar için ise en yüksek frekanslar altıgen boşluklu petek kirişinde en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişte oluşmuştur. Dairesel, kare ve beşgen boşluklu kirişlerin titreşim frekans değerleri yakınsamaktadır. Beşinci, altıncı, dokuzuncu ve onuncu modlar için en yüksek frekanslar beşgen boşluklu kirişlerde en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişlerde hesaplanmıştır. Yedinci mod incelendiğinde ise en düşük frekans değerlerinin kare boşluklu kirişlerde en yüksek titreşim frekanslarının ise boşluksuz kirişte olduğu görülmüştür. Sekizinci mod için ise en yüksek frekansların altıgen boşluklu ve en düşük frekansların boşluksuz kirişlerde olduğu bulunmuştur. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 57’de grafik formunda da çizilmiştir.

3.2.1.5. Profil IPE200

Ankastre- Ankastre, Ankastre- Sabit ve Ankastre -Serbest sınır koşulları için IPE200 profilli petek kirişin serbest titreşim frekans değerleri elde edilerek Tablo 21-23'de listelenmiştir

Tablo 21. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE200 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 200 (Ankastre - Ankastre)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	46.277	46.272	46.276	46.291	44.097
2	62.241	62.072	62.043	62.212	60.5
3	125.9	125.89	125.92	125.97	119.77
4	138.19	132.41	137.13	138.03	147.4
5	152.85	152.77	152.75	153.2	149.96
6	240.15	240.69	240.3	240.77	227.16
7	279.09	281.29	281.35	281.61	276.63
8	281.4	284.55	287.08	289.82	330.13
9	322.28	303.95	318.83	321.54	349.67
10	338.09	345.57	342.11	347.77	362.22

Tablo 21, IPE200 petek kirişlerin serbest titreşim frekansları hakkında temel bilgileri vermektedir. Birinci ve üçüncü modların en yüksek frekansları altıgen ve en düşük frekansları ise boşluksuz kirişte bulunmuştur. İkinci mod ise en düşük titreşim frekansı boşluksuz ve en yüksek titreşim frekansları ise daireysel boşluklu kirişte elde edilmiştir. Altıgen ve daireysel boşluklu kirişlerin frekanslarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Dördüncü mod irdelendiğine ise en yüksek frekans değerlerinin boşluksuz ve en düşük frekans değerlerinin ise kare boşluklu kirişlerde olduğu görülmüştür. Beşinci, altıncı ve yedinci modlar benzer özellikler göstermiştir şöyle ki, en yüksek frekanslar altıgen boşluklu kirişlerde, en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişlerde. Sekizinci ve onuncu modun frekansları boşluksuz kirişte en yüksek iken daireysel boşluklu kirişte en düşüktür. Dokuzuncu modun en yüksek frekansları boşluksuz en düşük frekanslar ise kare boşluklu kirişlerde elde edilmiştir. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekanslar değerleri şekil 58'de grafik formunda da çizilmiştir.

Tablo 22. Ankastre – Sabit mesnetli IPE200 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 200 (Ankastre - Sabit)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	21.984	21.862	21.941	21.943	20.884
2	31.913	31.912	31.903	31.914	30.411
3	76.707	76.171	75.937	76.377	73.484
4	102.3	100.57	102.22	102.31	97.324
5	103.39	102.3	102.88	103.4	106.19
6	163.06	162.63	162.13	162.96	158.76
7	208.93	209.24	208.87	209.19	197.59
8	267.58	272.53	273.35	277.03	283.19
9	286.92	274.08	284.73	286.8	311.73
10	288.83	288.47	287.98	288.65	316.1

Ankastre – sabit mesnetli IPE200 petek kirişine ait elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 22’de verilmiştir. Birinci, üçüncü ve altıncı modlar incelendiğinde, en yüksek frekansların dairesel boşluklu kirişlerde olduğu ve en düşük frekansların ise boşluksuz kirişlerde olduğu gözlemlenmiştir. İkinci ve dördüncü modlar için en yüksek frekanslar altıgen boşluklu kirişlerde ve düşük frekanslar da boşluksuz kirişlerde meydana gelmektedir. Beşinci moda bakıldığında ise en yüksek frekansların boşluksuz kirişlerde olduğu ve en düşük frekansların ise kare boşluklu durumunda olduğu saptanmıştır. Yedinci mod için kare boşluklu kiriş durumunda frekanslar en yüksek değerleri alırken boşluksuz kirişlerde ise en düşük değerleri almaktadır. Sekizinci mod için en yüksek frekanslar boşluksuz kirişlerde en düşük frekanslar ise dairesel boşluklu kirişlerde oluşmaktadır. Dokuzuncu mod için en yüksek frekanslar boşluksuz kirişte en düşük frekanslar kare boşluklu kirişlerde meydana gelmektedir. Onuncu mod için de benzer şekilde en yüksek frekanslar boşluksuz kirişte ve en düşük frekans beşgen boşluklu kirişlerde saptanmıştır. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 59’da grafik formunda da çizilmiştir.

Tablo 23. Ankastre – serbest mesnetli IPE200 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 200 (Ankastre - Serbest)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	7.2428	7.2408	7.2416	7.2428	6.9659
2	21.984	21.862	21.942	21.944	20.885
3	26.064	25.905	26.014	26.059	25.604
4	45.249	45.256	45.255	45.266	43.469
5	76.708	76.174	75.938	76.378	73.486
6	125.44	125.47	125.47	125.52	120.21
7	142.73	138.39	141.99	142.8	149.32
8	163.07	162.64	162.14	162.96	158.77
9	240.47	240.98	240.73	241.05	228.87
10	267.67	272.57	273.44	277.12	283.21

Ankastre – serbest mesnetli IPE200 petek kirişine ait elde edilen serbest titreşim frekans değerleri Tablo 23’de verilmiştir. Birinci, ikinci, üçüncü, beşinci ve sekizinci modlar incelendiğinde, en yüksek frekansların dairesel boşluklu kirişlerde olduğu, ve en düşük frekansların ise boşluksuz kirişlerde olduğu gözlemlenmiştir. Dördüncü, altıncı ve dokuzuncu modlar için en yüksek frekanslar altıgen boşluklu kirişlerde ve en düşük frekanslar da boşluksuz kirişlerde meydana gelmektedir. Yedinci moda bakıldığında ise en yüksek frekansların boşluksuz kirişlerde olduğu ve en düşük frekansların ise kare boşluklu durumunda olduğu saptanmıştır. Onuncu mod için de benzer şekilde en yüksek frekanslar boşluksuz kirişte ve en düşük frekans dairesel boşluklu kirişlerde saptanmıştır. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 60’te grafik formunda da çizilmiştir.

3.2.1.6. Profil IPE220

Ankastre- Ankastre, Ankastre- Sabit ve Ankastre -Serbest mesnet koşulları için IPE220 profilli petek kirişin serbest titreşim frekansları hesaplanarak Tablo 24-26’de verilmiştir.

Tablo 24. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE220 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 220 (Ankastre - Ankastre)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	51.572	51.573	51.59	51.584	49.236
2	65.024	65.29	65.138	65.145	64.161
3	139.27	137.57	139.41	139.4	133.5
4	145.08	139.52	144.12	144.94	158.83
5	163.61	164.16	163.96	163.81	162.08
6	225.97	231.12	231.23	231.34	252.39
7	262.32	264	263.21	263.79	296.93
8	292.17	300.31	296.59	297.57	302.83
9	304.77	305.38	305.43	305.18	382.01
10	330.47	309.19	327.55	329.92	383.78

Tablo 24, ankastre – ankastre mesnetli IPE220 profilinden yapılmış petek kiriş için serbest titreşim frekansları verilmiştir. Birinci ve üçüncü modlar için en yüksek frekansları beşgen boşluklu petek kirişinde en düşük frekansları ise sırasıyla boşluksuz ve kare boşluklu kirişlerde meydana gelmiştir. İkinci ve beşinci modlar için ise en yüksek frekanslar kare boşluklu kirişlerde elde edilirken en düşük frekanslar boşluksuz ve dairesel boşluklu petek kirişlerde bulunmuştur. Dördüncü ve onuncu mod incelendiğinde ise kare boşluklu kirişlerde en düşük frekanslar oluşurken en yüksek frekanslar boşluksuz kirişlerde hesaplanmıştır. Altıncı, yedinci, sekizinci ve dokuzuncu modlar için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu modlarda en düşük frekanslar dairesel boşluklu kirişlerde en yüksek frekanslar ise boşluksuz kirişlerde oluşmaktadır. Serbest titreşim frekansları şekil 61’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 25. Ankastre – Sabit mesnetli IPE220 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 220 (Ankastre - Sabit)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	21.295	21.564	21.32	21.332	20.622
2	35.577	35.576	35.574	35.586	34.007
3	76.706	77.064	76.723	76.931	75.279
4	110.55	106.61	109.96	110.5	108.57
5	113.38	113.52	113.41	113.52	115.58
6	171.04	171.57	171.26	171.43	169.74
7	214.55	218.8	217.38	217.43	221.2
8	228.32	229.31	228.65	229.51	266.13
9	259.31	264.59	262.09	263.15	309.01
10	299.04	282.81	296.69	298.65	331.95

Tablo 25, IPE220 profilinden yapılmış olan ve ankastre – sabit mesnetli petek kirişler için elde edilen serbest titreşim frekansları sunmaktadır. Birinci, üçüncü ve altıncı mod için en yüksek frekanslar kare boşluklu kirişlerde, en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişlerde oluşmaktadır. İkinci modun en yüksek frekansları altıgen boşluklu petek kirişlerde en düşük titreşim davranışı sonuçları ise boşluksuz kirişlerde belirlenmiştir. Dördüncü modun en yüksek frekansların dairesel boşluklu kirişlerde olduğu en düşük frekansların ise kare boşluklu olduğu saptanmıştır. Beşinci, yedinci, sekizinci ve dokuzuncu modlar için ise en düşük frekanslı kirişlerin dairesel boşluklu ve en yüksek frekanslı kirişlerin ise boşluksuz olduğu belirlenmiştir. Onuncu modun en yüksek frekansları boşluksuz kirişlerde en düşük frekansların ise kare boşluklu kirişlerde olduğu hesaplanmıştır. Bu frekans değerleri şekil 62’de grafik formunda verilmiştir

Tablo 26. Ankastre – serbest mesnetli IPE220 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 220 (Ankastre – Serbest)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	8.0875	8.0923	8.0838	8.089	7.8008
2	21.295	21.564	21.321	21.333	20.622
3	28.64	28.389	28.559	28.653	28.352
4	50.452	50.473	50.448	50.454	48.573
5	76.708	77.065	76.725	76.933	75.279
6	139.02	139.24	139.1	139.1	134.09
7	151.71	145.7	150.84	151.63	161.98
8	171.05	171.58	171.27	171.44	169.74
9	214.55	218.83	217.42	217.46	255.9
10	257.38	261.21	259.29	260.5	267.38

Tablo 26, IPE220 profilinden yapılmış olan ve ankastre – serbest mesnetli petek kirişler için elde edilen serbest titreşim frekansları sunmaktadır. Birinci, ikinci, dördüncü, beşinci, altıncı ve sekizinci modlar için en yüksek frekanslar kare boşluklu kirişlerde, en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişlerde oluşmaktadır. Üçüncü modun en yüksek frekansları altıgen boşluklu petek kirişlerde en düşük titreşim davranışı sonuçları ise boşluksuz kirişlerde belirlenmiştir. Yedinci modun en yüksek frekansların boşluksuz kirişlerde olduğu en düşük frekansların ise kare boşluklu kirişlerde olduğu saptanmıştır. Dokuzuncu ve onuncu modlar için ise en düşük

frekanslı kirişlerin dairesel boşluklu ve en yüksek frekanslı kirişlerin ise boşluksuz olduğu belirlenmiştir. Bu frekans değerleri şekil 63'te grafik formunda verilmiştir.

3.2.1.7. Profil IPE240

Ankastre- Ankastre, Ankastre- Sabit ve Ankastre -Serbest sınır koşulları için IPE240 profilli petek kirişin serbest titreşim frekansları hesaplanarak Tablo 27-29'de gösterilmiştir.

Tablo 27. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE240 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 240 (Ankastre - Ankastre)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	55.45	55.486	55.518	55.434	53.181
2	68.795	68.834	68.833	68.77	66.688
3	149.05	142.7	149.12	149.22	141.37
4	151.47	149.13	150.4	151.78	169.59
5	173.98	174.23	173.91	173.97	171.02
6	214.63	216.45	217.65	219.67	242.38
7	277.37	277.81	277.88	279.1	254.88
8	286.94	288.24	289.72	294.22	290.2
9	324.47	315.67	324.88	324.72	321.03
10	340.23	325.13	336.97	341.08	339.08

Tablo 27, IPE240 profilinde yapılmış iki ucu ankastre mesnetli petek kirişlerin serbest titreşim frekans değerleri listelenmiştir. Birinci mod için elde edilen titreşim frekans değerleri incelendiğinde en yüksek değerlerinin beşgen boşluklu kirişte en düşük frekansların ise sırasıyla boşluksuz ve altıgen boşluklu kirişlerde oluşmaktadır. İkinci ve beşinci modlar için ise en yüksek frekansların kare boşluklu kirişler için en düşük titreşim frekansların ise boşluksuz kirişlerde olduğu görülmüştür. Bu modlar için dairesel boşluklu ve altıgen boşluklu kirişlerin frekanslarını değerleri yakınsamaktadır. Üçüncü, yedinci ve onuncu modlar incelendiğinde ise en yüksek frekanslar altıgen boşluklu kirişlerde ve en düşük frekanslar ise sırasıyla boşluksuz kirişler ve kare boşluklu kirişlerde bulunmuştur. Dördüncü mod boşluksuz kirişlerde en yüksek frekansa sahipken, dairesel ve altıgen boşluklularda yakın değerler, kare boşluklu kirişlerde ise en düşük frekansa sahiptir. Altıncı mod için, beşgen ve kare boşluklu kirişlerde yakın değerlerle birlikte boşluksuz kiriş için en yüksek frekansa

ve dairesel boşluklu kiriş için ise en düşük frekansa sahiptir. Sekizinci mod için ise en yüksek frekanslar altıgen boşluklu kirişte en düşük frekanslar ise dairesel boşluklu kirişlerde oluşmaktadır. Dokuzuncu moda bakıldığında ise en yüksek değerlerin beşgen boşluklu kirişte en düşük frekansların ise kare boşluklu kirişlerde olduğu görülmüştür. Doğal titreşim frekanslarının karşılaştırması Şekil 64'te gösterilmektedir.

Tablo 28. Ankastre – Sabit mesnetli IPE240 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 240 (Ankastre - Sabit)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	22.008	22.004	22.011	22.039	19.993
2	38.282	38.288	38.312	38.267	36.708
3	80.02	79.975	80.044	79.977	75.476
4	116.88	112.08	116.3	117.08	115.43
5	121.58	121.44	121.59	121.62	124.13
6	180.9	180.91	180.83	180.91	176.61
7	200.84	202.77	203.2	206.2	222.74
8	240.97	240.64	241.75	243.32	236.15
9	252.69	253.89	254.44	258.1	263.65
10	310.19	291.08	307.68	310.91	318.47

Tablo 28, IPE240 profilinden yapılmış olan ve ankastre – sabit mesnetli petek kirişler için elde edilen serbest titreşim frekanslarını sunmaktadır. Birinci, beşinci, altıncı ve sekizinci modlar için en yüksek frekanslar altıgen boşluklu petek kirişte en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişte oluşmuştur. İkinci ve üçüncü modlar incelendiğinde en yüksek frekansların beşgen tipi boşlukta, en düşük frekansların ise boşluksuz kirişlerde olduğu belirlenmiştir. Dördüncü mod için en yüksek frekanslarının altıgen boşluklu kirişte olduğu en düşük frekansların ise kare boşluklu kirişlerde olduğu söylenebilir. Yedinci ve dokuzuncu modların en yüksek frekansların boşluksuz kirişlerde olduğu en düşük frekansların ise dairesel boşluklu kirişlerde olduğu bulunmuştur. Onuncu mod için irdeleme yapıldığında boşluksuz kirişlerinin frekans değerinin en yüksek olduğu ve kare boşluklu petek kirişlerinin frekanslarının en düşük olduğu saptanmıştır. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 65'te grafik formunda da çizilmiştir.

Tablo 29. Ankastre – serbest mesnetli IPE240 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE240 (Ankastre - Serbest)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	8.7129	8.7232	8.7171	8.72	8.4496
2	22.01	22.005	22.012	22.041	19.993
3	30.967	30.64	30.925	31.018	30.742
4	54.287	54.335	54.343	54.302	52.472
5	80.033	79.986	80.049	79.987	75.476
6	149.02	149.09	149.07	149.2	142.41
7	159.89	152.68	158.97	160.3	173.6
8	180.97	180.97	180.88	180.97	176.61
9	200.84	202.77	203.21	206.21	236
10	249.69	250.88	252.02	256.64	253.36

Tablo 29, IPE240 profilinden yapılmış olan ve ankastre – serbest mesnetli petek kirişler için elde edilen serbest titreşim frekanslarını sunmaktadır. Birinci mod için en yüksek frekanslar kare boşluklu petek kirişinde en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişte oluşmuştur. İkinci ve altıncı modlar incelendiğinde ise en yüksek frekansların altıgen tipi boşlukta, en düşük frekansların da boşluksuz kirişlerde olduğu belirlenmiştir. Üçüncü mod için en yüksek frekanslarının altıgen boşluklu kirişte olduğu en düşük frekansların ise kare boşluklu kirişlerde olduğu söylenebilir. Dördüncü ve beşinci modların en yüksek frekansların beşgen boşluklu kirişlerde olduğu en düşük frekansların ise boşluksuz kirişlerde olduğu bulunmuştur. Yedinci mod için en yüksek değerler boşluksuz kirişte en düşük değerler ise kare boşluklu kirişlerde oluşmuştur. Sekizinci modun değerleri incelendiğinde ise en yüksek titreşim frekanslarının dairesel, kare ve altıgen kirişlerde olduğu ve en düşük frekanslarının ise boşluksuz kirişlerde olduğu bulunmuştur. Dokuzuncu modun değerleri incelendiğinde ise en yüksek titreşim frekanslarının boşluksuz kirişlerde olduğu ve en düşük frekanslarının ise dairesel boşluklu kirişlerde olduğu bulunmuştur, Onuncu mod için irdeleme yapıldığında altıgen boşluklu kirişlerin frekans değerinin en yüksek olduğu ve dairesel boşluklu petek kirişlerin frekanslarının en düşük olduğu saptanmıştır. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 66’da grafik formunda da çizilmiştir.

