

**T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**PETEK ÇERÇEVE SİSTEMLERİNİN STATİK VE
DİNAMİK ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

AYAT ABBARA

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2024

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Ayat ABBARA

Tezin Dili : Türkçe

Tezin Adı : Petek Çerçeve Sistemlerinin Statik ve Dinamik Analizi

Enstitü : İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Tezin Türü : Yüksek Lisans

Tezin Tarihi : 06.11.2024

Sayfa Sayısı : 114

Tez : Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI

Danışmanları

Dizin Terimleri : Petek çerçeve, sonlu elemanlar yöntemi, zorlanmış titreşim, yapısal sönüm, gerilme analizi, ANSYS, serbest titreşim.

Türkçe Özet : Bu tez çalışmasında, iki farklı çerçeve tipi incelenmiştir. Çerçevelerin kolon ve kirişlerinin gövde boşluk tiplerine göre statik ve dinamik analizin sonuçlarına etkileri araştırılmıştır. Dört adet farklı yükleme durumu uygulanarak, toplam yer değiştirme değerleri, asal gerilmeler, Von-Mises gerilmesi ve maksimum kayma gerilmesi statik analizin sonuçları olarak elde edilmiştir. Dinamik analizde ise serbest titreşim frekans değerleri ve oluşan maksimum yer değiştirmeler incelenmiştir. Sönüm katsayısının zorlanmış titreşim davranışına etkisini araştırılmıştır.

Dağıtım Listesi : 1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası

Ayat ABBARA

**T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**PETEK ÇERÇEVE SİSTEMLERİNİN STATİK VE
DİNAMİK ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

AYAT ABBARA

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI

İstanbul – 2024

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.

AYAT ABBARA

.../.../2024



T.C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Ayat ABBARA' nın “**Petek Çerçeve Sistemlerinin Statik ve Dinamik Analizi**”
adlı tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı İnşaat
Mühendisliği Bilim Dalı YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Arman ATASOY

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ahmad Reshad NOORI

(Danışman)

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NURİ

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.... / / 2024

Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Petek çerçeveler, yapısal performansı artırmak ve mukavemet değerlerini koruyarak yapıların ağırlığını azaltmak amacıyla, geleneksel düz çelik yapı elemanları yerine petek kirişler ve kolonlar kullanılarak oluşturulan çelik yapılar olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, iki farklı çerçeve modeli incelenmiş ve her model için farklı açıklık tipleriyle statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, ANSYS 2024 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle üç boyutlu olarak modellenmiştir. Çalışmada, çerçevelerin kolon ve kiriş elemanları IPE200 profili seçilerek modellenmiştir. Kolonlar iki farklı tip (boşluksuz ve kare boşluklu) olarak değerlendirilmiş olup kirişler ise boşluksuz, dairesel, kare, altıgen ve sekizgen boşluk tiplerine sahip olacak şekilde toplamda 19 çerçeve modeli üzerinden analiz yapılmıştır. Statik analiz kapsamında, dört farklı yükleme durumu ele alınmış ve toplamda 76 model çözülerek toplam yer değiştirme, asal gerilmeler, Von-Mises gerilmesi ve maksimum kayma gerilmeleri değerlendirilmiştir. Dinamik analizlerde, serbest titreşim analizi ile birlikte zorlanmış titreşim analizleri (sönümsüz ve sönümlü) gerçekleştirilmiştir. Serbest titreşimin analizinde, ilk 10 modun maksimum yer değiştirme değerleri dikkate alınmış, zorlanmış titreşim analizinde ise yatay ve düşey dinamik yükleme altında sönüm oranlarının etkisi araştırılmıştır. Sönümsüz ve sönümlü durumlar arasında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak petek çerçeve modellerinin boşluk tiplerinin ve kolon-kiriş kombinasyonlarının dinamik davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analiz sonuçları, petek çerçeve sistemlerinde kiriş ve kolonların boşluk tiplerine göre yapıların statik ve dinamik performanslarının farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle sekizgen ve altıgen boşluk tipleri, toplam yer değiştirme ve gerilme değerlerinde önemli farklar yaratmıştır. Ayrıca, yapısal sönüm oranının artırılması ile çerçevelerin dinamik yük altındaki performanslarının iyileştiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Petek çerçeve, sonlu elemanlar yöntemi, zorlanmış titreşim, yapısal sönüm, gerilme analizi, ANSYS, serbest titreşim.

SUMMARY

Castellated frames are defined as steel structures created using castellated beams and columns instead of traditional flat steel structural elements, with the aim of improving structural performance while reducing the weight of the structures without compromising their strength. In this study, two different frame models are analyzed, each with various web opening types, through static and dynamic analyses. The analyses are conducted using the finite element method in three dimensions with the ANSYS 2024 software. The frame elements, specifically the columns and beams, are modeled using the IPE200 section profile. The columns are evaluated in two different types (solid and with square web opening), while the beams are analyzed across five different web opening types (solid, circular, square, hexagonal, and octagonal), resulting in a total of 19 frame models.

In the static analysis, four different loading conditions are considered, and a total of 76 models are solved to evaluate the total displacement, principal stresses, Von-Mises stress, and maximum shear stresses. In the dynamic analyses, both free vibration analysis and forced vibration analysis (undamped and damped) are performed. The free vibration analysis focused on the maximum displacement values for the first 10 modes, while the forced vibration analysis investigated the effects of damping ratios under horizontal and vertical dynamic loading. The results obtained from undamped and damped cases are compared, examining the impact of web opening types and column-beam combinations on the dynamic behavior of the castellated frame models. The analysis results revealed that the static and dynamic performances of castellated frame systems vary based on the web opening types of the beams and columns. Notably, the octagonal and hexagonal web openings led to significant differences in total displacement and stress values. Additionally, it was observed that increasing the structural damping ratio improved the performance of the frames under dynamic loading conditions.

Keywords: Castellated frame, finite element method, forced vibration, structural damping, stress analysis, ANSYS, free vibration.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
SUMMARY	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ.....	x
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM TEZİN ŞEKİL ÖZELLİKLERİ

1.1. Petek Çerçevesler	2
1.1.1. Petek kirişler.....	3
1.1.2. Petek kolonlar	4
1.2. Tezin Amacı	4
1.2.1. Hedefler	5
1.3. Literatür Taraması	5

İKİNCİ BÖLÜM MATERYAL VE METOT

2.1. Sistem Geometrik Özellikleri	18
2.2. En Kesit ve Boşluk Geometrisi	20
2.3. Malzeme Özellikleri	21
2.4. Yükleme Durumları	21
2.5. Mesnet Koşulları	22
2.6. SOLID 187 Elemanı	22
2.7. Zorlanmış Titreşim Analizi İçin Hesaplamalar	24
2.8. ANSYS’de Çerçeve Modellerin Oluşturulması	25
2.8.1. Geometri oluşturulması	25
2.8.2. Statik Analizi	25
2.8.3. Dinamik Analizi	26
2.8.3.1. Serbest titreşim analizi	26
2.8.3.2. Zorlanmış titreşim analizi	26

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Statik Analizi	32
3.1.1. Petek çerçeve modellerin yer değiştirme sonuçları	32
3.1.2. Gerilme analizi	45
3.1.2.1. Asal gerilmeleri	45
3.1.2.2. Von-Mises gerilmesi	54
3.1.2.3. Maksimum kayma gerilmesi	61
3.1.2.4. Analiz sonuçların doğrulaması	68
3.2. Dinamik Analizi	69
3.2.1. Serbest titreşim analizi	69
3.2.1.1. Serbest titreşim frekansları	69
3.2.2. Zorlanmış titreşim analizi	81
3.2.2.1. Sönümsüz titreşim analizi	81
3.2.2.1.1. Yatay yer değiştirme	81
3.2.2.1.2. Düşey yer değiştirme	86
3.2.2.2. Sönümlü zorlanmış titreşim	90
SONUÇLAR	92
KAYNAKLAR	95