3.2.1.8. Profil IPE300

Ankastre- Ankastre, Ankastre- Sabit ve Ankastre -Serbest sınır koşulları için IPE300 profilli petek kirişin serbest titreşim frekansları hesaplanarak Tablo 30-32'de listelenmiştir.

Tablo 30. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE300 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 300 (Ankastre - Ankastre)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	68.343	68.239	68.3	68.295	65.081
2	79.113	79.105	79.22	79.167	78.07
3	162.98	150.13	161.26	161.66	158.89
4	165.38	163.19	161.58	164.49	186.81
5	171.35	171.74	171.32	171.26	197.8
6	206.97	207.06	207.15	207.01	204.84
7	240.88	241.95	241.09	241.03	231.13
8	271.84	274.49	274.31	273.91	245.48
9	359.04	323.99	350.14	356.69	287.73
10	370.01	379.38	374.49	372.22	337.19

Tablo 30, IPE300 profiline sahip iki ucu ankastre mesnetli petek kirişin doğal titreşim frekanslarını gösterilmektedir. Birinci mod dairesel boşluklu kirişte en yüksek frekansa sahiptir, bunu beşgen, altıgen ve kare boşluklu kirişleri takip eder ve boşluksuz kiriş ise en düşük frekansa sahiptir. İkinci ve altıncı modlara bakıldığında ise en yüksek frekanslar değerlerinin beşgen boşluklu kirişte en düşük frekans değerlerinin ise boşluksuz kirişlerde olduğu görülmektedir. Bu modlar için dairesel boşluklu, kare boşluklu ve altıgen boşluklu kirişlerin frekansları birbirine yakın çıkmıştır. Üçüncü mod için elde edilen serbest titreşim frekansları dairesel boşluklu kirişlerde en yüksek, beşgen ve altıgen boşluklu kirişlerde birbirine yakın ve kare boşluklu kirişlerde ise en düşük çıkmıştır. Dördüncü mod için hesaplanan frekanslar incelendiğinde en yüksek değerlerin boşluksuz kirişlerde en düşük değerlerin ise beşgen boşluklu kirişlerde olduğu saptanmıştır. Beşinci mod da benzer şekilde incelendiğinde en düşük frekans değerlerinin altıgen ve en yüksek doğal titreşim frekanslarının ise boşluksuz kirişlerde olduğu görülmüştür. Yedinci mod için en yüksek frekans değerlerine kare boşluklu petek kirişi sahip iken, en düşük titreşim frekanslarına ise boşluksuz petek kirişi sahiptir. Bu mod için altıgen ve beşgen

boşluklu kirişlerin titreşim frekansları yakınlık göstermektedir. Sekizinci mod için ise en yüksek frekans değerlerinin altıgen boşluklu petek kirişinde en düşük frekans değerlerinin ise gövdesinde boşluksuz kirişlerde olduğu belirlenmiştir. Dokuzuncu mod incelendiğinde, beşgen ve altıgen boşluklu kirişlerin frekanslarının birbirine yakın olduğu dairesel boşluklu kirişlerinin frekanslarının en yüksek olduğu görülmüştür. Bu mod için de en düşük frekans değerlerininim sırasıyla boşluksuz ve kare boşluklu kirişlerde olduğu bulunmuştur. Onuncu mod için elde edilen değerlerinin kıyaslamasına göre kare boşluklu kirişlerin en yüksek ve boşluksuz kirişlerin en düşük frekans değerlerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Doğal titreşim frekanslarının karşılaştırması Şekil 67'de grafiğe dökülmüştür.

Tablo 31. Ankastre – Sabit mesnetli IPE300 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 300 (Ankastre - Sabit)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	20.563	20.664	20.667	20.778	19.462
2	47.326	47.245	47.295	47.425	45.019
3	85.327	85.388	85.353	85.978	83.193
4	132.02	122.57	129.73	131.49	134.24
5	142.21	141.94	141.23	142.38	147.61
6	150.93	150.53	149.04	149.92	174.84
7	193.45	193.7	192.23	193.36	203.99
8	211.33	211.38	211.36	211.81	208.88
9	248.12	248.57	248.19	248.43	217.36
10	297.75	300.2	298.46	302.09	270.88

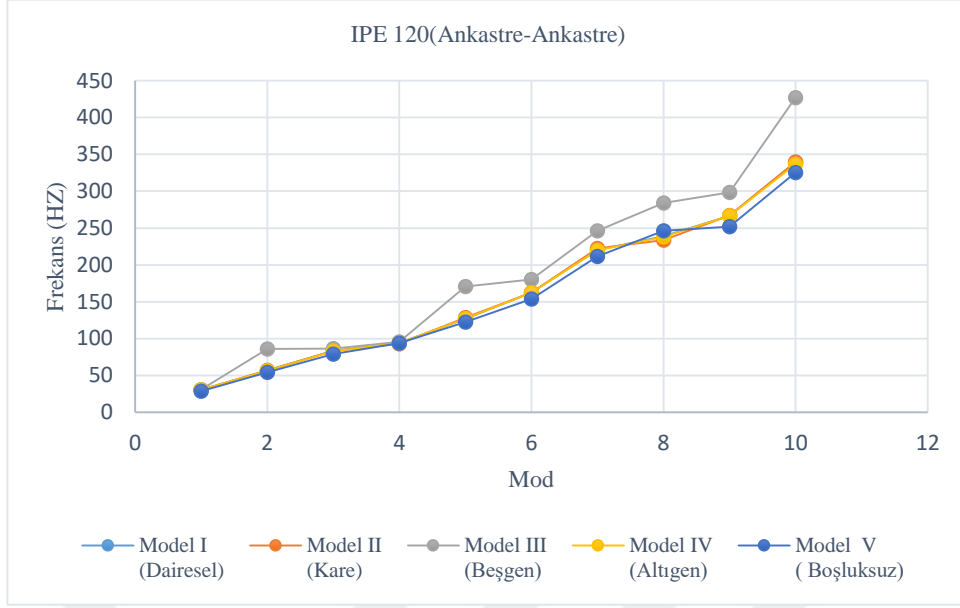
Tablo 31, IPE300 profiline sahip ankastre- sabit mesnetli petek kirişin doğal titreşim frekanslarını gösterilmektedir. Birinci, ikinci, üçüncü, sekizinci ve onuncu modlar için en yüksek frekanslar altıgen boşluklu petek kirişte oluşurken en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişlere aittir. Bu modlar için dairesel, beşgen ve kare boşluklu kirişlerin serbest titreşim frekans değerleri yakınsamaktadır. Dördüncü mod incelendiğinde ise boşluksuz kirişlerinin frekans değerlerinin en yüksek olduğu kare boşluklu petek kirişlerinin serbest titreşim frekanslarının ise en düşük olduğu görülmüştür. Beşinci ila yedinci modlar için ise; en yüksek frekanslarının boşluksuz kirişlerde olduğu en düşük frekanslarının ise beşgen tipi kirişlerde olduğu söylenebilir. Dokuzuncu modda kare boşluklu kirişler en yüksek boşluksuz kirişler

en düşük frekanslara sahiptir. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 68’de grafik formunda da çizilmiştir.

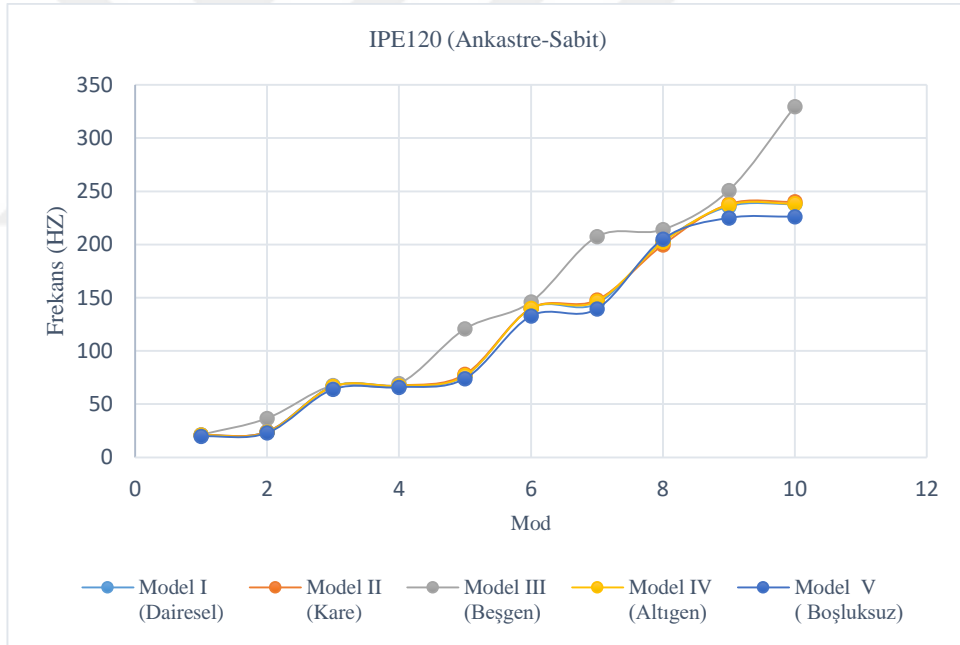
Tablo 32. Ankastre – serbest mesnetli IPE300 petek kiriş için elde edilen serbest titreşim frekansları (Hz)

IPE 300 (Ankastre - serbest)					
Mod	Dairesel boşluk (I)	Kare Boşluk (II)	Beşgen Boşluk (III)	Altıgen Boşluk (IV)	Boşluksuz (V)
1	10.879	10.865	10.869	10.875	10.486
2	20.564	20.665	20.668	20.779	19.462
3	37.698	36.712	37.427	37.636	38.03
4	67.158	67.071	67.121	67.123	64.418
5	85.334	85.403	85.364	85.988	83.195
6	148.18	147.59	145.49	146.51	162.19
7	173.11	165.52	172.75	172.68	174.97
8	179.12	173.26	175.77	178.31	205.22
9	197.75	198.16	196.74	197.66	205.3
10	211.4	211.46	211.42	211.9	208.89

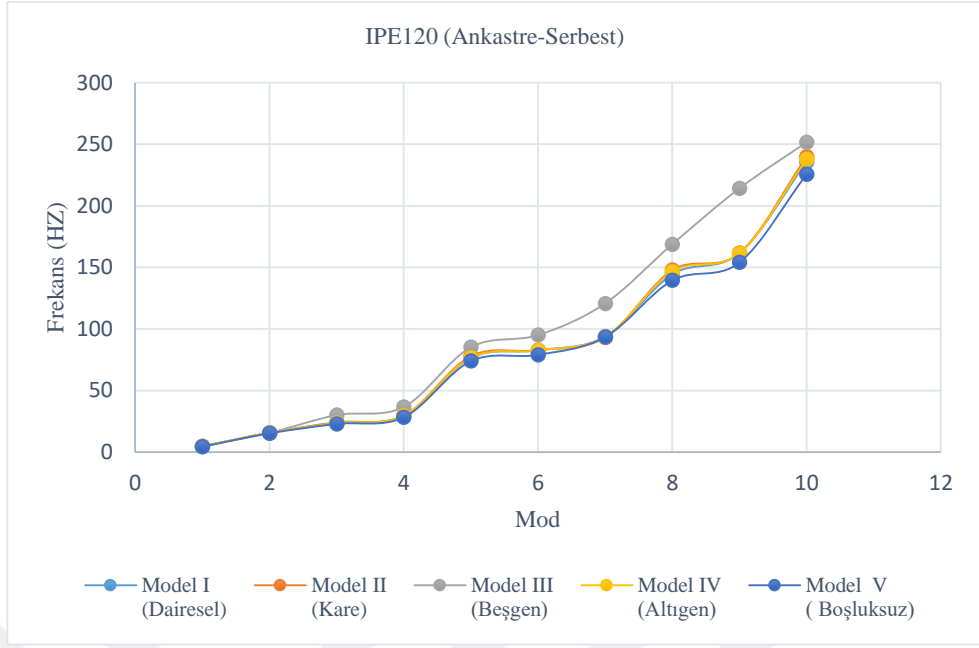
Tablo 32 , IPE300 profiline sahip ankastre- serbest mesnetli petek kirişin doğal titreşim frekanslarını gösterilmektedir. Birinci ve dördüncü modlar için en yüksek frekanslar dairesel boşluklu petek kirişte oluşurken en düşük frekanslar ise boşluksuz kirişlere aittir. Bu modlar için altıgen, beşgen ve kare boşluklu kirişlerin serbest titreşim frekans değerleri yakınsamaktadır. İkinci, beşinci ve onuncu modlar incelendiğinde ise boşluksuz kirişlerin frekans değerlerinin en düşük olduğu altıgen boşluklu petek kirişlerin serbest titreşim frekanslarının ise en yüksek olduğu görülmüştür. Bu modlar için beşgen ve altıgen boşluklu kirişlerin serbest titreşim frekans değerlerin yakın olduğu saptanmıştır. Üçüncü, yedinci ve sekizinci modlar için ise; en yüksek frekanslarının boşluksuz kirişlerde olduğu en düşük frekanslarının ise sırasıyla kare ve beşgen tipi kirişlerde olduğu söylenebilir. Altıncı ve dokuzuncu modlarda beşgen boşluklu kirişler en düşük, boşluksuz kirişler en yüksek frekanslara sahiptir. Bu kiriş için elde edilen doğal titreşim frekansları şekil 69’da grafik formunda da çizilmiştir.



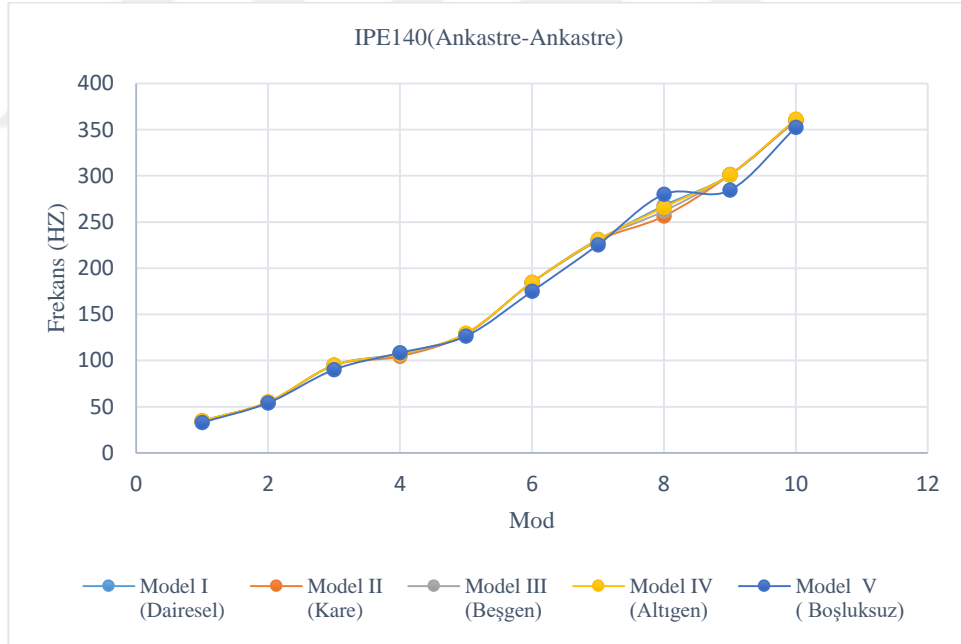
Şekil 46. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 120 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