KISALTMALAR

SEA	:	Sonlu elemanlar analizi
SEY	:	Sonlu elemanlar yöntemi



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Modellerin isimlendirilmesi ve özellikleri	19
Tablo 2. Kullanılan malzemenin özellikleri	21
Tablo 3. Yükleme durumları	21
Tablo 4. Eleman ve düğüm noktası sayıları	23
Tablo 5. Yayılı yük yüklemesi sonucunda oluşan yer değiştirme değerleri (mm)...	33
Tablo 6. Düşey tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan yer değiştirme değerleri (mm).....	34
Tablo 7. Yanal tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan yer değiştirme değerleri (mm).....	35
Tablo 8. Düşey ve yanal tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan yer değiştirme değerleri (mm)	36
Tablo 9. Yayılı yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum, ortanca ve minimum asal gerilme değerleri (Pa)	45
Tablo 10. Düşey tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum, ortanca ve minimum asal gerilme değerleri (Pa)	46
Tablo 11. Yanal tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum,ortanca ve minimum asal gerilme değerleri (Pa)	47
Tablo 12. Düşey ve yanal tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum,ortanca ve minimum asal gerilme değerleri (Pa)	48
Tablo 13. Yayılı yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri (Pa)	54
Tablo 14. Düşey tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri (Pa)	55
Tablo 15. Yanal tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri (Pa)	56
Tablo 16. Düşey ve yanal tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri (Pa)	57
Tablo 17. Yayılı yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri (Pa).....	61
Tablo 18. Düşey tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri (Pa)	62
Tablo 19. Yanal tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri (Pa)	63
Tablo 20. Düşey ve yanal tekil yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri (Pa)	64
Tablo 21. Model A9 için elde edilen SAP2000 ve ANSYS programın analiz sonuçları	68
Tablo 22. ModelA'nın serbest titreşim frekansları (Hz)	70
Tablo 23. Model B'nin serbest titreşim frekansları (Hz)	71

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Doha’da yüksek katlı bir binanın alt katlarında kullanılan petek çerçeve sisteminin örneği	2
Şekil 2. Petek kolon ve kirişi kullanan bir petek çerçeve sisteminin örneği	3
Şekil 3. Amerika’da sanayi yapı inşaatında kullanılan bir petek kirişli çerçeve sisteminin örneği	4
Şekil 4. Eğri eksenli petek kirişlerin serbert titreşim analizi	6
Şekil 5. kompozit döşemeler ile petek kirişlerin deneysel incelemesi	9
Şekil 6. Konik konsollu petek kirişin oluşturma örneği	12
Şekil 7. Deneysel yükleme sırasında kirişin gövdesinin çevresinde oluşan yerel burkulma	15
Şekil 8. En büyük yük yüklemesinde Von-mises Gerilme dağılımı	16
Şekil 9. Model A çerçevenin geometrisi	18
Şekil 10. Model B çerçevenin geometrisi	19
Şekil 11. Çubuk en kesiti (dolu gövde)	20
Şekil 12. Çerçeve çubuklarında açılan boşluk geometrisi	20
Şekil 13. Çerçeveye uygulanan farklı yükleme şekilleri	22
Şekil 14. SOLID187 geometrik detayları	23
Şekil 15. ANSYS 2024 R1 workbench ana sayfası	27
Şekil 16. Modellenen çerçevenin ana hatları	27
Şekil 17. Çerçeve için geometrik modelin oluşturulması	28
Şekil 18. Sonlu eleman ağının oluşturulması	28
Şekil 19. Yayılı yük uygulanması	29
Şekil 20. Statik analiz sonuçlarının elde edilmesi	29
Şekil 21. Serbest titreşim analiz sonuçlarının elde edilmesi	30
Şekil 22. Sönümsüz zorlanmış titreşim analiz sonuçlarının elde edilmesi	30
Şekil 23. Sönümlü zorlanmış titreşim analiz sonuçlarının elde edilmesi	31
Şekil 24. Toplam yer değiştirme değerlerinin grafiği	37
Şekil 25. Toplam yer değiştirme değerlerinin grafiği	38
Şekil 26. Yayılı yük yükleme durumunda Model A’nin toplam yer değiştirme değerleri -Ansys 2024 analizi	39
Şekil 27. Yanal tekil yük yükleme durumunda Model A’nin toplam yer değiştirme değerleri -Ansys 2024 analizi	40
Şekil 28. Düşey tekil yük yükleme durumunda Model A’nin toplam yer değiştirme değerleri -Ansys 2024 analizi	41
Şekil 29. Yayılı yük yükleme durumunda Model B’nin toplam yer değiştirme değerleri -Ansys 2024 Analizi	42

Şekil 30. Düşey ve yanal tekil yük yükleme durumunda Model B'nin toplam yer değiştirme değerleri -Ansys 2024 Analizi	43
Şekil 31. Düşey tekil yük yükleme durumunda Model B'nin toplam yer değiştirme değerleri -Ansys 2024 Analizi	44
Şekil 32. Model A ve Model B'nin en büyük maksimum asal gerilme grafikleri.....	49
Şekil 33. Model A yayılı yük yükleme durumu için en büyük maksimum asal gerilmesi.....	50
Şekil 34. Model A yayılı yük yükleme durumu için oluşan en büyük maksimum asal gerilmesi	51
Şekil 35. Model A düşey ve yanal yük yükleme durumunda oluşan en büyük maksimum asal gerilmesi	52
Şekil 36. Model B'nin düşey tekil yük yükleme durumunda oluşan en büyük maksimum asal gerilmesi	53
Şekil 37. Statik analiz sonucundan modellerde oluşan en büyük Von-Mises gerilme grafikleri	58
Şekil 38. Yayılı yük yükleme durumunda Model A'nın Von-Mises gerilme değerleri -Ansys 2024 Analizi	59
Şekil 39. Düşey tekil yük yükleme durumunda Model B'nin Von-Mises gerilme değerleri -Ansys 2024 Analizi	60
Şekil 40. Statik analizinden modellerde oluşan en büyük maksimum kayma gerilme grafikleri	65
Şekil 41. Yayılı yük yükleme durumunda maksimum kayma gerilme değerleri - Ansys 2024 Analizi	66
Şekil 42. Yanal Tekil yük yükleme durumunda maksimum kayma gerilme değerleri - Ansys 2024 Analizi	67
Şekil 43. Model A ve B çerçevelerinin serbest titreşim frekanslarının mukayesesi.....	72
Şekil 44. Model A'nın kirişi dairesel gövde boşluklu çerçevesinin ilk 4 mod şekli	73
Şekil 45. Model A'nın kirişi dairesel gövde boşluklu çerçevesinin 5-8 mod şekli	74
Şekil 46. Model A'nın kirişi ve kolonu kare gövde boşluklu çerçevesinin ilk 4 mod şekli.....	75
Şekil 47. Model A'nın kirişi ve kolonu kare gövde boşluklu çerçevesinin 5-8mod şekli.....	76
Şekil 48. Model B'nin kolonu kare ve kirişi sekizgen gövde boşluklu çerçevesinin ilk 4 mod şekli	77
Şekil 49. Model B'nin kolonu kare ve kirişi sekizgen gövde boşluklu çerçevesinin 5-8mod şekli	78
Şekil 50. Model B'nin boşluksuz kirişi ve kare boşluklu kolon çerçevesinin ilk 4 mod şekli.....	79
Şekil 51. Model B'nin boşluksuz kirişi ve kare boşluklu kolon çerçevesinin 5-8mod şekli	80
Şekil 52. Model A ve B çerçevelerine dinamik yük altında zamanla en büyük yatay yer değiştirmelerin grafiği	82
Şekil 53. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki yatay yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları	83

Şekil 54. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki yatay yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları	84
Şekil 55. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki yatay yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları	85
Şekil 56. Model A ve B çerçevelerinin dinamik yük altında zamanla en büyük düşey yer değiştirmelerin grafiği.....	86
Şekil 57. Model A ve B çerçevelerinin dinamik yük altında zamanla en büyük düşey yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılma grafiği –ANSYS sonuçları	87
Şekil 58. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki düşey yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları	88
Şekil 59. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki düşey yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları	89
Şekil 60. Model A1'in en büyük yer değiştirme değerlerinin farklı yapısal sönüm oranlarıyla karşılaştırma grafiği	90
Şekil 61. Model A1 zorlanmış titreşimin sönümlü durum analiz sonuçlarından elde edilen en büyük yer değiştirmesi -ANSYS sonuçları.....	91

ÖNSÖZ

Bu tez, eğitim sürecinin önemli bir aşamasını temsil etmektedir. Çalışmam boyunca desteğini ve rehberliğini esirgemeyen birçok kişi olmuştur. Bu vesileyle, katkılarından dolayı teşekkür etmek isterim.

Öncelikle, tez danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Ahmad Reshad NOORI'ye, çalışmam boyunca gösterdiği sabır, verdiği değerli geri bildirimler ve rehberliği için en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun desteği ve yönlendirmeleri olmadan bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı.

Ayrıca, bana her zaman inanan ve destek olan sevgili eşime Obai ABBARA'ya teşekkür etmek istiyorum. Bu süreç boyunca gösterdiği anlayış, sabır ve motivasyon, tezimi başarıyla tamamlamamda büyük rol oynamıştır. Onun varlığı ve desteği, bu yolculuğu benim için çok daha anlamlı ve katlanılabilir kıldı.

Son olarak, bu çalışmada katkısı olan aileme ve tüm arkadaşlarıma minnettarlığımı ifade etmek isterim. Onların desteği ve teşviki, bu süreci daha kolay hale getirdi.

Teşekkürlerimle,

GİRİŞ

İnşaat sektöründe, yapısal çelik en önemli kaynaklarından biridir. Çelik yapılar, dayanıklılık, esneklik ve verimlilik kombinasyonları açısından diğer yapı türlerine göre tercih edilir. Bu özellikleri, çeşitli inşaat projeleri için ideal bir seçim haline getirir. Rüzgâr, deprem, yoğun kar gibi çevresel etkenlere karşı son derece dayanıklıdır.

Çelik çerçeveler, kolonlar ve kirişlerden oluşan ve bunların farklı bağlantılarla birleştirilmiş bir iskelet çerçeve sistemidir. Çeliğin maliyeti diğer bazı malzemelere göre daha yüksektir. Ancak çelik ağırlığı, yapının toplam maliyetini en çok etkileyen bir faktördür. Bu nedenle, mevcut kaynakların en iyi şekilde kullanılmasıyla maliyetlerin mümkün olduğunca azaltılması hedeflenmelidir. Çelik bir yapının toplam maliyeti, kirişler, kolonlar, bağlantı elemanları ve işçilik maliyetini içerir.

Petek çerçeveleri, yapısal performanslarını iyileştirmek ve mukavemeti korurken ağırlığı azaltmak için düz çelik malzeme yerine petek kirişler ve/veya kolonlardan oluşan bir çelik yapıdır. Petek çelik çubuklar, yapısal çelik elemanların gövdesi boyunca düzenli boşluklar içerecek şekilde değiştirilmiş halidir. Gövde boşlukları, tasarımcının tercihinin göre dairesel, kare, beşgen, altıgen ve sekizgen gibi farklı şekillerde uygulanabilir. Petek çerçevenin ana malzemesi, petek kiriş olarak bilinir. 1849 yılında petek kirişler üzerinde bilimsel çalışmalar yapılmış olsa da, yeterli düzeyde değildi. Ancak ikinci dünya savaşından sonra, petek kirişleri içeren petek çerçeve sistemleri yapı alanında uygulanmaya başlanmıştır. Petek kirişler, aynı yükseklikteki boşluksuz kirişlere göre daha hafiftir, yapının toplam ağırlığını azaltır ve potansiyel olarak temel maliyetlerini düşürür. Petek kolonlar, mimari tasarımlarının kolonun boşluk şekilleri nedeniyle görsel çekiciliğinden dolayı tercih edilir. Ancak yapının güvenliği açısından iyi değerlendirilmelidir.

Petek çerçeveler, uzun açıklıklar ve açık kat planları gerektiren büyük ofis alanları için idealdir. Kiriş ve kolonların açıklıkları, HVAC soğutma sistemleri, elektrik boruları ve diğer tesisatların monte edilebilmesi için gereken servis alanlarını azaltır. Petek çerçeve sistemi, yüksek yükleri desteklediği için depo alanlarında tercih edilir çünkü depolama ve taşıma ekipmanı için gerekli engelsiz alanı sağlar.

BİRİNCİ BÖLÜM

PETEK ÇERÇEVELERİNİN TANITIMI VE LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Petek Çerçeveler

Petek çerçeve sistemleri, yapıların taşıyıcı sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemler genellikle yapıların güçlendirilmesi ve dayanıklılığının artırılması amacıyla tercih edilmektedir. Ayrıca, yapıların dinamik performansını artırarak deprem ve rüzgâr gibi doğal afetlere karşı dirençlerini güçlendirebilirler, böylece yapıların daha güvenli ve sağlam olmalarını sağlarlar.

Şekil (1-3)'de petek çerçeve örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Doha'da yüksek katlı bir binanın alt katlarında kullanılan petek çerçeve sisteminin örneği.



Şekil 2. Petek kolon ve kirişi kullanan bir petek çerçeve sisteminin örneği.
(<https://www.dreamstime.com/silhouette-metal-castellated-beam-factory-building-structure-construction-site-against-colorful-sunset-sky-background-low-image266970357>)

1.1.1. Petek kirişler

I profili kirişlere daha fazla malzeme veya ağırlık eklemekten kirişin derinliği ve gücünü artırarak petek kirişin tasarımını elde etmeyi mümkün kılmaktadır. 1950'li yıllardan beri özellikle Avrupa ülkelerinde, petek kirişlerin yapının maliyetini düşürdüğünden dolayı bina yapılarında tercih edilmeye başlanmıştır.

Petek kirişlerin en önemli özellikleri, momentin taşıma kapasitesinin düz kirişlere göre %30-40 daha fazla olması ve ağırlığının az olmasıdır. Uzun açıklık gerektiren alanlarda, en çok otoparklarda kullanılır. Her türlü döşeme ve çatı yapısında petek kirişler kullanılması yaygın hale gelmiştir.



Şekil 3. Amerika’da sanayi yapı inşaatında kullanılan bir petek kirişli çerçeve sisteminin örneği.

(<https://www.nextlevelsteel.com/gallery/#!>)

1.1.2. Petek kolonlar

Petek kolonların statik ve dinamik analizlerini inceleyen çalışmalar sınırlıdır.

Burkulma nedeniyle eksenel yüklü düz çelik kolonları basınç dayanımının azalmasını ölçmeye yönelik ilk çalışmalar 1774 yılında Euler tarafından gerçekleştirilmiştir. Petek kolonlarının kullanım temel amacı, kolonun ana ekseninde burkulmaya karşı mukavemetini arttırmaktır. (Sweedan ve ark.2009)

1.2. Tezin Amacı

Önceki araştırmalar genellikle petek kirişlerin özelliklerine odaklanmıştır. Bu nedenle, petek çerçeve sistemlerinin bütünsel analizi üzerinde çok az çalışma yapılmıştır. Bu tezin amacı, petek çerçeve sistemlerinin kapsamlı bir analizini sunmaktır. Tezin sonuçları, petek çerçeve sistemlerinin belirli yük ve döşeme açıklığı koşullarında en uygun ve güvenli seçeneklerini belirlemek için değerlendirilmiştir. Bu araştırma, petek çerçeve sistemlerinin yapısal analizi ve malzeme seçimi konularında yeni bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Sonuçlar, mühendislik uygulamaları ve

yapı tasarımı alanında önemli katkılar sağlayabilir. Tez kapsamında, petek çubuklardan oluşan çerçevelerin statik ve dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, ANSYS 2024 R1 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Ele alınan petek çerçeve modelleri, hem kirişlerin hem de kolonların farklı gövde açıklık şekilleri ve farklı yükleme koşulları altında değerlendirilmiştir. Tezin analiz kapsamında, modellerin frekans ve zorlanmış titreşimi incelenmiştir.

1.2.1. Hedefler

- Önceki çalışmaların kapsamlı bir şekilde incelenmesi.
- Petek çerçeve modellerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmesi.
- Her modelin kirişin ve kolonlarının farklı gövde boşluklarıyla oluşan gerilmeler ve yer değiştirme sonuçlarının karşılaştırılması.
- Farklı yükleme durumlarının modellere etkisinin değerlendirilmesi.
- Modellerin boyutlarının performans üzerinde etkisinin dikkate alınması.
- Serbest titreşim frekanslarının modeller üzerindeki etkisinin incelenmesi.
- Dinamik yüklü zorlanmış titreşim analizinde yer değiştirme değerlerinin araştırılması.
- Sönüm katsayısının zorlanmış titreşim davranışına nasıl etki ettiğinin incelenmesi .