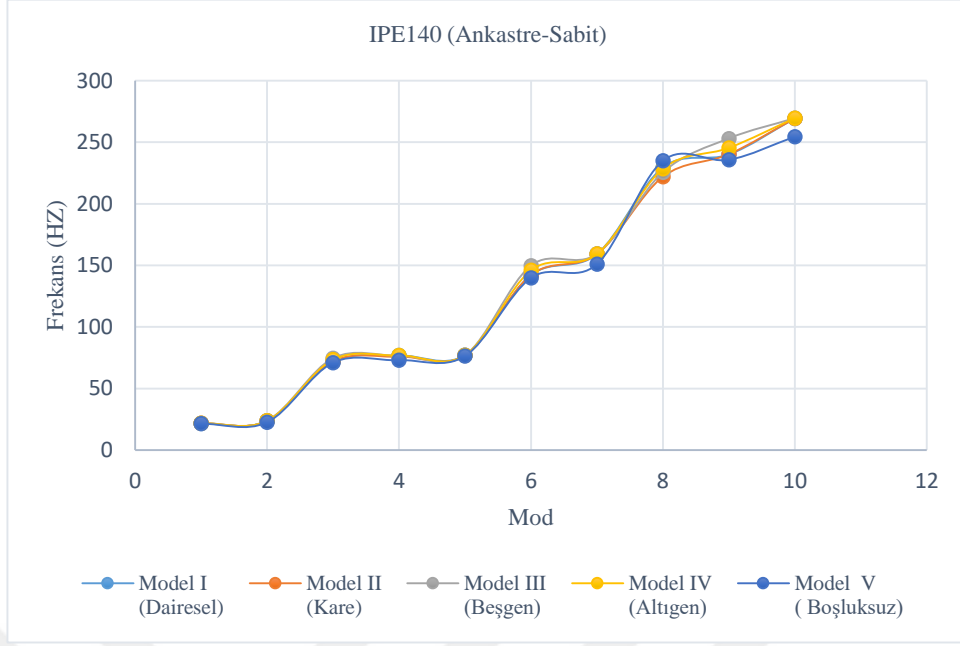
Şekil 47. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 120 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



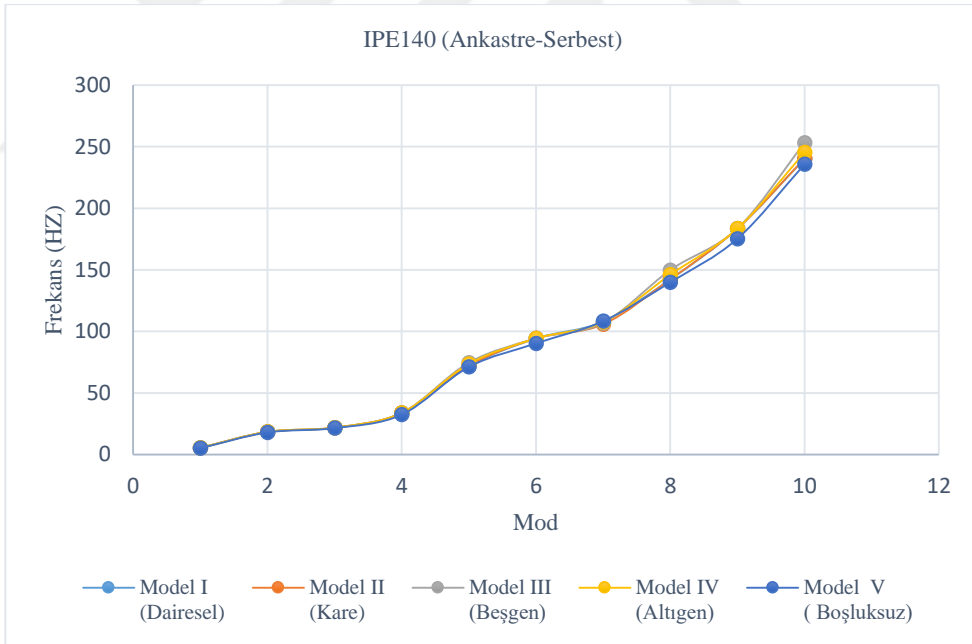
Şekil 48. Ankastre – serbest mesnetli IPE 120 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



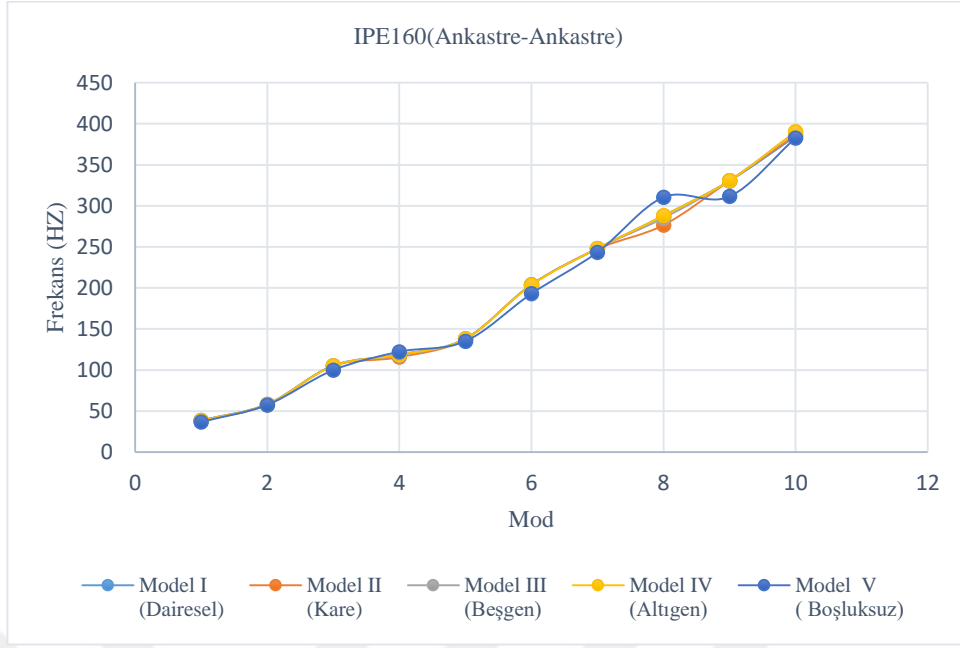
Şekil 49. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 140 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



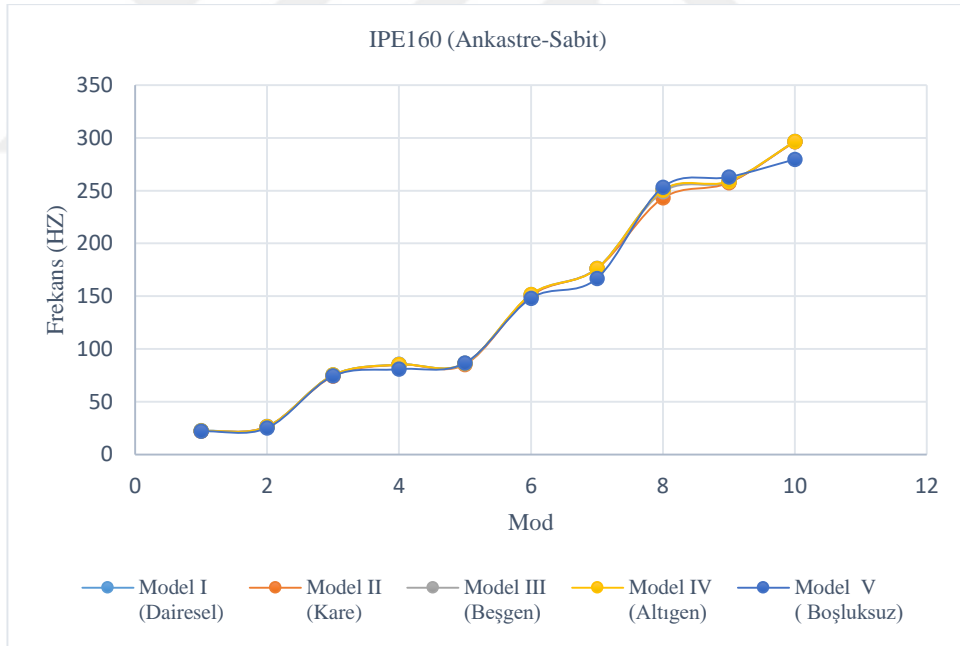
Şekil 50. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 140 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



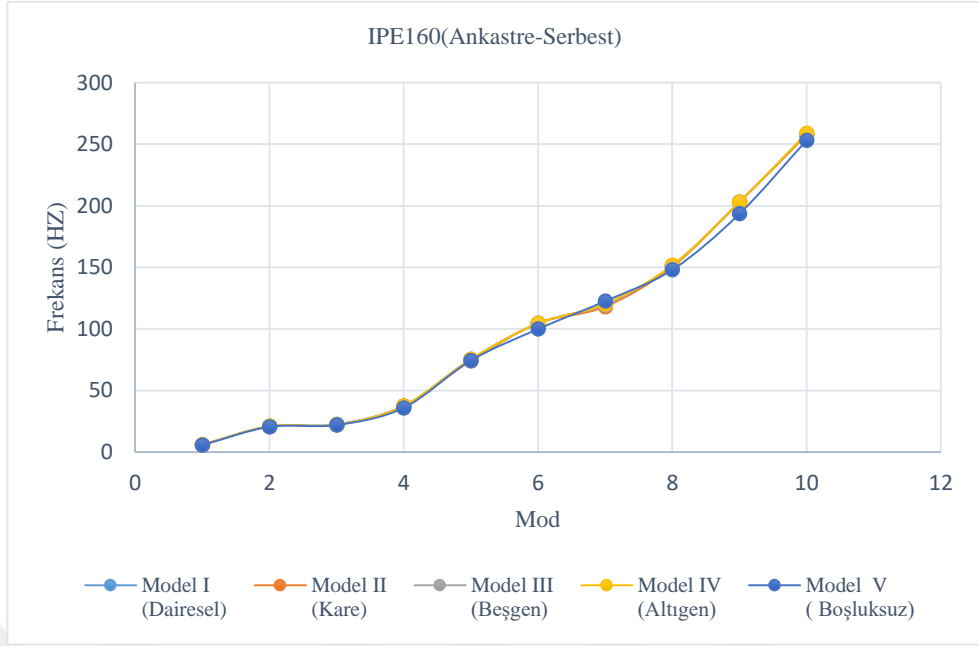
Şekil 51. Ankastre – serbest mesnetli IPE 140 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



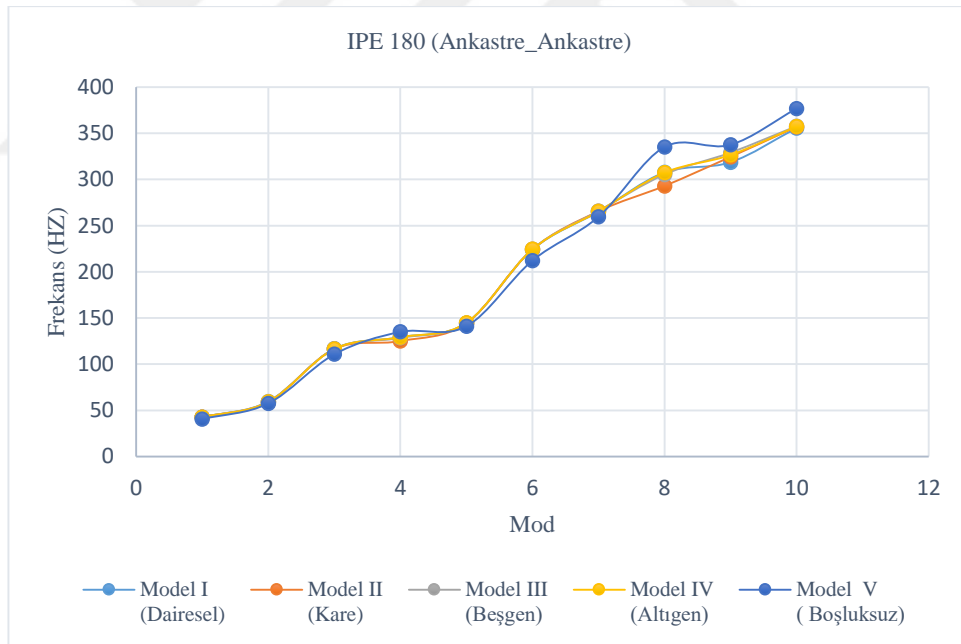
Şekil 52. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 160 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



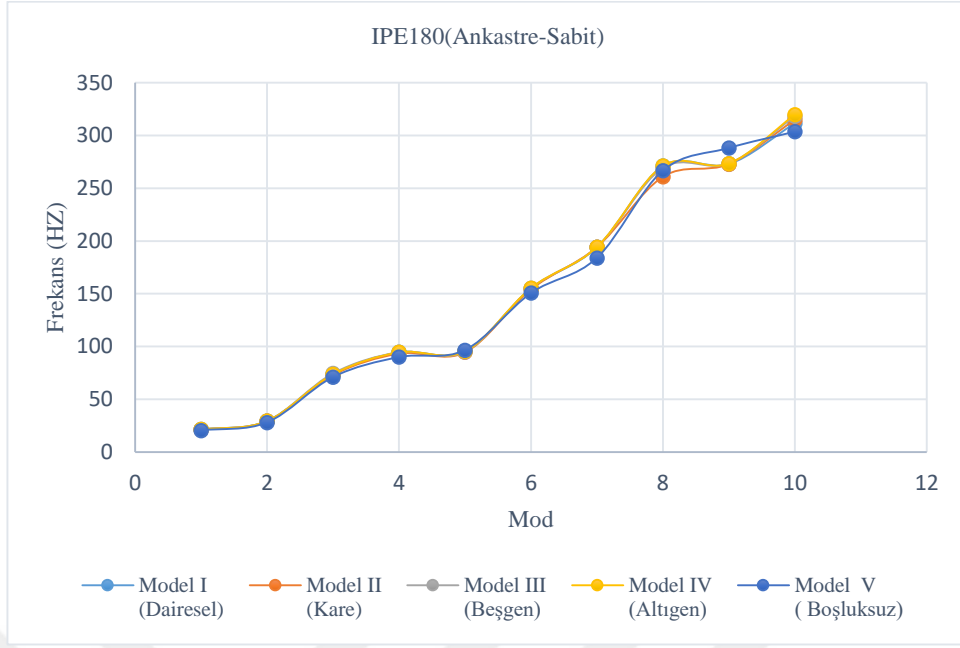
Şekil 53. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 160 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



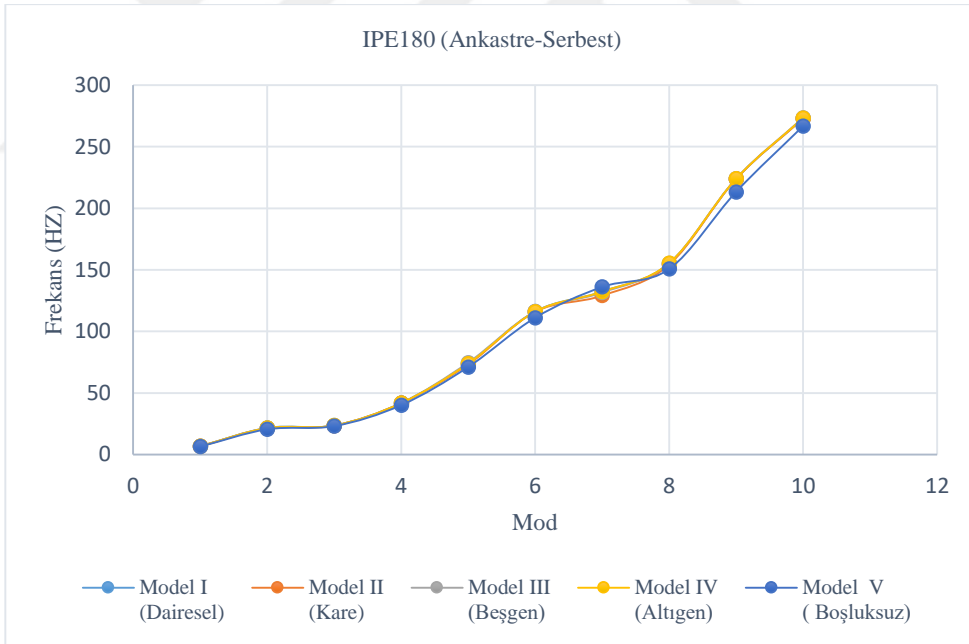
Şekil 54. Ankastre – serbest mesnetli IPE 160 - petek kirişi için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



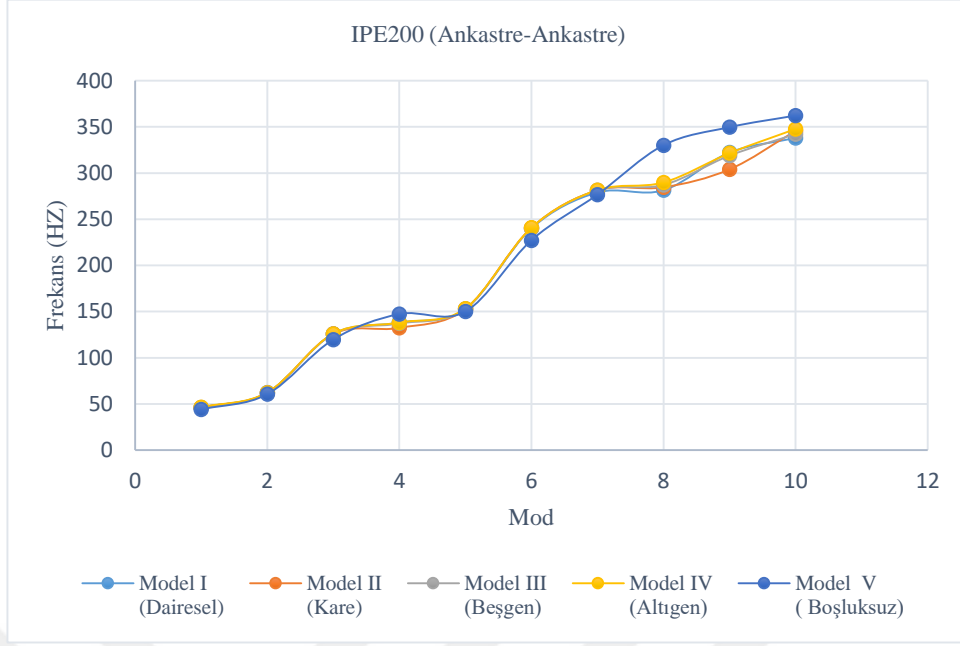
Şekil 55. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 180 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



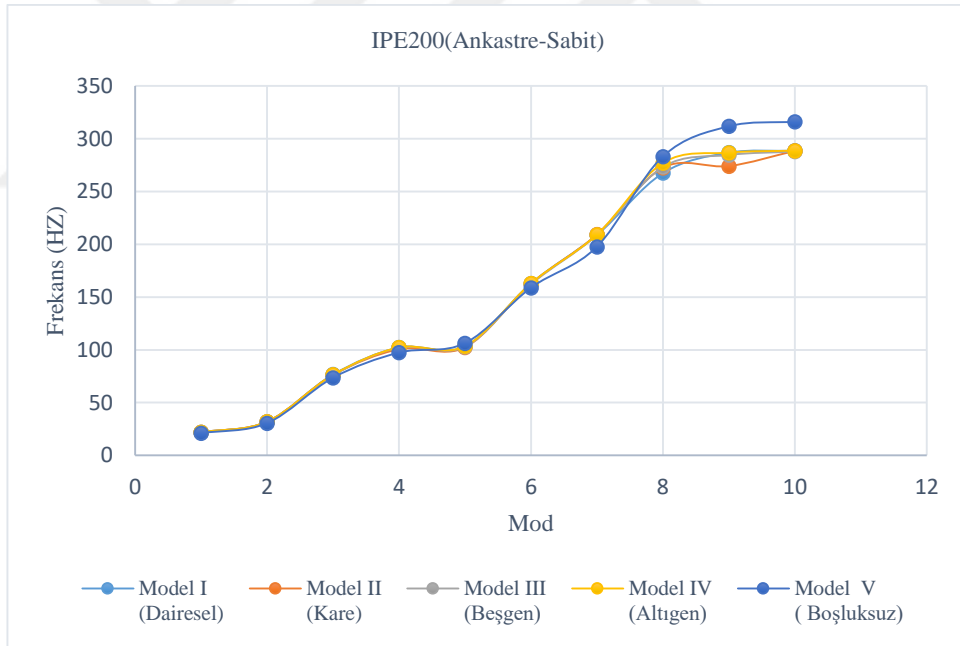
Şekil 56. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 180 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



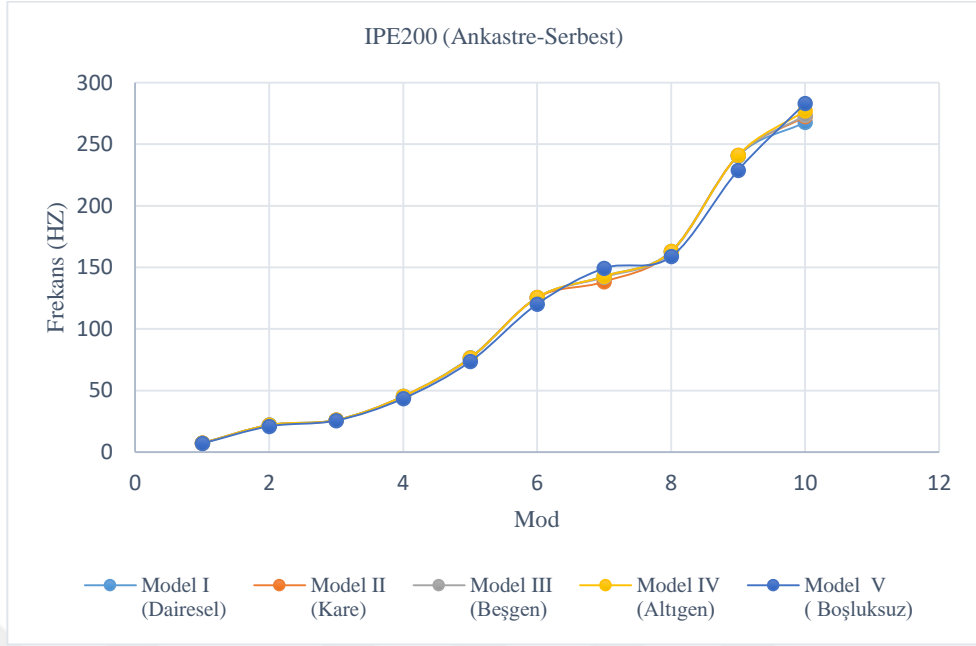
Şekil 57. Ankastre – serbest mesnetli IPE 180 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



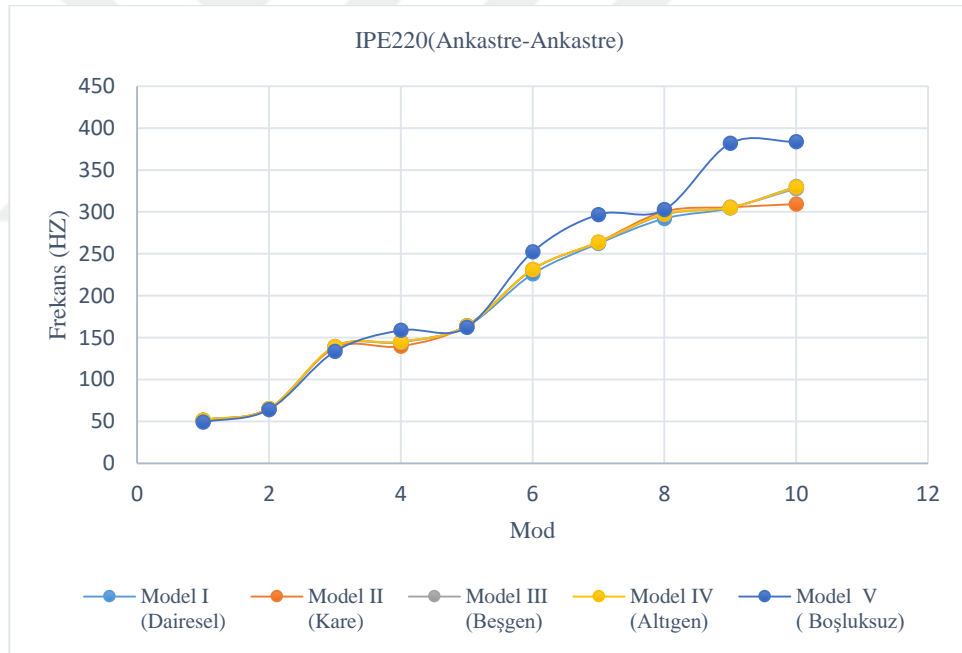
Şekil 58. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 200 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



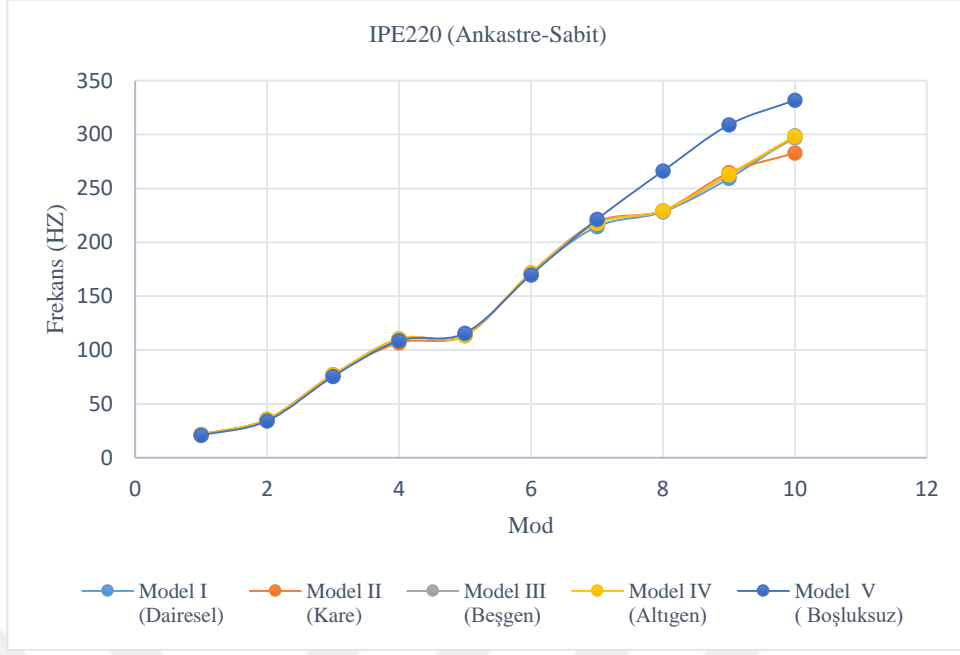
Şekil 59. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 200 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



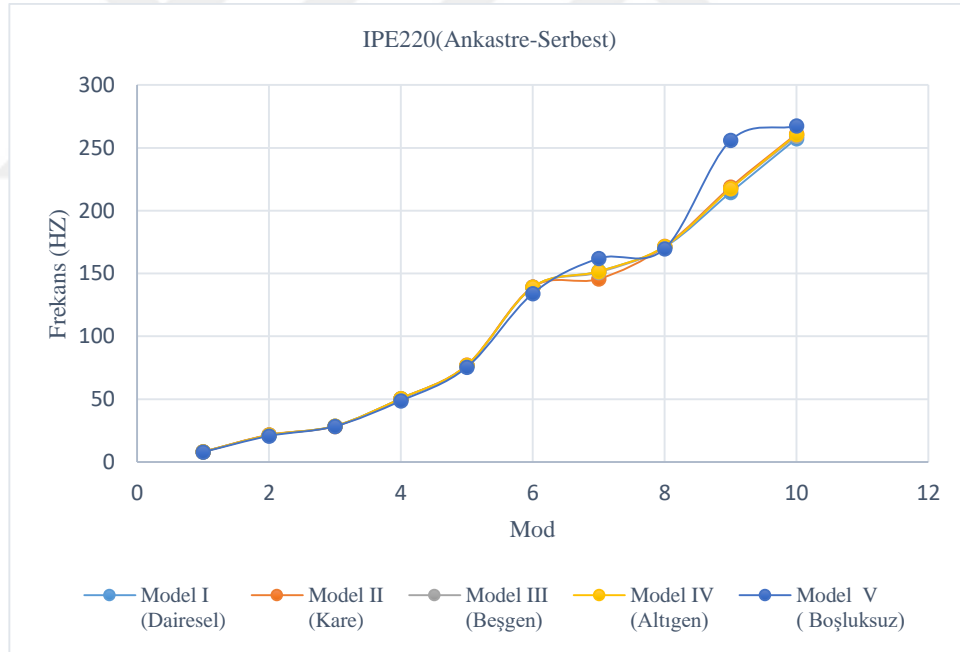
Şekil 60. Ankastre – serbest mesnetli IPE 200- petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



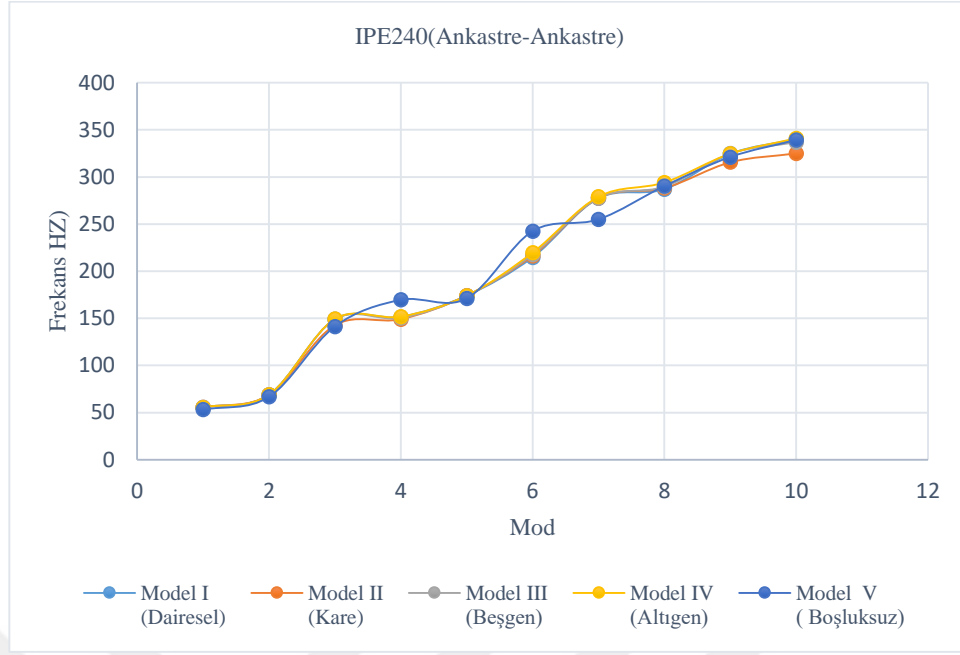
Şekil 61. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 220 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



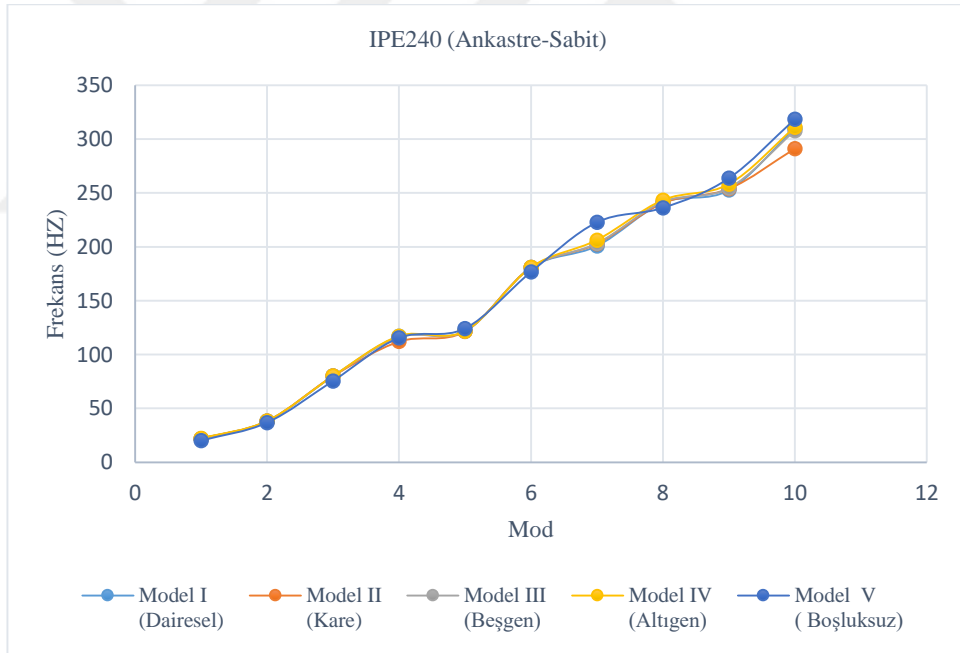
Şekil 62. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 220- petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



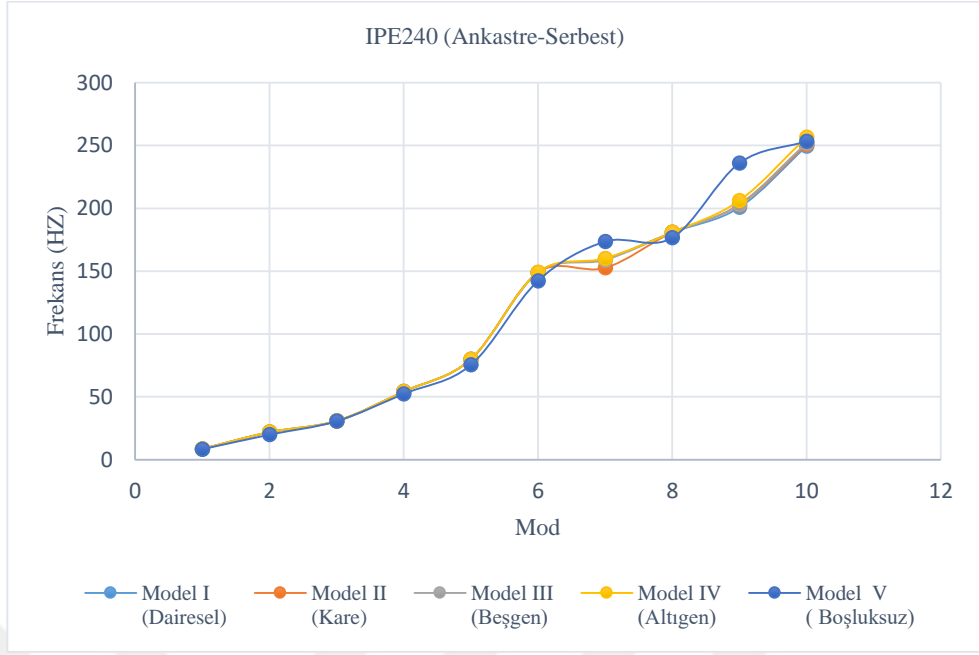
Şekil 63. Ankastre – serbest mesnetli IPE 220 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