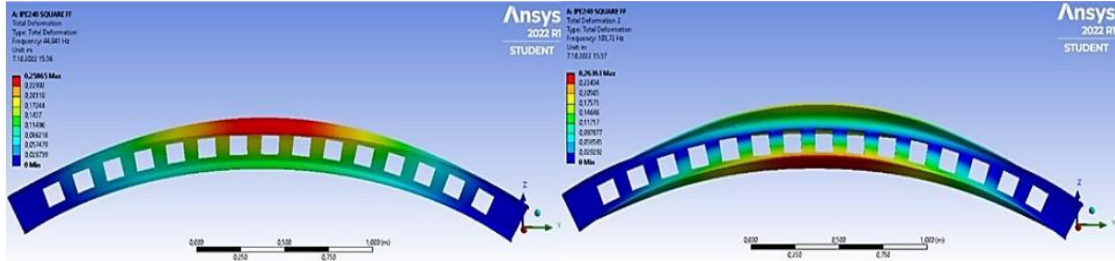
1.3. Literatür Taraması

Bu bölümde, petek çerçeveler, petek kirişler ve petek kolonlar üzerine yapılan araştırmaları içeren makaleler ve deneysel çalışmaların özeti yer almaktadır. Her çalışmanın temel özellikleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Petek kirişlerde oluşan yanal burkulma, Patel ve ark.(2016) tarafından incelenmiştir. Bu makaledeki sayısal çalışma, ANSYS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, basit mesnetli kiriş ve konsol kirişli durumları olmak üzere 2 ayrı durum değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Her bir

durum için beş farklı modelleme yapılmıştır; bunlar gövdenin açıklığı olmayan 1, 3 ve 6 kare göz açıklığı ve üç adet dairesel gövde açıklıklı modellerdir. Karşılaştırma sonuçlarına göre, gövde açıklığı kirişin serbest ucuna yaklaştıkça meydana gelecek yerel değişim değerinde bir düşüş gözlemlenmektedir. Ayrıca, dairesel gövde açıklıklı petek kirişlerin kare açıklığa göre daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Eksenleri eğri olan petek kirişlerin teorik olarak incelendiği çalışma, Ertürkmen ve Noori .(2023) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırma, kirişlerin serbest titreşim sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. Çalışmada, farklı kiriş modellerinin dinamik analizi yapılmıştır. Modeller, farklı mesnet koşullarına ve gövde açıklıklarına sahip şekilde ayarlanmıştır. Analiz sonuçları, tüm modellerin frekans değerlerinin bir tabloda birleştirilerek karşılaştırılmıştır. En yüksek ve en düşük frekans değerine sahip model belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, gövde boşluğunun frekans değerlerini etkilemediği, ancak kirişin frekans değerinin mesnet sınır koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceği gözlemlenmiştir,(şekil 4) .



Şekil 4.Eğri eksenli petek kirişlerin serbert titreşim analizi (Ertürkmen ve Noori., 2023)

Ajim ve ark .(2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı kesimlere sahip T kesitli kirişlerin davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada, T kesitli kirişlerin 45 derecelik kesimi uygulanarak deney numuneleri incelenmiştir. Deneyde, çeşitli parametreler hesaplanmıştır; kesitin çatıdan gelen yükü perdelenerek maksimum eğilme momenti ve tarafsız eksene göre atalet momenti hesaplanmıştır. Ayrıca, yüklemenin neden olduğu deformasyonlar da ele alınmıştır. Petek kirişler, ekonomik

açından avantajlı kirişler olarak bilinmesine rağmen, tasarımı gerektiği gibi kirişin derinliği, net açıklığı ve uygulanan yüke bağlıdır. Bu nedenle, bazı durumlarda petek kirişlerini tercih etmek yanlış bir tasarım seçimi olabileceği araştırmacılar tarafından belirlenmiştir.

I profilli IPE 140 petek kirişler üzerinde farklı takviyeler kullanılarak Chandrakant ve ark. (2021) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, ANSYS programı kullanılarak dört farklı modelleme yapılmıştır ve yük yükleme kapasitesi sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmiştir. Birinci model, boşluksuz kirişi; ikincisi, altıgen gövde açıklıklı petek kirişini; üçüncü ve dördüncü modeller ise çapraz ve halkalı takviyeleri ilave edilmiş petek kirişlerini tasarlamak için kullanılmıştır. Tüm kirişler basit mesnetli olarak modellenmiş ve açıklığın ortasına tekil yük uygulanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre, petek kirişlerin boşluksuz kirişlere göre izin verilen yükü %119 daha fazla taşıdığı bulunmuştur. Ayrıca, ilave edilen çapraz ve halka takviyeli petek kirişlerin boşluksuz kirişle karşılaştırıldığında, izin verilen yükü %138 ila %163 oranında artırdığı görülmüştür. Son olarak, halka takviyesinin çapraz takviyeye kıyasla %18 daha fazla yük taşıdığı için daha etkili bir takviye tipi olarak belirlenmiştir.

Nawar ve ark. (2021) tarafından, petek kirişlerinin statik mukavemetini araştıran bir makale hazırlanmıştır. Makalede, altıgen gövde açıklıklı petek kirişlere yarı-statik testler uygulanarak farklı kiriş boyutları, güçlendirme yöntemleri ve uç bağlantıları değiştirilerek çeşitli testler yapılmıştır. Deneysel testler kapsamında, petek kirişlerin uç kısmından 2 kolon bağlanarak çerçeve oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Çalışmada, deneysel testlerin yanı sıra petek kirişlerinin tam statik direncini etkileyen diğer parametreleri araştırmak için sayısal analiz de yapılmıştır. Sayısal analizde, ABAQUS sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal değerlendirmelere göre, dikey takviyelerle güçlendirme kullanımının etkili olduğu, sonlu elemanlar analizinin bükülme bölgesi için büyük ölçüde doğru olduğu, petek kirişlerden oluşan çerçeve sistemlerin yüksek gerilim ve kesme kuvvetli patlama yüklerine direnirken daha büyük bir deformasyon kapasitesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Ansari ve Talikoti (2019), ANSYS programını kullanarak petek kirişlerin özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmada, kare ve dairesel olmak üzere iki farklı gövde boşluk şekli olan petek kirişleri ele alınmıştır. Ek olarak, analiz sırasında boşlukların bir kısmı kapatılarak analiz sonuçları incelenmiştir. Çalışmanın ana hedefi, kirişte meydana gelen kesme göçmesini önlemek ve gövde açıklığının yüzeyinde oluşan gerilimi azaltmak için mesnetlere yakın olan açıklığın kapatılması gerektiğini belirlemektir. Gözlemlenen en önemli parametreler, kirişe yüklenen kuvvetlere bağlı olarak oluşan deformasyon ve gerilme değerleridir.

Tsavdaridis ve Galiatsatos .(2015) tarafından yürütülen bir çalışmada, parametrik sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak petek kirişlerin burkulma mukavemeti belirlenmiştir. Sonlu elemanlar teorik araştırılması ANSYS Programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada, göz açıklığı yakın aralıklı petek kirişler ve çift eşmerkezli enine takviyelerle rijitleştirilmiş kirişler üzerinde çalışılmıştır. Gözlenen parametreler arasında kirişin derinliği/açıklık oranı (S/d), gövde ve takviye kalınlığı bulunmaktadır. Araştırma sonuçlarına göre, enine takviyelerin $S/d < 1.3$ 'e kadar etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca, takviye ve gövde kalınlığının artmasıyla kirişin dayanıklılığının arttığı gözlenmiştir. $S/d < 1.3$ olan modellerin çoğunun Vierendeel makaslama olarak bilinen yetersizlikler gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle, takviye elemanlarının yerleştirilmesinin gerçekten gerilmiş bölgeleri kapsayacak şekilde sınırlandırılmasıyla, enine takviye elemanlarının imalatının daha ekonomik ve kolay hale gelebileceği söylenebilir.

Frans'ın (2017) yürüttüğü bir çalışmada, optimize edilmiş iki adet petek kirişten oluşan konsol kirişin üzerine periyodik-yarı statik yüklemeler uygulanarak petek kirişlerin davranışı incelenmiştir. İlk olarak, optimizasyon işlemi Fast Multi Swarm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki farklı durum üzerinde çalışılmıştır: birinci durum, açılma açısının ve açılma alanının sabit açılma oranıyla optimizasyonunu içermektedir. 2.durum, petek kirişin açılma açısının, açılma alanının ve açılma oranının optimizasyonunu içermektedir. İki farklı durumun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ABAQUS programında modellenmiştir. Petek kirişlerin periyodik-yarı statik yüklemesi sonucunda, optimizasyonun ikinci durumu, tepe yükü daha büyük olduğu için daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, ikinci durumun

optimizasyonu, dağıtılmış alanın birinci duruma göre daha sağlam ve tatmin edici olduğu bulunmuştur.