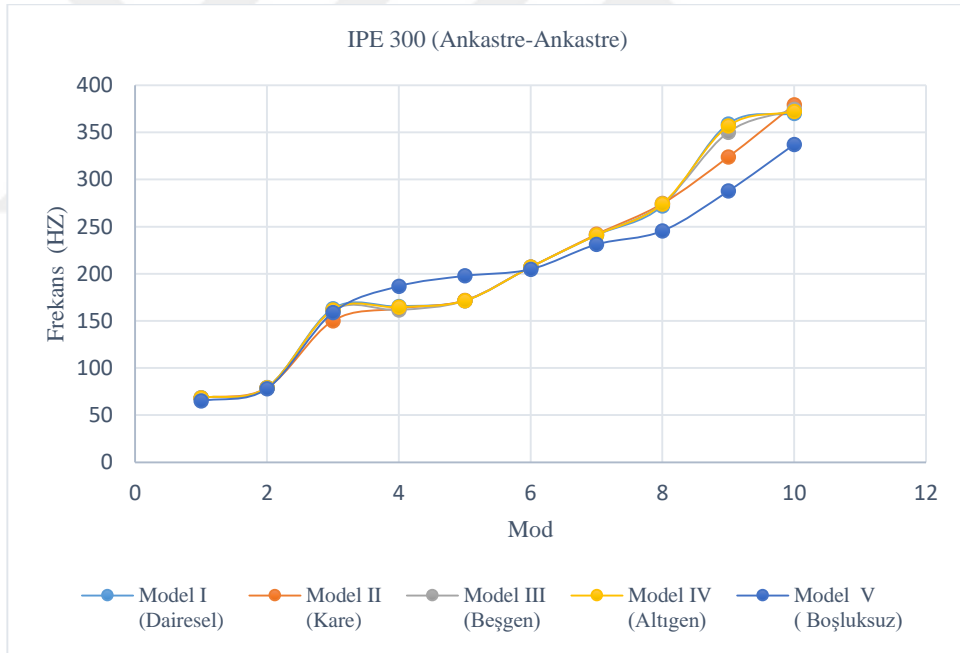
Şekil 64. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 240 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



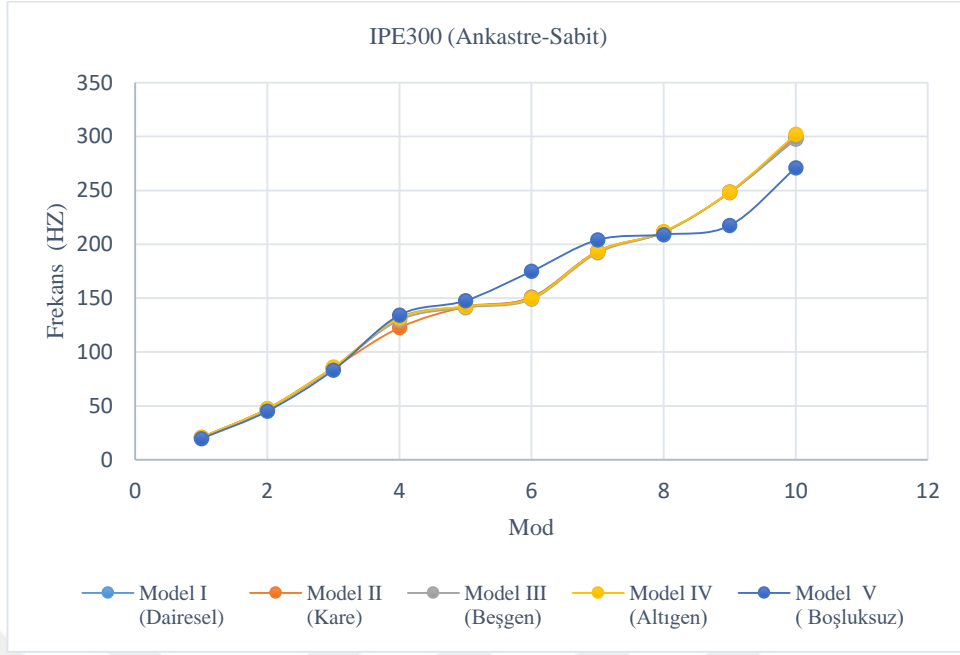
Şekil 65. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 240 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



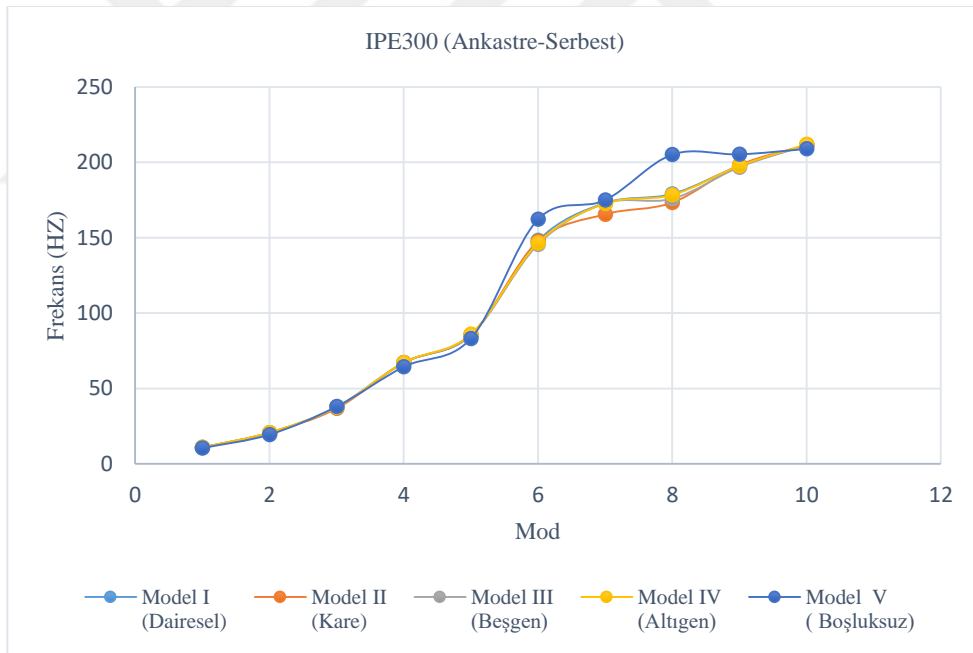
Şekil 66. Ankastre – serbest mesnetli IPE 240 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



Şekil 67. Ankastre – Ankastre mesnetli IPE 300 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



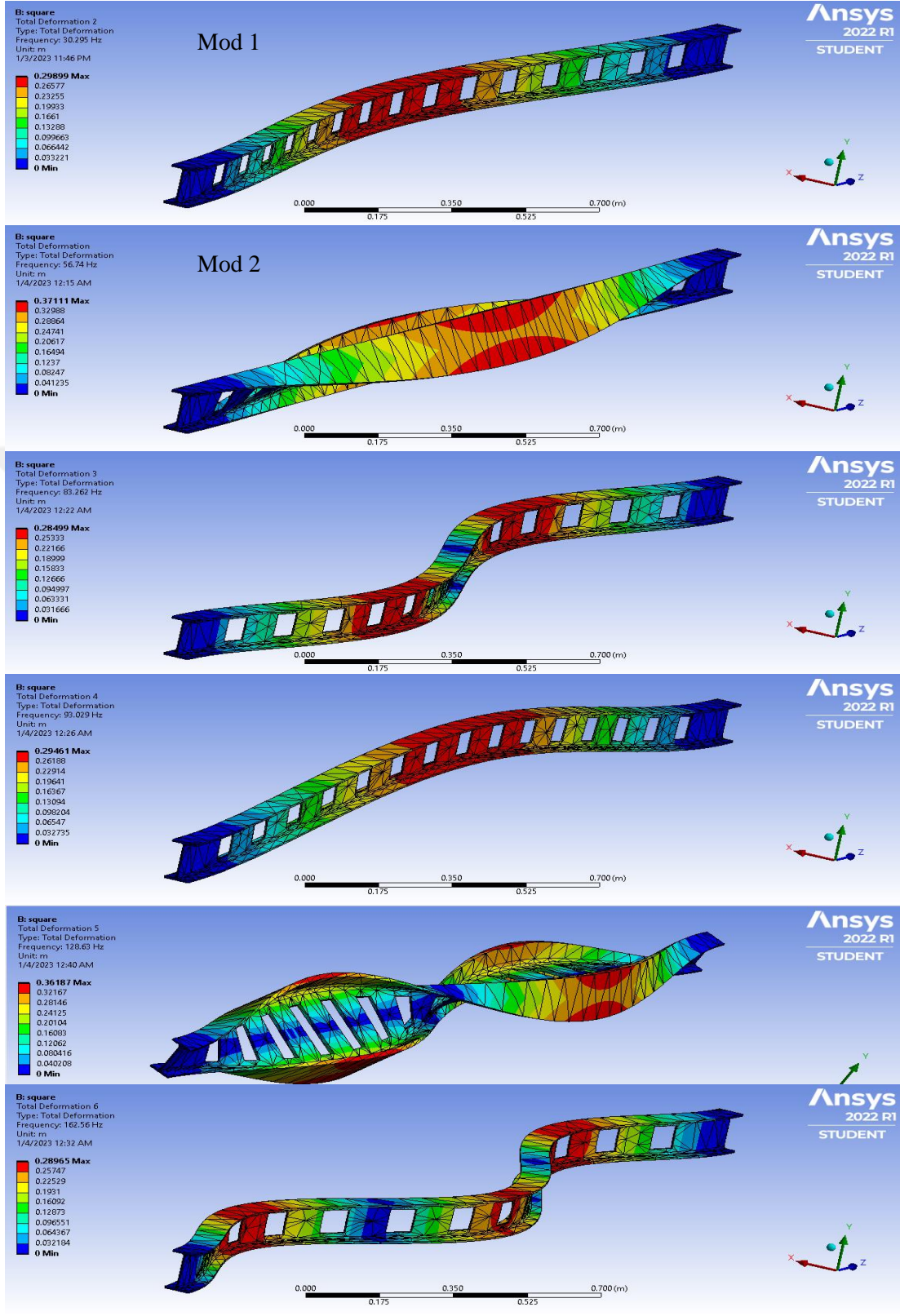
Şekil 68. Ankastre – Sabit mesnetli IPE 300 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması



Şekil 69. Ankastre – serbest mesnetli IPE300 - petek kiriş için serbest titreşim frekanslarının karşılaştırılması

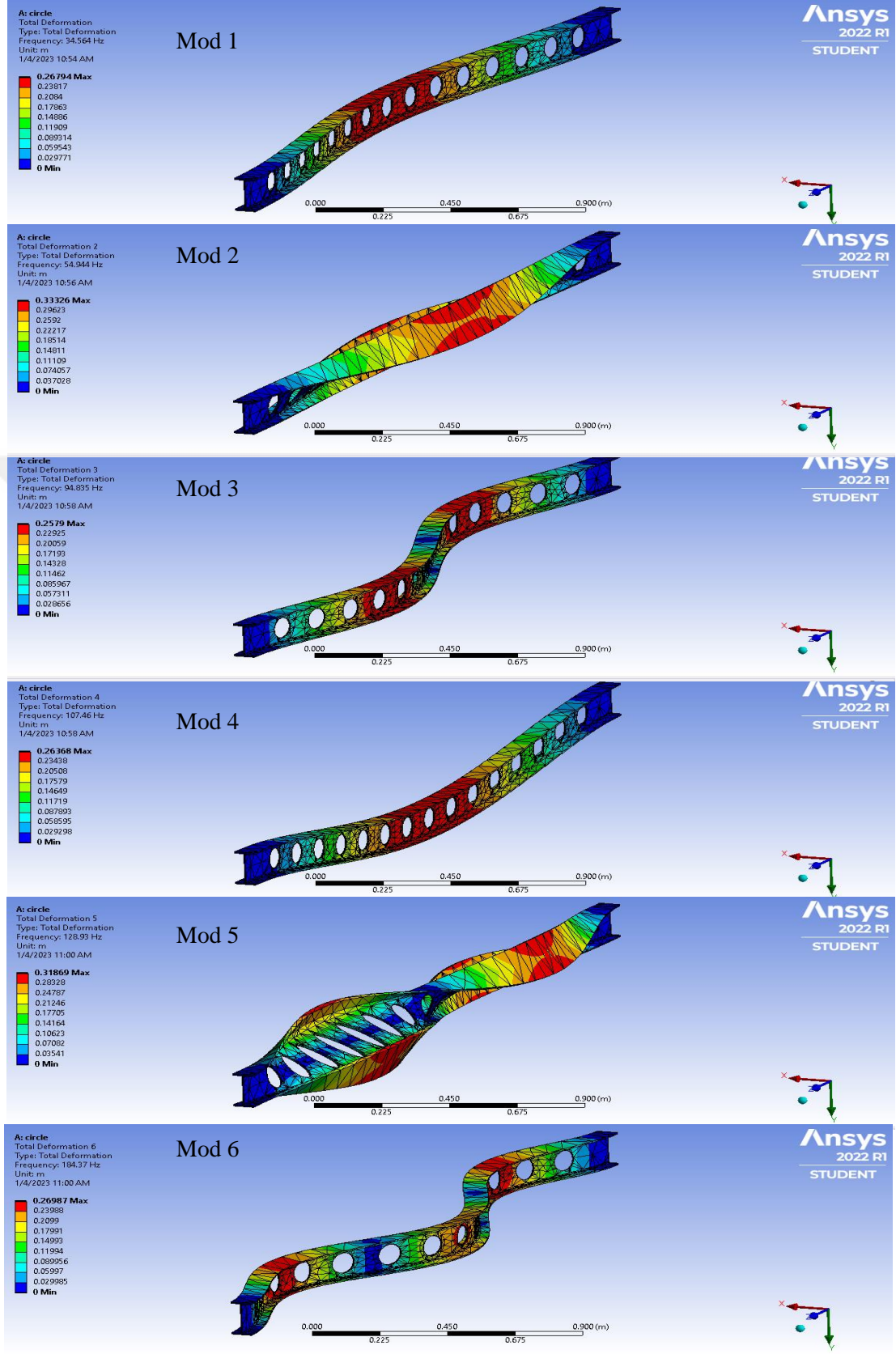
Ankastre – ankastre mesnetli petek kirişlerin mod şekilleri (IPE120 (II), IPE140 (I), IPE160 (III), IPE180 (IV)) elde edilerek şekil (70- 73)'da çizilmiştir.

(Ankastre – Ankastre) IPE 120 - Model – II



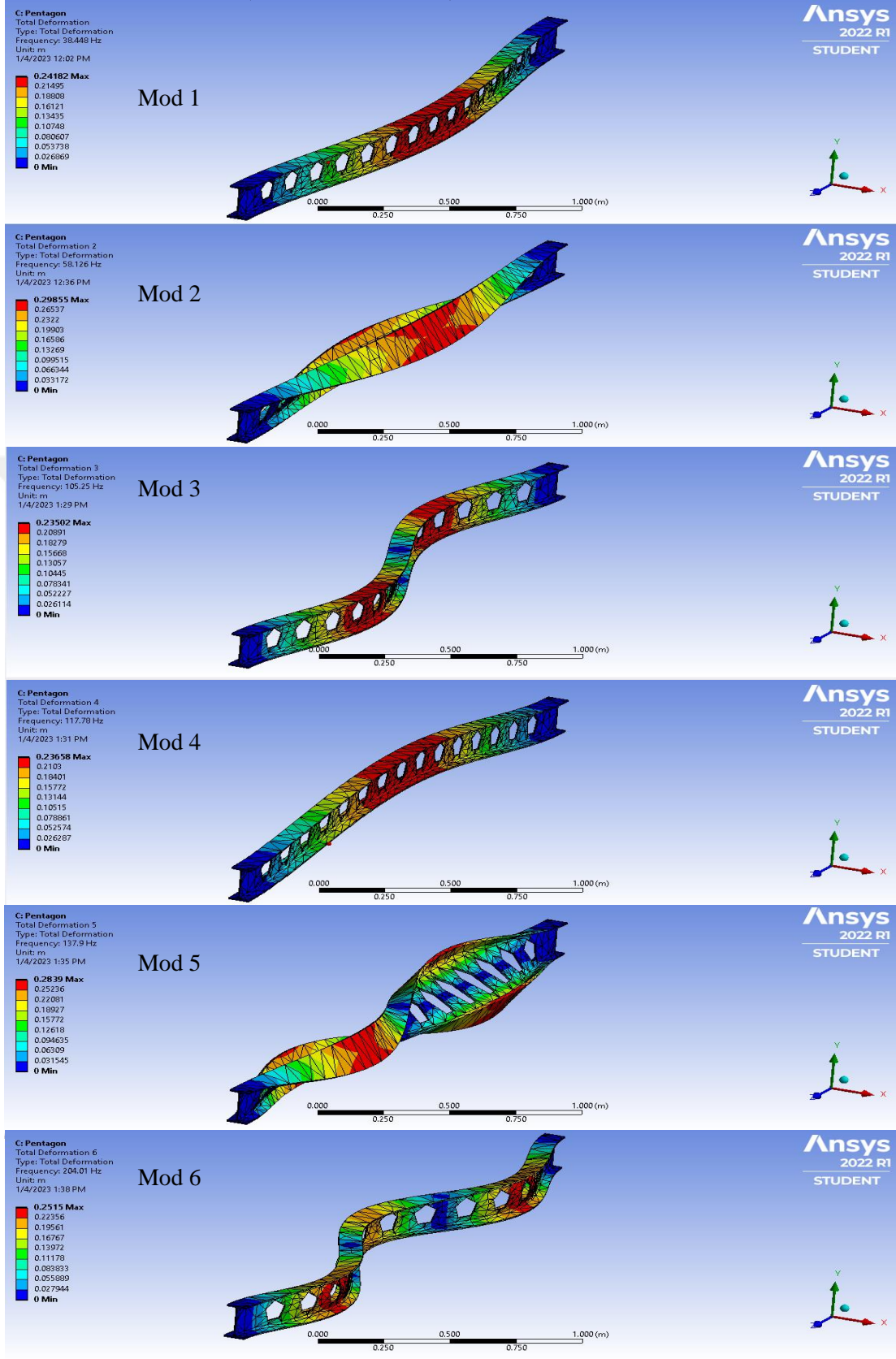
Şekil 70. Ankastre – ankastre mesnetli IPE120 - petek kiriş, model II için elde edilen ilk altı mod şekli

(Ankastre – Ankastre) IPE 140 - Model - I



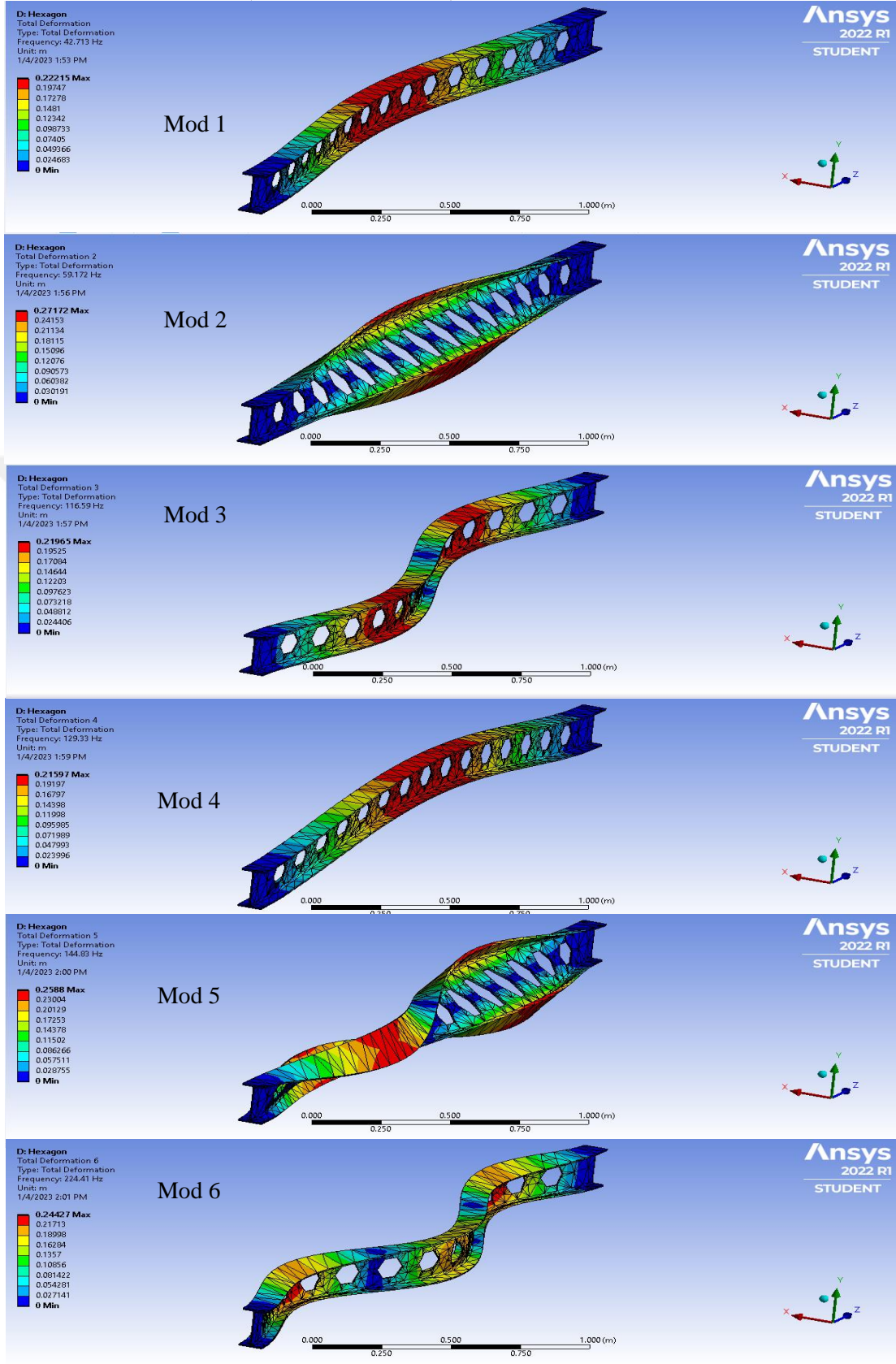
Şekil 71. Ankastre – ankastre mesnetli IPE140 - petek kiriş, model I için elde edilen ilk altı mod şekli

(Ankastre – Ankastre) IPE 160 - Model - III



Şekil 72. Ankastre – ankastre mesnetli IPE160 - petek kiriş, model III için elde edilen ilk altı mod şekli

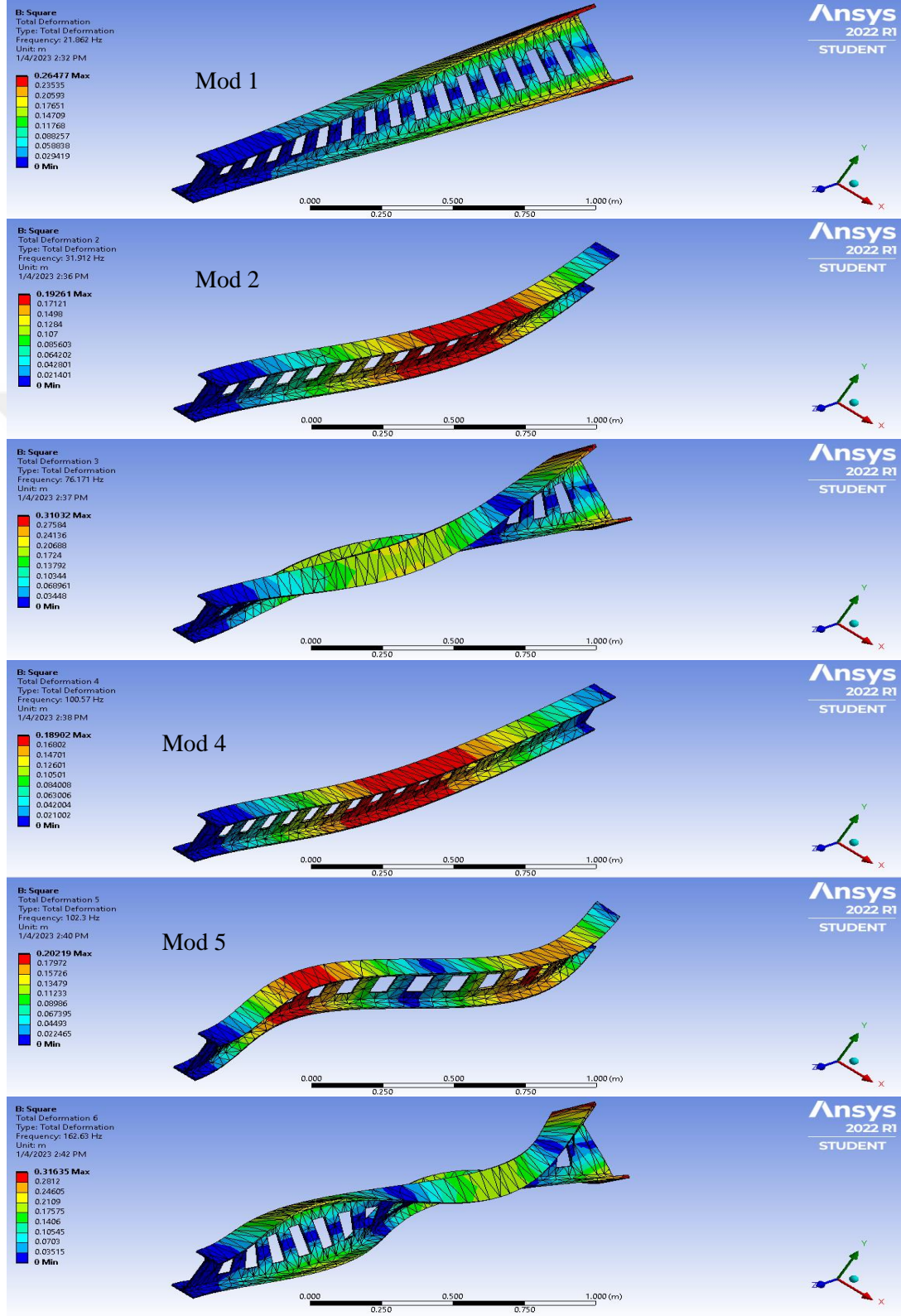
(Ankastre – Ankastre) IPE 180 - Model - IV



Şekil 73. Ankastre – ankastre mesnetli IPE180 - petek kiriş, model IV için elde edilen ilk altı mod şekli

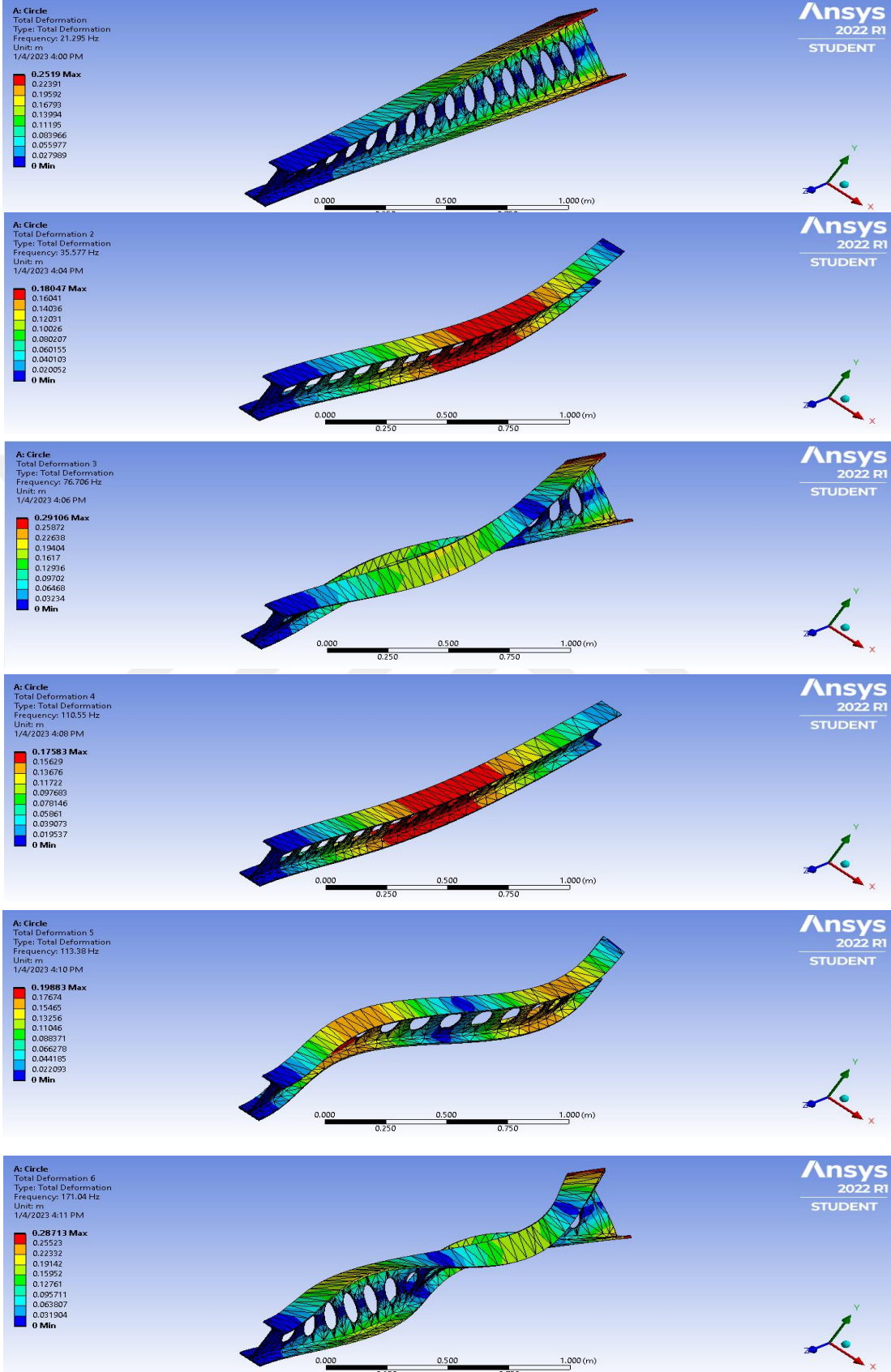
Ankastre – sabit mesnetli petek kirişlerin mod şekilleri (IPE200 (II),IPE220 (I) ,IPE240 (III) , IPE300 (IV)) elde edilerek şekil (74- 77)'da çizilmiştir.

(Ankastre – Sabit) IPE 200 - Model - II



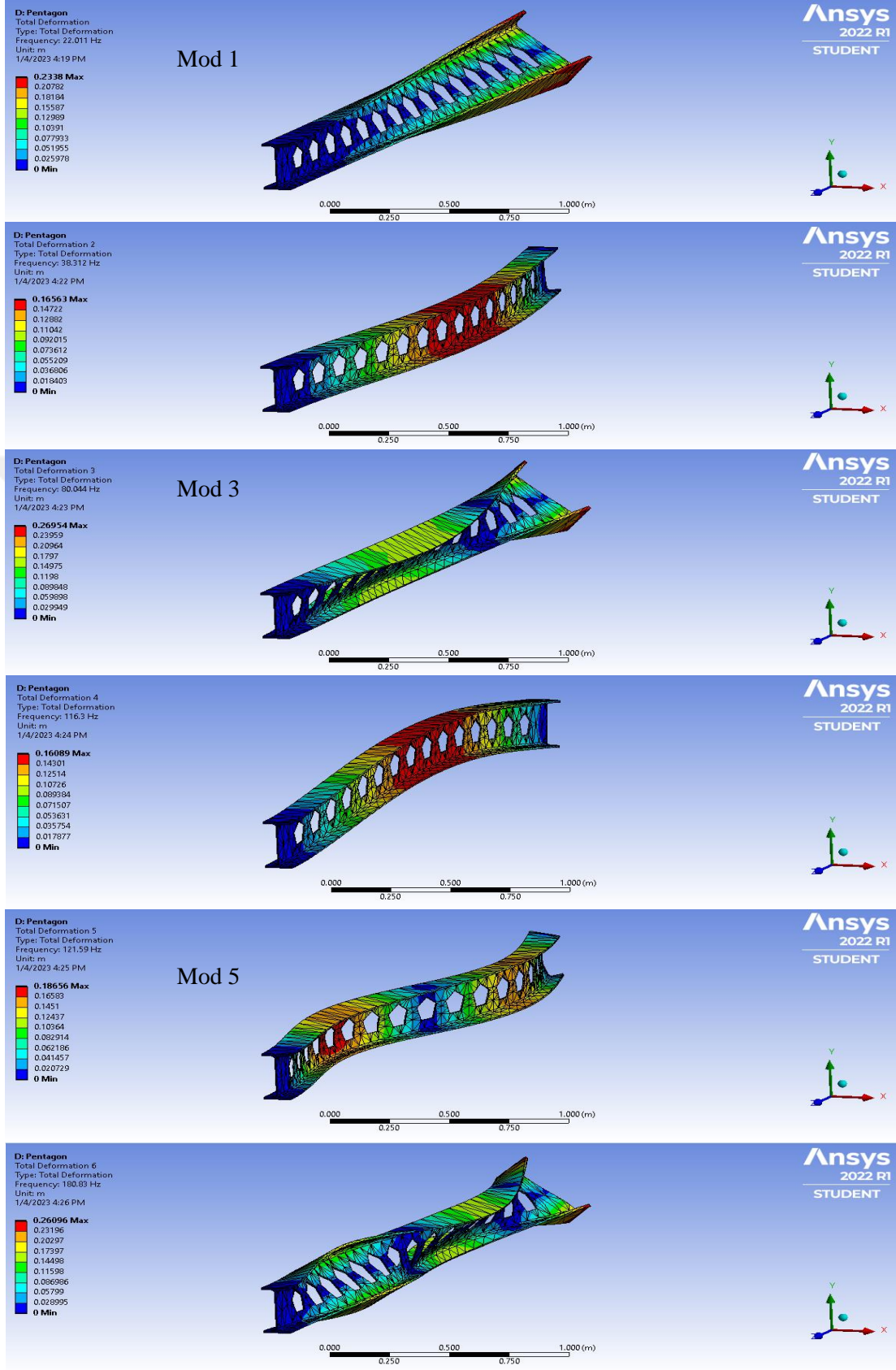
Şekil 74. Ankastre – sabit mesnetli IPE200 - petek kiriş, model II için elde edilen ilk altı mod şekli