Sukanya ve ark .(2019) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, petek kirişlerin kompozit döşemeler ile deneysel olarak incelenmesi ele alınmıştır. Bu makalede, hem petek kesitin hem de kompozit kesitin tek platformda kullanılmasının avantajları sergilenmiştir (şekil 5). Deneyde, kompozit kesitte profil çelik saclar kullanılarak üzerine beton dökülerek altında petek kirişlerin yerleştirilebileceği bir kompozit döşeme elde edilmiştir. Ayrıca, bu yapı ANSYS programında teorik olarak da analiz edilmiştir. Deneyde, dört noktalı yükleme uygulayarak kompozit döşemede oluşan yer değiştirmesi değerlendirilmiş ve kompozit döşemenin yük taşıma kapasitesinin, sertliğinin ve enerji emme özelliğinin arttığı deneysel olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 5. kompozit döşemeler ile petek kirişlerin deneysel incelemesi (Sukanya ve ark .,2019)

Wakchaure ve ark (2012) tarafından yürütülen deneysel bir çalışmada, petek kirişlerde gövde boşluk derinliğinin yapısal davranışını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu çalışmada, çelik kesitler seçilmiş ve açıklık derinliği artırılarak birden fazla petek kirişi üretilmiştir. Deneyler sırasında, petek kirişler üzerine iki noktalı yükler ve basit mesnetli koşullar altında testler gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, kiriş merkezindeki sapmayı ve çeşitli yetersizlik modellerini analiz etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, bir göz boşluğunun en iyi konumunun açıklığın ortadaki üçte biri olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, göz boşluklarının köşelerinin yuvarlatılması ve petek kirişlerin performansını artırmak için takviye sağlanması tavsiye edilmiştir. Petek kirişlerin endüstriyel binalar, enerji santralleri ve çok katlı yapılar gibi yerlerde kullanımının özellikle yüklerin genellikle daha düşük olduğu ve açıklıkların daha uzun olduğu yerlerde iyi karşılandığı da araştırmacılar tarafından eklenmiştir.

Erdal ve Saka (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, optimum tasarlanmış petek kirişlerin azami yük taşıma kapasitesini belirlemek amaçlanmıştır. Bu çalışmada, kendinden tepkili bir çerçevede tasarım değişkenleriyle çelik petek kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitelerine odaklanılmıştır. Harmoni araştırma optimizasyon yöntemi, çeşitli faktörleri (yer değiştirme limiti, kiriş eğilme kapasitesi, kiriş kesme kapasitesi, kirişin genel burkulma mukavemeti, kirişin göz açıklığının burkulması ve bükülmesi, alt ve üst T-kesitin Vierendeel bükülmesi ve yerel basınç burkulması gibi) dikkate alarak numunelerin tasarlanmasında kullanılmıştır. Yapılan deneysel testlerin sonuçlarına göre, yanal destekler kirişlerin analizinde ana faktör olmuştur. Yük, kirişin göz açıklıklarının üzerine doğrudan uygulanırsa, göçme davranışı genellikle Vierendeel eğilme mekanizması tarafından kontrol edilir. Petek kirişin gövde bölgesinde oluşan burkulma mukavemeti, uygulanan konsantre yükü taşımak için yeterli değilse, açıklıkların doldurulmasıyla kirişin merkezinde yüklenen alan artırılabilir.

Wafi ve ark (2018) tarafından başlatılan bir çalışmada, petek kirişlerin gövde açıklık şekli ve takviye plaka kullanımının moment ve kirişin dayanıklılığına etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, öncelikle ANSYS programı üzerinde lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle analiz gerçekleştirilmiş ve laboratuvar da numune üzerinde yapılan deneylerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sayısal modelin yükleme hasarının daha fazla olduğunu göstermiştir. Ayrıca, aynı modellerin gövde açıklığı içinde halka takviye kullanıldığında, açıklığın etrafındaki gerilme konsantrasyonunun azaldığı ve petek kirişin deformasyonunun daha az olduğu ve nihai dayanma gücünün daha fazla olduğu görülmüştür. Çalışmada ilave olarak, takviyelerin ağırlığı ve kalınlığının değiştirilerek kalınlık ve ağırlık arttıkça petek kirişin %53'e kadar nihai dayanma gücünün artabileceği sonucuna varılmıştır.

Elaiwi ve ark (2019) tarafından gerçekleştirilen "Petek kirişlerin doğrusal ve doğrusal olmayan burkulma analizi" adlı çalışmada, düzgün yayılı yüke maruz kalan basit mesnetli ve sabit-sabit petek kirişlerin davranışları analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. Bu araştırma, yanal burulmalı burkulma etkisini iyileştirmeye odaklanmıştır ve doğrusal ve doğrusal olmayan, elastik olmayan davranışları incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Doğrusal durumda, kirişte

depolanan gerilme enerjisinin sapma ve eğilme nedeniyle iki bölümden oluştuğu belirtilmiştir. Basit veya sabit sınır koşulları, uç kesitteki tüm düğümlere yalnızca düşey yer değiştirmeye uygulanmıştır. Yanal burkulma kritik momentlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın en önemli sonuçlarından biri, petek kirişlerde yanal burulmalı burkulmanın kritik yükünün kiriş boyutları, gövde boşluk boyutu, sınır koşulları ve kirişin malzeme özelliklerinden etkilendiğidir.

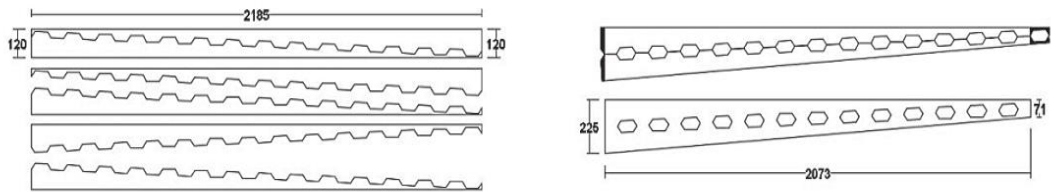
Tanady ve Suryatmono .(2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, periyodik yüklere maruz kalan bir taşıyıcı sistemin davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada, biri I profilili kiriş diğeri ise petek kirişinden oluşan iki farklı kiriş ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, petek kirişlere periyodik yükler uygulandığında kirişin davranışını belirlemek ve sonuçlarını boşluksuz I profilili kirişlerle karşılaştırmaktır. Analizde, momentin dayanımından izole edilmiş Kolon-Kiriş taşıyıcı sistemi tercih edilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildikten sonra, petek kirişlerden oluşan taşıyıcı sistemlerin maksimum taşıyabileceği yükün %3.33 daha az olduğu bulunmuştur. Petek kirişlerin sisteminde daha erken sünme meydana gelmiştir. Ayrıca, periyodik yüklere maruz kalan taşıyıcı sistemlerin hasarı, petek kirişli modelde gövde yerel burkulmasından kaynaklanırken, I profilili kiriş modelinde moment eğilmesinden kaynaklanmaktadır. Araştırmacılar, petek kirişlerin gövde boşluğu etrafında oluşan yerel hasar, daha yüksek sertlik ve mukavemet kaybı ve daha düşük süneklik davranışları nedeniyle sürekli periyodik yüklere maruz kalan taşıyıcı sistemlerde I profilili kirişlerin daha sağlam olabileceğini belirlemişlerdir.

Zewudie (2022) tarafından yürütülen çalışmada, eğri eksenli I kesitli petek kirişlerin (dairesel ve parabolik eksenli) üzerinde deneysel ve sayısal araştırma yapılmıştır. Eğri eksenli petek kirişlerin binaların ve köprülerin uzun açıklıklı kavisli çatılarında en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir. Araştırma kapsamında ABAQUS programı kullanılarak iki adımlık analiz gerçekleştirilmiştir: birincisi doğrusal burkulma analizi, ikincisi ise malzemenin doğrusal olmayan davranışını içeren nonlineer analizdir. Yapılan araştırmaya göre, kemerli petek kirişlerin eksen geometrisinin (dairesel/parabolik gibi) kirişin burkulma modu üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, düzgün dağıtılmış düşey yüklere maruz kalan kemerli petek kirişlerin elastik olmayan burkulma modunun yükseklik/açıklık oranına

bağlı olduğu bulunmuştur. Araştırmacılar, bu sonuçların kemerli petek kirişlerin tasarımında ve uygulamasında önemli bir kılavuz sağladığını belirtmişlerdir.