(Ankastre – Sabit) IPE 220 - Model - I



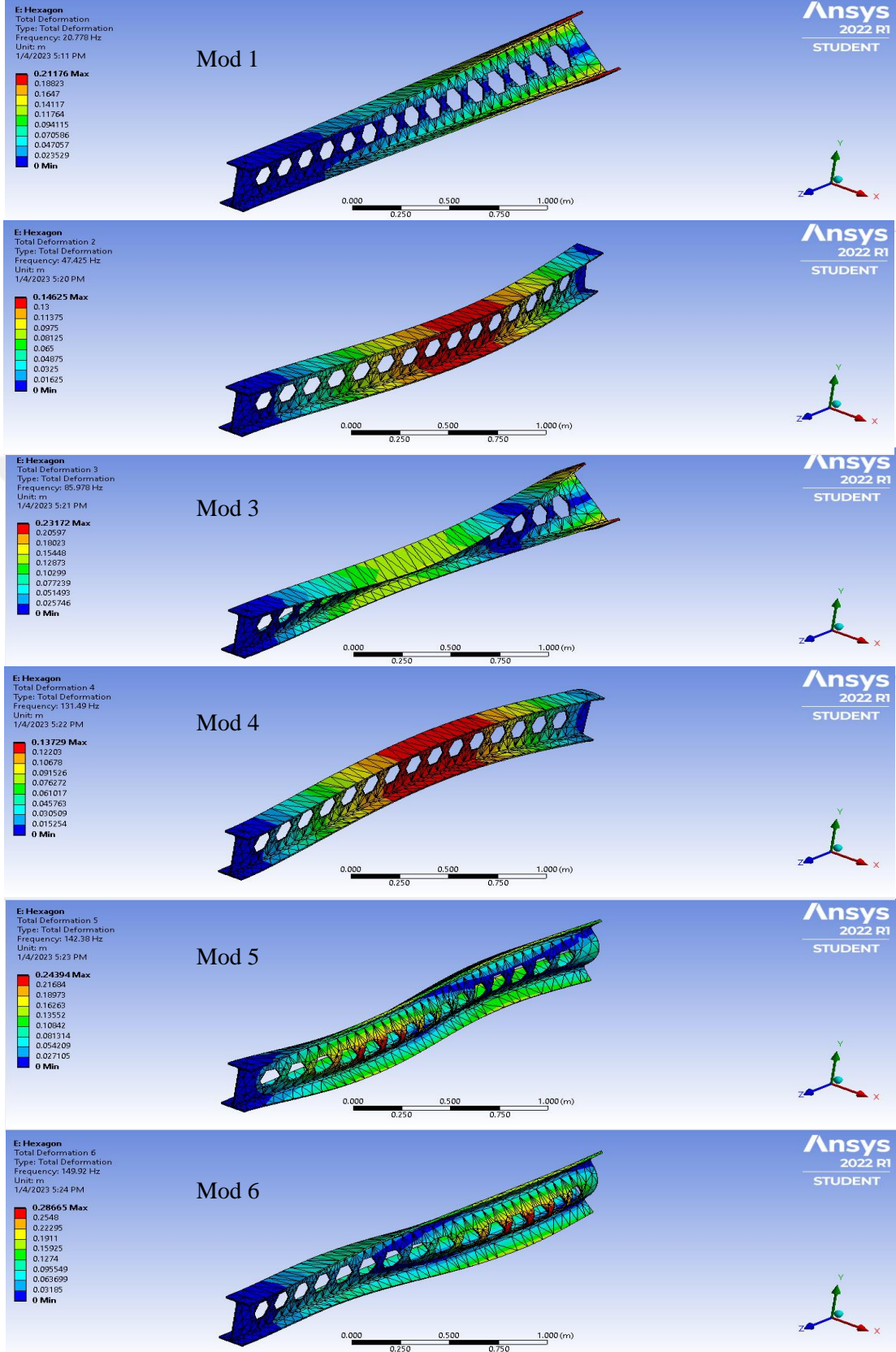
Şekil 75. Ankastre – sabit mesnetli IPE220 - petek kiriş, model I için elde edilen ilk altı mod şekli

(Ankastre – Sabit) IPE 240 - Model - III



Şekil 76. Ankastre – sabit mesnetli IPE240 - petek kiriş, model III için elde edilen ilk altı mod şekli

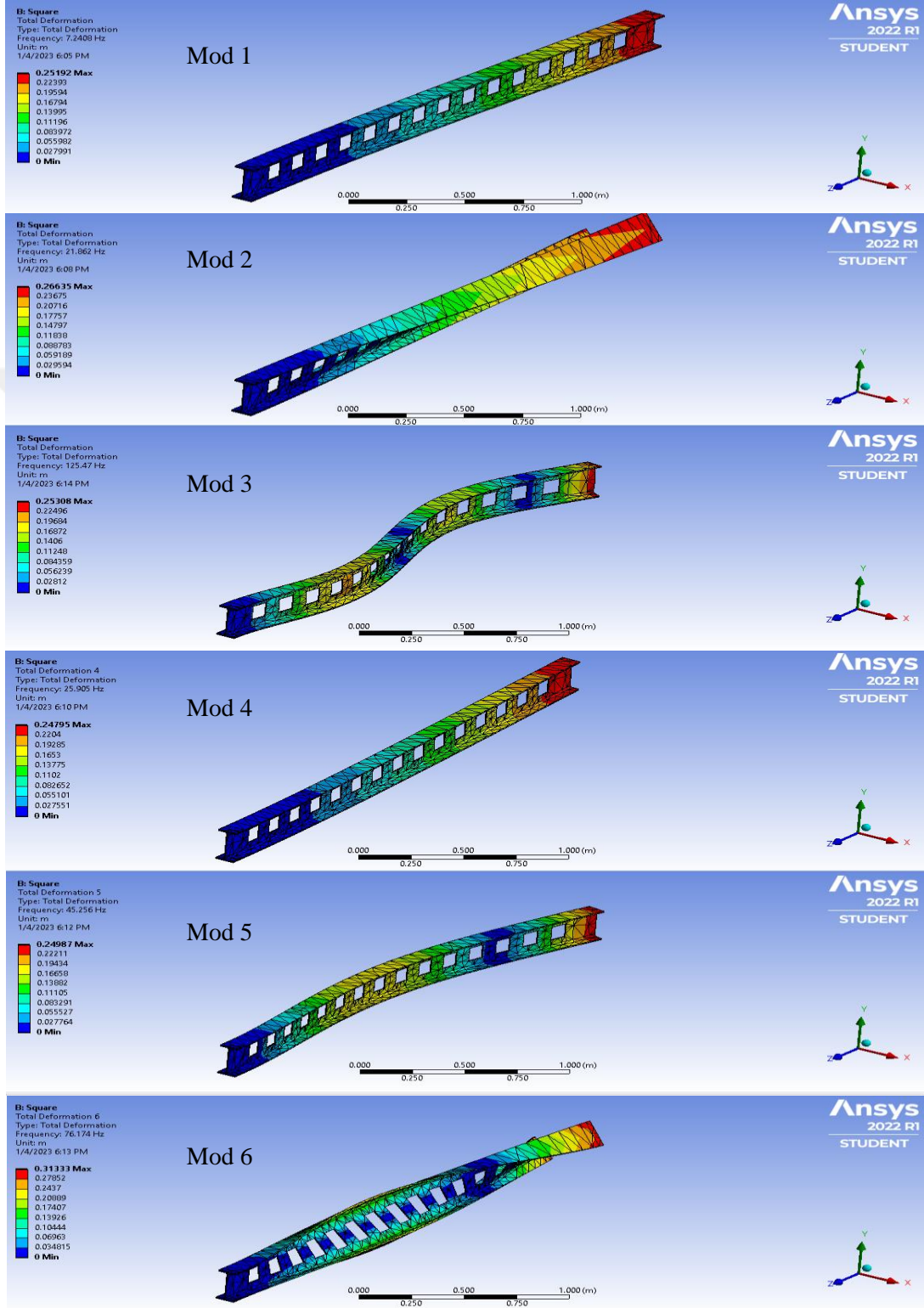
(Ankastre – Sabit) IPE 220 - Model - IV



Şekil 77. Ankastre – sabit mesnetli IPE300 - petek kiriş, model IV için elde edilen ilk altı mod şekli

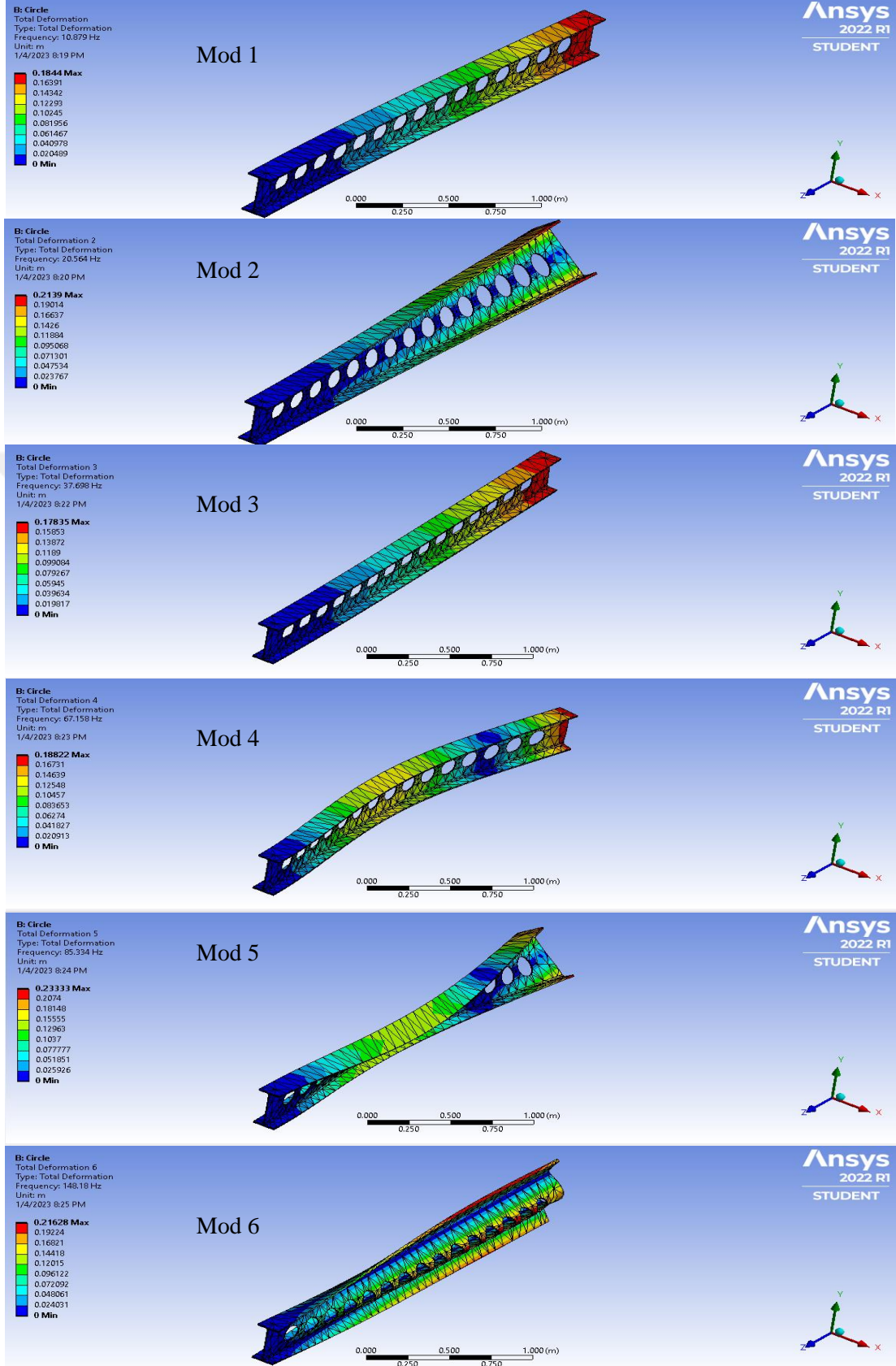
Ankastre – serbest mesnetli petek kirişlerin mod şekilleri (IPE200 (II),IPE300 (I) ,IPE160 (III) , IPE160 (IV)) elde edilerek şekil (78- 81)'da çizilmiştir.

(Ankastre – Serbest) IPE 200 - Model - II



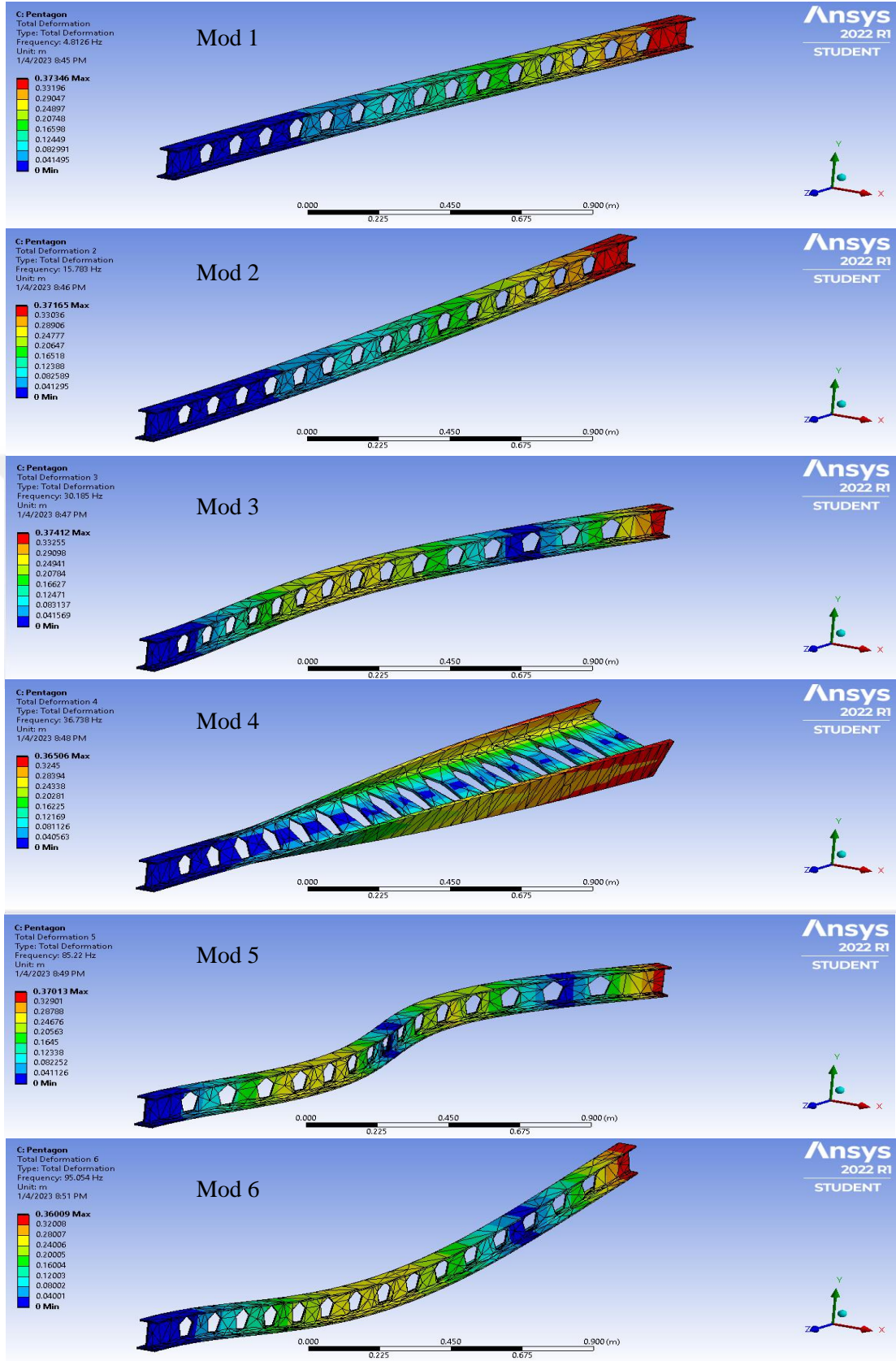
Şekil 78. Ankastre – serbest mesnetli IPE200 - petek kiriş, model I için elde edilen ilk altı mod şekli

(Ankastre – Serbest) IPE 300 - Model - I



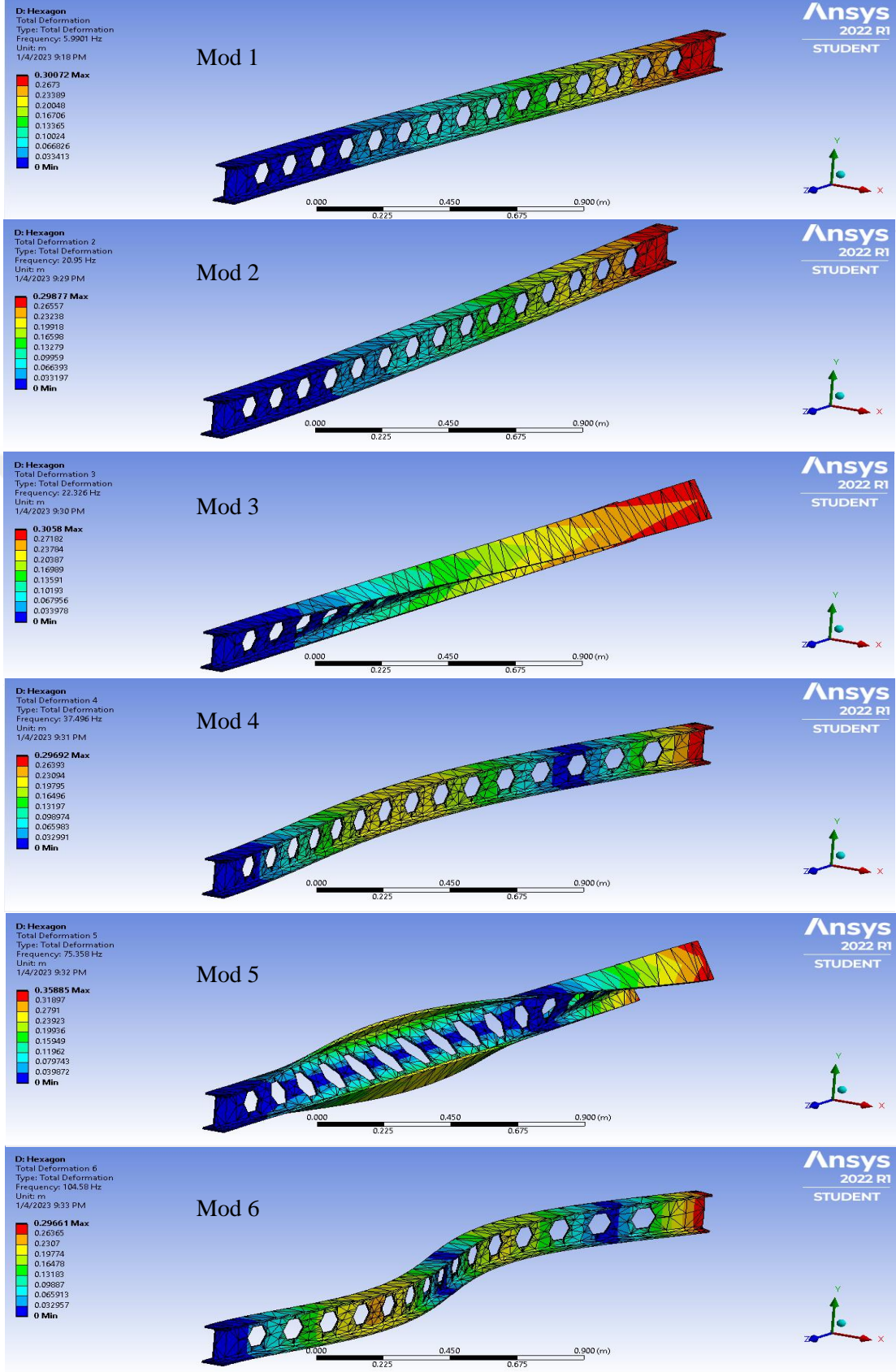
Şekil 79. Ankastre – serbest mesnetli IPE300 - petek kiriş, model I için elde edilen ilk altı mod şekli

(Ankastre – Serbest) IPE 160 - Model - III



Şekil 80. Ankastre – serbest mesnetli IPE160 - petek kiriş, model III için elde edilen ilk altı mod şekli

(Ankastre – Serbest) IPE 160 - Model - IV



Şekil 81. Ankastre – serbest mesnetli IPE160 - petek kiriş, model IV için elde edilen ilk altı mod şekli

SONUÇLAR

Bu tezde, gövde boşluk tipinin petek kirişlerin statik ve serbest titreşim davranışı üzerindeki etkisi teorik olarak incelenmiştir. Analizlerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS 2022 R1 Workbench programı kullanılmıştır. Dikkate alınan yapı elemanlarının üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Kirişler için dört farklı tipinin gövde boşluğu (dairesel, kare, beşgen ve altıgen) kullanılarak ayrıca dolu gövdeli olarak da dikkate alınmıştır. IPE120, IPE140, IPE160, IPE180, IPE200, IPE220, IPE240 ve IPE300 profillerinden imal edilmiş petek kirişlerin statik ve dinamik analizini gerçekleştirmek için ankastre - ankastre, ankastre - sabit ve ankastre-serbest sınır koşulları kullanılmıştır.

Statik Analiz

- Beklenildiği gibi en büyük yer değiştirmeler, maksimum kayma gerilmesi ve von-mises gerilmeleri IPE120 profilinde en düşük yer değiştirmeler, maksimum kayma gerilmesi ve von-mises gerilmeleri ise IPE300 profilinde meydana gelmektedir.
- Mesnet durumları karşılaştırıldığında ise en büyük toplam yer değiştirmeler ve von-mises gerilmeleri konsol kirişinde en küçük toplam yer değiştirmeler ve en düşük von-mises gerilmeleri ise ankastre – ankastre mesnedinde gözlemlenmiştir.
- Sonuçlar, petek kirişindeki en büyük toplam yer değiştirmelerinin kare şeklinde gövde boşluk tipinin kullanıldığı durumunda meydana geldiğini, IPE120 profili için en düşük toplam yer değiştirmelerinin beşgen geometriye sahip gövde boşluk tipinin kullanıldığında ve diğer profiller için ise en düşük toplam yer değiştirmelerinin dairesel gövde boşluk tipinin kullanıldığında meydana geldiğini göstermiştir. Dairesel ve altıgen geometrisine sahip gövde boşluklu petek kirişlerinin toplam yer değiştirme değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- Von-Mises ve maksimum kayma gerilmesi değerleri, profil tipi ve mesnet koşullarının yanı sıra gövde boşluk tipinden de etkilenmektedir. IPE120 profili hariç tüm profillerde dairesel şekilli gövde boşluk geometrisi

kullanıldığında en düşük von Mises gerilmelerinin meydana geldiği saptanmıştır.

- Gövde boşluk geometrisi, profil türü ve sınır koşulları, toplam yer değiştirme, von Mises gerilimi ve maksimum kayma gerilmesi değerleri için oldukça önemlidir.

Serbest Titreşim Analizi

Bu çalışmada, ilk on adet serbest titreşim frekansı elde edilmiştir. Ancak uygulamada ilk üç mod önemli olduğundan dolayı buradaki sonuçlar ilk üç mod için özetlenmiştir. Diğer modlar ile ilgili yorumlar için tezin ilgili bölümü incelenebilir. Bu kapsamda, profil tipi, Gövde boşluk geometrisinin ve sınır koşullarının doğal titreşim frekanslar üzerindeki etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- En yüksek frekansların ankastre - ankastre, en düşük frekansların ise ankastre - serbest mesnetli petek kirişlerinde olduğu kaydedilmiştir.
- IPE120 profili için en büyük frekans değeri beşgen boşluk tipinde bulunmuşken diğer boşluk tipleri için elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu tezde incelenen diğer profillerin serbest titreşim frekansları boşluk tipinin değiştirilmesiyle çok etkilenmemiştir.
- Ankastre – ankastre mesnetli durumunda IPE240 ve IPE300 profilleri için üçüncü modun frekans değerleri kare boşluk tipinde daha küçük çıkmıştır.
- Profil tipleri karşılaştırıldığında ise en düşük frekanslar IPE120 ve en büyük frekanslar ise IPE300 profillerinde oluşmuştur.
- Tüm boşluk tipleri için elde edilen genlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- A. Sayed, Y. Elaraki, O. E. 2. (2022). Experimental and Numerical Analysis of Steel Beams ' Free Vibrations. *Metals*, 12, 938.
- Abdulkhudhur, R., Sabih, S. M., Alhusayni, N., & Hamood, M. J. (2020). Performance of Steel Beams with Circular Openings under Static and Dynamic Loadings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012036>
- Ahyar, M. R., & Setiyawan, P. (2020). *Finite Element Analysis on Shear Strength of a Castellated Beam with Hexagonal Web Opening*. *Finite Element Analysis on Shear Strength of a Castellated Beam with Hexagonal Web Opening*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1006/1/012009>
- Akgönen, A. İ., Güneş, B., & Nassani, D. E. (2020). DAİRESEL BoşluklKirişlerdeEğilme Ve Yanal Burulmalı Burkulma Davranışınıİncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 869–882. <https://doi.org/10.21923/jesd.705441>
- Anupriya, B., & Jagadeesan, K. (2013). Strength Study on Castellated Beam. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(12), 3853–3859.
- Chen, J. K., Kim, B., & Li, L. Y. (2014). Analytical approach for transverse vibration analysis of castellated beams. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 14(3), 1–10. <https://doi.org/10.1142/S0219455413500715>
- Chung, K. F., Liu, C. H., & Ko, A. C. H. (2003). Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: An empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve. *Journal of Constructional Steel Research*, 59(9), 1177–1200. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00029-4)
- Conference, I., & Trends, C. (2013). Streeses In Castellated Beam Using Ansys. *International Conference on Curent Trends in Engineering and Technology*, 220–224.
- De'Nan, F., Keong, C. K., & Hashim, N. S. (2017). Shapes and sizes of web opening effects on bending behaviour of I-beam with web opening. *AIP Conference Proceedings*, 1892. <https://doi.org/10.1063/1.5005652>
- Deepha, R., & Jayalekshmi, S. (2020). Finite Element Analysis on Shear Strength of a Castellated Beam with Hexagonal Web Opening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1006(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1006/1/012009>
- Demirdjian, S. (1999). *Stability of Castellated Beam Webs*.

- Dervinis, B., & Kvedaras, A. K. (2008). Investigation of rational depth of castellated steel i-beams. *Journal of Civil Engineering and Management*, 14(3), 163–168. <https://doi.org/10.3846/1392-3730.2008.14.12>
- Doori, S., & Noori, A. R. (2021). Finite Element Approach for the Bending analysis of Castellated Steel Beams with Various Web openings. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 38–48. <https://doi.org/10.46740/alku.883187>
- Durif, S., & Bouchaïr, A. (2012). Behavior of cellular beams with sinusoidal openings. *Procedia Engineering*, 40, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.064>
- E.S.Ismail, R., Fahmy, A. S., & M. Tawfik, N. (2015). Finite Element Modeling Of Partially Composite Castellated Beams. *Communications on Applied Electronics*, 2(3), 6–22. <https://doi.org/10.5120/cae-1689>
- El-Dehemy, H. (2017). Static and Dynamic Analysis Web Opening of Steel Beams. *World Journal of Engineering and Technology*, 05(02), 275–285. <https://doi.org/10.4236/wjet.2017.52022>
- El-Sawy, K. M., Sweedan, A. M. I., & Martini, M. I. (2014). Moment gradient factor of cellular steel beams under inelastic flexure. *Journal of Constructional Steel Research*, 98, 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.007>
- Ellobody, E. (2011). Interaction of buckling modes in castellated steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(5), 814–825. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.12.012>
- Estrada, H., Jimenez, J. J., & Aguñiga, F. (2006). Cost analysis in the design of open-Web castellated beams. *AEI 2006: Building Integration Solutions - Proceedings of the 2006 Architectural Engineering National Conference*, 2006(361), 53. [https://doi.org/10.1061/40798\(190\)53](https://doi.org/10.1061/40798(190)53)
- Fares, S., Coulson, J., & Dinehart, D. (2016). *Castellated and Cellular Beams*. 1–62.
- Frans, R., Parung, H., Sandy, D., & Tonapa, S. (2017). Numerical Modelling of Hexagonal Castellated Beam under Monotonic Loading. *Procedia Engineering*, 171, 781–788. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.449>
- Grilo, L. F., Fakury, R. H., Castro e Silva, A. L. R. de, & Veríssimo, G. de S. (2018). Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 525–541. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.020>
- Gu, J. Z. (2014). Free vibration of castellated beams with web shear and rotary inertia effects. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 14(6), 19–21. <https://doi.org/10.1142/S0219455414500114>
- Hadeed, S. M., & Hussain Alshimmeri, A. J. (2019). Comparative Study of Structural Behaviour for Rolled and Castellated Steel Beams with Different

Strengthening Techniques. *Civil Engineering Journal*, 5(6), 1384–1394. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091339>

Hosseinpour, M., & Sharifi, Y. (2021). Finite element modelling of castellated steel beams under lateral-distortional buckling mode. *Structures*, 29(January), 1507–1521. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.038>

Jamadar, A. M., & Kumbhar, P. D. (2015). Parametric Study of Castellated Beam with Circular and Diamond Shaped Openings. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(2), 715–722.

Justino, L. G., Ribeiro, J. C. L., Veríssimo, G. de S., Paes, J. L. R., & Pedroti, L. G. (2020). Shear buckling strength of web-posts in castellated steel beams in fire. *Engineering Structures*, 209(February), 109960. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109960>

Kerdal, D., & Nethercot, D. A. (1984). Failure modes for castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 4(4), 295–315. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(84\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0143-974X(84)90004-X)

Knowles, P. R. (1991). Castellated beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (London). Part 1 - Design & Construction*, 90(pt 1), 521–536. <https://doi.org/10.22486/iwj.v7i1.150133>

Kohnepooshi, O., & Showkati, H. (2009). Numerical modeling and structural behavior of elastic castellated section. *European Journal of Scientific Research*, 31(2), 306–318.

Kwani, S., & Wijaya, P. K. (2017). Lateral Torsional Buckling of Castellated Beams Analyzed using the Collapse Analysis. *Procedia Engineering*, 171, 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.370>

Lengvarský, P., Bocko, J., & Hagara, M. (2013). Modal Analysis of Titan Cantilever Beam Using ANSYS and SolidWorks. *American Journal of Mechanical Engineering*, 1(7), 271–275. <https://doi.org/10.12691/ajme-1-7-24>

Lotfollahi-yaghin, M. A., & Ahmadi, H. (2008). *Investigation of Dynamic Properties of Cantilever Castellated Beams in Comparison with Plain-webbed Beams using White Noise Excitation*. 3(3), 522–530.

Mathur, S., Senthilpandian, M., & Karthikeyan, K. (2021). Static and dynamic analysis of steel beams with web openings. *Journal of Physics: Conference Series*, 1716(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1716/1/012016>

Mohanan, N. (2016). Lateral Torsional Buckling of Castellated I Beam With Corrugated Web. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(8), 717–720. www.irjet.net

Morkhade, S. G., Kshirsagar, M., Dange, R., & Patil, A. (2019). Analytical study of effect of web opening on flexural behaviour of hybrid beams. *Asian Journal*

of *Civil Engineering*, 20(4), 537–547. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00122-4>

- Morkhade, S. G., Lokhande, R. S., Gund, U. D., Divate, A. B., Deosarkar, S. S., & Chavan, M. U. (2020). Structural behaviour of castellated steel beams with reinforced web openings. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(6), 1067–1078. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00262-y>
- Nawar, M. T., Arafa, I. T., Elhosseiny, O. M., & El-Zohairy, A. (2021). Full static resistance of castellated steel beams with hexagonal web openings for blast response predictions. *Engineering Structures*, 245(March), 112844. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112844>
- Pachpor, P. D., Mittal, N. D., Gupta, L. N., & Deshpande, N. V. (2011). Finite element analysis and comparison of castellated & cellular beam. *Advanced Materials Research*, 264–265(Fig 1), 694–699. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.694>
- Redwood, B. R., & Demirdjian, S. (1998). *I*: 1202–1207.
- Redwood, R. G. (2000). Behaviour of Composite Materials Behaviour of Composite Materials. *Prog. Struct. Engng Mater.*, 2, 164–168.
- Rodrigues, F., Da Vellasco, P. C. G. S., De Lima, L. R. O., De Andrade, S. A. L., & Da Silva, J. G. S. (2007). Finite element modelling of steel beams with web openings. *Proceedings of the 11th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Civil-Comp 2007, December*, 886–913. <https://doi.org/10.4236/eng.2014.613082>
- Salah, W. A. (2022). Performance of Hybrid Castellated Beams Prediction Using Finite Element Modeling. *Technology & Applied Science Research*, 12(2), 8444–8451. www.etasr.com
- Sawai, P. G., & Waghmare, P. M. V. (2018). *Finite Element Analysis of Castellated Steel Beam*.
- Setiawan, Y., Han, A. L., Sthenly Gan, B., & Utomo, J. (2018). Numerical analysis of castellated beams with oval openings. *MATEC Web of Conferences*, 195, 1–9. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819502008>
- Shaikh, A. S., & Aher, H. R. (2015). *Structural Analysis of Castellated Beam*. 81–84.
- Shaikh, A. S., & Autade, P. B. (2016). Structural Analysis and Design of Castellated Beam in Fixed Action. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, 3(08), 92–97.
- Showkati, H., Ghanbari Ghazijahani, T., Noori, A., & Zirakian, T. (2012). Experiments on elastically braced castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 77, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.05.008>

- Soltani, M. R., Bouchair, A., & Mimoune, M. (2012). Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 70, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.016>
- Sorkhabi, R. V., Naseri, A., & Naseri, M. (2014). Optimization of the Castellated Beams by Particle Swarm Algorithms Method. *APCBEE Procedia*, 9(Icbee 2013), 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.01.067>
- Srimani, S. S. L., & Das, P. K. (1978). Finite element analysis of castellated beams. *Computers and Structures*, 9(2), 169–174. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(78\)90135-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(78)90135-9)
- Vivek, K. S., Jugal Kishore, M., Manoj, K. V. S., & Pujitha, K. S. V. S. (2018). Effect of circular web openings on dynamic behaviour of cantilever steel thin-walled tapered i - Beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 390(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/390/1/012037>
- W Zaarour, R. R. (1996). Web buckling in thin webbed castellated beams. In *Suparyanto dan Rosad (2015)* (Vol. 5, Issue 3).
- Wakchaure, M. ., & Sagade, A. . (2012a). Finite element analysis of castellated beams. *Computers and Structures*, 2(1), 169–174. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(78\)90135-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(78)90135-9)
- Wakchaure, M. R., & Sagade, A. V. (2012b). Finite element analysis of castellated steel beam. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 2(1), 365–370.
- Wang, C. Y., & Wang, C. M. (2013). *Structural vibration: exact solutions for strings, membranes, beams, and plates*. CRC Press.
- Wang, P., Guo, K., Liu, M., & Zhang, L. (2016). Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.02.012>
- Yustisia, V. W., Suswanto, B., Irawan, D., & Iranata, D. (2020). The structural behavior of castellated beam with shape variation using finite element methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 930(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/930/1/012051>
- Zhou, X., Li, J., He, Y., He, Z., & Li, Z. (2018). Finite element analysis of thermal residual stresses in castellated beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 148(April), 741–755. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.026>
- Zirakian, T., & Showkati, H. (2006). *Distortional buckling of castellated beams*. 62, 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.01.004>