Wakchaure ve ark (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, I kesitli çelik bir levhadan oluşan petek kirişin üzerinde analiz yapılmıştır. Çalışmada, petek kirişlerin farklı göz açıklıkları ve şekilleri üzerinde testler uygulanmıştır. Deneyler sırasında, petek kirişlerle ilgili altı olası yetersizlik durumu göz önünde bulundurulmuştur. ANSYS programı kullanılarak, I şeklindeki kesite sahip petek çelik kirişlerin davranışı üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeliyle simüle edilmiştir. ISMB 150 esas levha seçilerek petek kiriş modelinin oluşturulması için belirli ana hatlar izlenmiştir. Analiz edilen petek kirişlerinin geometrisi Global Kartezyen koordinat sistemiyle tanımlanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, farklı yetersizlik modelleri nedeniyle kirişlerin doğrudan karşılaştırılamayacağı belirlenmiştir. Ancak, servis kolaylığı limiti kullanılarak sonuçlar incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, petek çelik kirişlerin maksimum göz açıklığının derinliğinin $0,6h$ 'e kadar (h levha derinliği) servis kolaylığı gereksinimleri açısından güvenle davranabileceği sonucuna varılmıştır.

Maulana ve ark .(2018) çalışmalarında, sabit mafsallı konsol petek kirişin gerilme ve yer değiştirme değerlerini incelemiştir. Konsol kirişlerin en büyük iç kuvvetlerinin mafsal bölgesinde meydana geldiği bilindiğinden, araştırmacılar bu konunun ayrıntılı olarak incelenmesi gerektiğini öngörmüşlerdir. Analizi yapılan petek kiriş, 3 boyutlu olarak FreeCAD programında modellenmiş ve ardından LisaFEA programına aktararak analiz gerçekleştirilmiştir. (Şekil 6) Kirişin gövde boşluğu altıgen ve koni şeklinde çelik olarak seçilmiştir. Numunelerin gerilmesi Von-Mises formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Simülasyon sonrasında elde edilen analiz değerlerinden, gerilmenin gövde açıklığının köşelerine yaklaştıkça yoğunlaştığı sonucuna varılmıştır. Bu, kirişin mesnete yakın bölgelerinde daha yüksek gerilmelere maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil 6. Konik konsollu petek kirişin oluşturma örneği (Maulana ve ark.,2018)

Yustisia ve ark (2020) yaptığı çalışmada, farklı şekillere sahip petek kirişlerin yapısal davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada tercih edilen petek kirişleri (altıgen, sekizgen ve dörtgen) göz açıklıklarına sahiptir. Kirişlerin gövde bölgesine eksenel yükler uygulanırken, kirişin davranışını belirlemek için çift plakalar kaynak bağlantısına eklenmiştir. Ek plakalar kirişin sapma değerini değiştirmese de, kaynak bağlantısında oluşan gerilme-şekil değiştirme değerini büyük ölçüde etkilediği ve uzun vadeli yapının mukavemet direncini desteklediği belirlenmiştir. Analiz sonuçları, daha önce yapılan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve en iyi kalite sonucunu, yani yer değiştirme açısından en küçük değeri altıgen göz açıklıklı petek kirişlerin verdiği görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışma farklı şekilli petek kirişler arasında deplasmana göre en optimum kirişi altıgen petek kirişi olarak belirlemiştir.

Vhora (2021) tarafından yapılan çalışmada , petek kirişlerin performansı incelenmiştir. Bu çalışmada, basit mesnetli petek kirişlerin yer çekimi yüklemesi ile performansı belirlenmiştir ve bunun için ANSYS programı kullanılmıştır. Analizde, kayma, eğilme ve dönme gerilmesi dikkate alınmış, özellikle kirişin alt köşe kenarları ve üst fiberde oluşan eğilme gerilmesi incelenmiştir. Bu çalışmada, yerçekimi yüklerinin yanı sıra yayılı yük de kirişin boyunca uygulanmıştır.

Aswad ve ark (2017) tarafından yapılan modelleme analizinde, zayıflatılmış kiriş enkesitlerinin petek kirişler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu analizde ABAQUS programı kullanılarak deprem yükleri simüle edilmiştir. Dört farklı modelleme senaryosu kullanılarak zayıflatılmış ve zayıflatılmamış petek kirişlerin çelik kolonlarla bağlantısının momenti incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, maksimum dayanım yükü açısından zayıflatılmış ve zayıflatılmamış petek kirişler arasında önemli bir fark bulunmamıştır. Ancak, zayıflatılmış petek kirişin kullanılmasıyla kolon yüzeyinden plastik moment oluşabilme kabiliyeti artmıştır, bu da kirişin mukavemetinde düşüş olmadan daha esnek bir davranış sergileyebileceği anlamına gelmektedir.

Patil ve Kumbhar (2015) tarafından yapılan çalışmada, petek kirişlerde güçlendirici ek levhaların kullanılmasının faydaları ve kiriş üzerindeki etkileri özetlenmiştir. Önceki araştırmalara dayanarak, güçlendirici ek levhaların bazı durumlarda petek kirişlerin kesme ve moment direncini artırmak için gerekliliği

belirlenmiştir. Bu ek levhalar farklı tiplerde olabilir; orta enine, yük taşıyan, burulma, çapraz, enine ve taşıma ek levhalar gibi. Göz açıklıklarında meydana gelen yerel hasarları önlemek için güçlendirici levhalar eklenmektedir. Ancak, eklenen güçlendirici levhaların en uygun konumda yerleştirilmesi ve kirişin davranış ve hasar modlarına dikkatle incelenmesi gerekmektedir. Araştırmalarının sonucunda, petek kirişlerin göz açıklıklarında oluşan burkulmayı en aza indirmek için enine yönde ve açıklığın kenarları boyunca güçlendirici ek levhaların kullanılması gerektiği bulunmuştur.

Firoz ve ark .(2016) tarafından yapılan sayısal araştırmada, genleşme oranının petek kirişe etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak kirişin minimum deplasmanı hedeflenmiştir. Kapsamlı bir çalışma olması için, farklı gövde derinliklerine sahip petek kirişlerin numuneleri ele alınmış ve genleşme oranı da değiştirilmiştir. Hem sabit mesnetli hem de basit mesnetli kirişler için statik yerçekimi yüklemesi yapılarak elde edilen farklı analiz sonuçları araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, petek kirişin gerilme ve sapma değerlerini azaltmak için eğim açısı, genleşme oranı ve gövde derinliği gibi parametrelerin belirli bir şekilde önemsendiği bulunmuştur.

Jia ve ark .(2020) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada (şekil 7), petek kirişlerin deprem sırasında nasıl bir performans sergileyebileceği incelenmiştir. Deneyde kullanılan kiriş altıgen gövde açıklıklı olarak seçilmiş ve kirişe kontrollü bir şekilde yük uygulanmıştır. Ayrıca kirişin plaka kenarında ve açıklığın köşesinde meydana gelebilecek gerilmeyi ölçmek için ölçüm cihazları yerleştirilmiştir. Deney sürecinde kirişin yük altında deformasyonu ve zayıflığı gözlemlenmiş ve hasar noktaları belirlenmiştir. Kirişin gövde açıklığı köşesinde oluşan burkulmanın, kirişin taşıma kapasitesini azalttığı tespit edilmiştir. Bazı test numunelerine takviye levhaları eklenerek yük taşıma kapasitesi ve yerel deformasyon değerleri iyileştirilmiştir. Araştırmacılar, deney çalışmasını tespit etmek ve kontrol etmek için ABAQUS programıyla teorik analiz de gerçekleştirmişlerdir. Teorik analizde, gövde yüksekliği/derinliği ve açıklık oranının değişmesinin kirişin performansını nasıl etkilediği incelenmiş ve deney çalışmasına benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7. Deneysel yükleme sırasında kirişin gövdesinin çevresinde oluşan yerel burkulma (Jia ve ark .,2020)

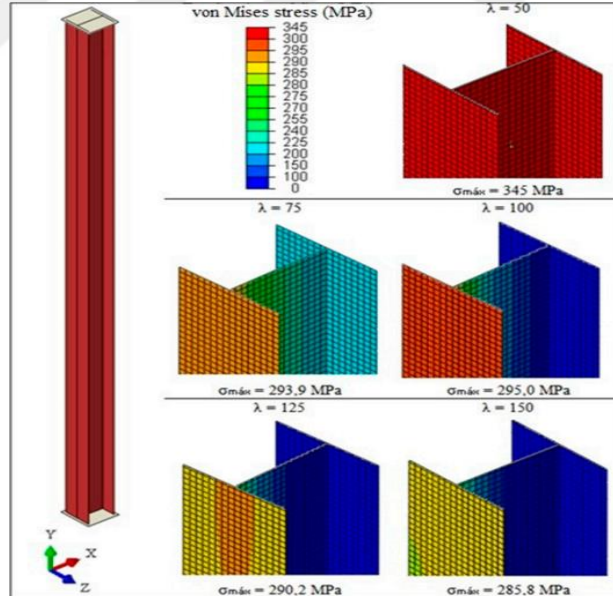
Mezher ve ark .(2023) yürüttüğü çalışmada, petek kirişlerin gövde açıklık geometrik şeklinin değişiminin statik ve dinamik etkileri teorik olarak incelenmiştir. Araştırmacılar dairesel, kare, beşgen ve altıgen olmak üzere dört farklı açıklık şekli üzerinde çalışmışlar ve üç farklı sınır koşulu uygulamışlardır. Bu doğrultuda ANSYS programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 36 farklı modelin statik ve dinamik analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları, deformasyon, Von-Mises gerilmesi ve maksimum kayma gerilmesi değerlerini içermektedir. Analizde, kare boşluklu kirişlerde en büyük deplasman değerinin gözlemlendiği belirlenmiştir. Von-Mises ve kayma gerilme değerleri ise sınır koşulları ve açıklık şekline bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Dinamik analizde ise serbest titreşim değerlerinin açıklık şekline göre değiştiği gözlemlenmiştir. Araştırmacılar tüm analiz sonuçlarını ve değerlerini bir tabloda özetleyerek karşılaştırma yapmışlardır.

Doori ve Noori'nin (2021) hazırladığı makalede sonlu elemanlar analizi kullanılarak petek kirişleri incelenmiştir. Araştırmada, petek kirişlerinin farklı gövde açıklığı tiplerine sahip olacak şekilde çeşitli modelleri kullanılarak statik etkileşimler gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarından gerilme ve yer değiştirme değerleri çıkarılarak değerlendirilmiş, ayrıca maksimum yanal yer değişimi ve dönme açısı da karşılaştırılmıştır. Makalede, petek kirişin maksimum gerilme ve en büyük yer değiştirme değerlerini elde etmek için gövde açıklık şekline göre yayılı üniform yüke maruz bırakıldığı belirtilmektedir. Bu şekilde, farklı gövde açıklığı tiplerinin petek kirişinin performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Su ve ark. (2011), petek çerçeve sisteminin göçme modlarını araştırmıştır. Analizler, tek açıklıklı, dairesel gövde açıklıklı petek kolon ve kirişten oluşan çerçeve

sisteminin üzerinde yapılmıştır. Araştırmacılar, sistemin yatay ve düşey yük altında taşıma kapasitesi ve sapma değerleri gibi özelliklerini belirlemeye odaklanmışlardır. Petek çerçeve sisteminin mekanik özelliklerini araştırmaya yönelik olarak, aynı sistemin boşluksuz I profilli çerçeve sistemi ile sonuçlarının karşılaştırılması bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. İki sistemin nihai taşıma gücü, orta sapma değeri ve yanal yer değiştirmesi analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

Gomes ve ark.(2023) W profili petek kolonları üzerinde farklı modelleme durumları ile tasarım yapılarak doğrusal olmayan plastik analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde kolonun çeşitli faktörleri değiştirilmiş ve boşluksuz kolon analizi de ele alınarak iki durumun sonuçları değerlendirilmiştir. Petek kolonlara eksenel yük uygulandığında, taşıyabileceği yükün boşluksuz düz kolonlara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara dayanarak, genleşme oranının kolonun taşıma kapasitesini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Kolonun narinliği arttıkça, elastik burkulma nedeniyle oluşabilecek çökme oranı arttığını belirlenmiştir. Analiz edilen modellere göre, narinlik ile Von-Mises gerilme değerleri arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (şekil 8) .



Şekil 8. En büyük yük yüklemesinde Von-mises Gerilme dağılımı
(Gomes ve ark.,2023)

Literatür incelendiğinde petek çerçeve sistemlerinin statik ve dinamik analizini ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında bu yapılar statik ve dinamik analizi ele alınmıştır. Çalışmanın en önemli yeniliği ise bu tür yapıların sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim davranışlarının teorik olarak araştırılmasıdır.

Bu çalışmada statik analizinde yer değiştirme değerleri, asal gerilmeler, Von-Mises gerilmesi ve maksimum kayma gerilme değerlerini incelenmiştir. Dinamik analizinde serbest titreşimin ilk 10 modları değerlendirilmiş olup zorlanmış titreşim analizinde ise yatay ve düşey dinamik yük uygulayarak sönümlü ve sönümsüz durumları yapı üzerinde etkilerini araştırılmıştır.



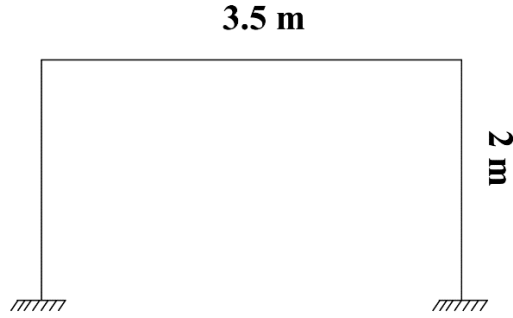
İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında, iki tip petek çerçeve sisteminin gövde boşluk geometrisi ve petek kolon kullanılması ile farklı yükleme durumlarında sistemlerin statik ve dinamik davranışı sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal analizler, ANSYS Workbench R1 2024 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz yazılımı, statik, dinamik, burkulma ve modal analizler dahil olmak üzere çok çeşitli üç boyutlu mekanik problemleri analiz etmek için kullanılmaktadır.

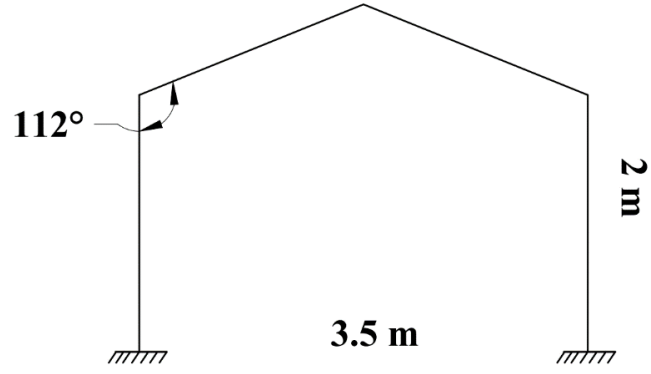
2.1. Sistem Geometrik Özellikleri

Bu çalışmada iki farklı tip çerçeve kullanılmıştır. Modellenen tüm çerçevelerin kirişleri ve kolonları petek ve/veya dolu gövdeli çubuklardan oluşacak şekilde toplamda 19 farklı model çerçeve analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki çerçeve, 3.5 metre açıklık ve 2 metre yükseklik varsayılarak tasarlanmıştır. Çerçevelerin tasarımı şekil 9 ve şekil 10’da detaylı olarak gösterilmiştir. Tasarlanan çerçeve modellerinin analiz için farklı durumlar Tablo 1’de listelenmiştir.



Çerçeve Modeli A

Şekil 9. Model A çerçevenin geometrisi



Çerçeve Modeli B

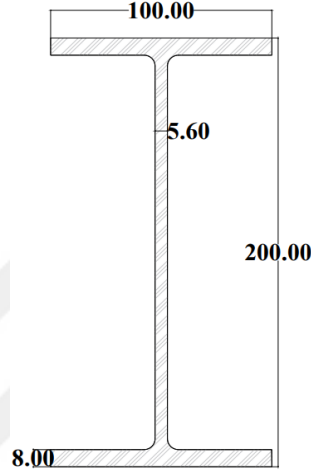
Şekil 10. Model B çerçevenin geometrisi

Tablo 1. Modellerin isimlendirilmesi ve özellikleri

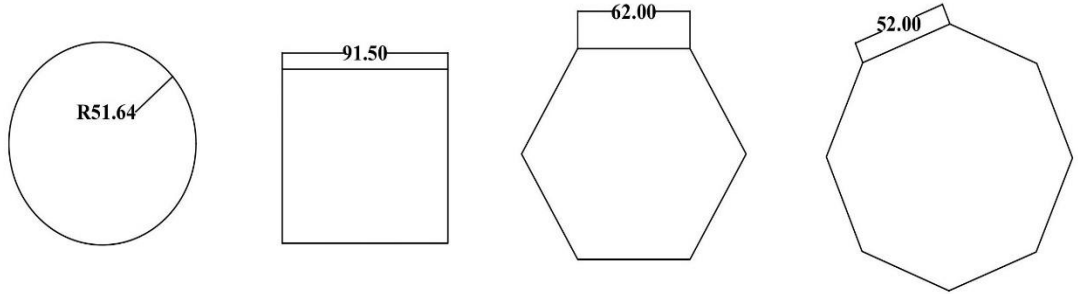
Model tipi	Model numarası	Kirişin gövde boşluğu	Kolon boşluk durumu	Kiriş için toplam boşluk sayısı	Kolon için toplam boşluk sayısı
Model A	Model A.1	Dairesel	Boşluk yok	17	0
	Model A.2	Kare	Boşluk yok	19	0
	Model A.3	Altıgen	Boşluk yok	19	0
	Model A.4	Sekizgen	Boşluk yok	19	0
	Model A.5	Dairesel	Kare boşluklu	17	5
	Model A.6	Kare	Kare boşluklu	19	5
	Model A.7	Altıgen	Kare boşluklu	19	5
	Model A.8	Sekizgen	Kare boşluklu	19	5
	Model A.9	Boşluk yok	Boşluk yok	0	0
	Model A.10	Boşluk yok	Kare boşluklu	0	5
Model B	Model B.1	Dairesel	Boşluk yok	18	0
	Model B.2	Kare	Boşluk yok	18	0
	Model B.3	Altıgen	Boşluk yok	18	0
	Model B.4	Sekizgen	Boşluk yok	18	0
	Model B.5	Dairesel	Kare boşluklu	18	5
	Model B.6	Kare	Kare boşluklu	18	5
	Model B.7	Altıgen	Kare boşluklu	18	5
	Model B.8	Sekizgen	Kare boşluklu	18	5
	Model B.9	Boşluk yok	Boşluk yok	0	0
	Model B.10	Boşluk yok	Kare boşluklu	0	5

2.2. En Kesit ve Boşluklar Geometrisi

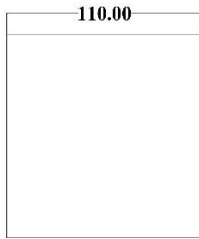
Analiz edilen çerçevelerin kolonları ve kirişlerinde IPE200 çelik I profili kullanılmıştır. Kirişlerin ve kolonların boşluksuz I profilleri, dairesel, kare, altıgen ve sekizgen gövde açıklığı ile analiz edilmiştir. Bu çalışma kapsamında dört farklı boşluk tipi ele alınmıştır. Çubukların en kesitinin geometrisi şekil 11’de boşlukların detayları ise şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Çubuk en kesiti (dolu gövde)



Kiriş için gövde boşlukları



Kolon için gövde boşluğu

Şekil 12. Çerçeve çubuklarında açılan boşluk geometrisi

2.3. Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan malzemeye ait mekanik özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Kullanılan malzemenin özellikleri

Kütleli yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite modülü(Pa)	Bulk modülü	Poisson oranı	Kayma modülü(Pa)
7850	2E+011	1.667E+011	0.3	7.6923E+010

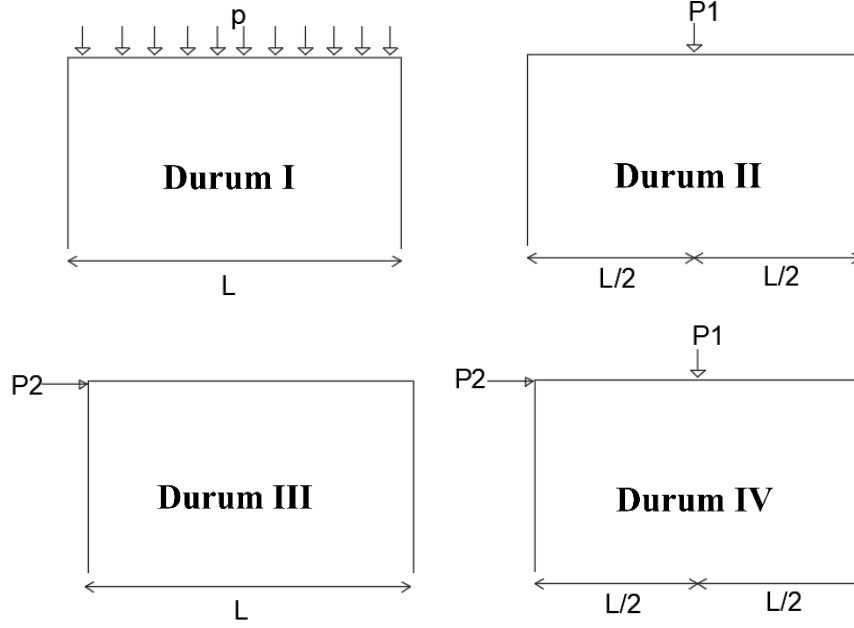
2.4. Yükleme Durumları

Petek çerçeveye dört farklı yükleme uygulanmıştır. Bu yüklemeler yayılı yük, yanal tekil yük ve düşey tekil yük olarak sisteme tatbik edilmiştir. Analizde tercih edilen yükleme türleri ve değerleri petek çerçevenin boşluk tipine göre meydana gelen yerel deformasyonlar ve gerilmeler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla rastgele seçilmiştir. Yükleme durumları ve uygulama şekli, Tablo 3’te ve Şekil 13’te gösterilmiştir.

Yayılı yük hesaplanması için öncelikle 100 kg/m kiriş boyunca her bir metreye 100 kg yük uygulandığını varsayılmıştır. Yükün dönüşümü alana göre hesaplarken IPE200 kirişin başlık genişliği 100 mm = 0.1 m olduğu için, $100 \text{ kg}/0,1 \times 1 \text{ m} = 1000 \text{ kg/m} = 10000 \text{ N/m} = 10000 \text{ Pa}$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 3. Yükleme durumları

Durum I	Durum II	Durum III	Durum IV
Düzgün yayılı yük 10000Pa (100kg/m)	Düşey tekil yük 10 ton	Yanal tekil yük 5 ton	Düşey ve yanal yük (10 ve 5 ton)



Şekil 13. Çerçeveye uygulanan farklı yükleme şekilleri

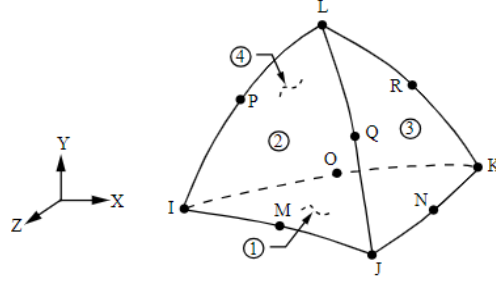
2.5. Mesnet koşulları

Bu çalışmada, çerçeve sisteminin dönme ve doğrusal yer değiştirmeleri engellenmiştir. Her iki kolonun uçlarında ankastre mesnetler tanımlanarak sistemin x, y ve z düzlemlerindeki hareketi sınırlandırılmıştır. ANSYS programında, kolonların alt uçlarında düzlem seçilerek "fixed" komutuyla bu koşul tanımlanmıştır.

2.6. SOLID 187 Elemanı

ANSYS yazılımında yaygın olarak kullanılan bir sonlu eleman analizi (SEA) eleman türü olan SOLID187, karmaşık geometri ve yükleme koşullarını modellemek için tercih edilen üç boyutlu yüksek dereceli bir elemandır. SOLID187, her biri x, y ve z yönlerinde üç farklı öteleme özelliğine sahip 10 düğüm noktası ile tanımlanır. Bu eleman özellikle yapısal analizde, gerilme dağılımını hesaplanmasında yüksek doğrulukla sonuç verir. Geometri tanımladıktan sonra gerekli malzeme özellikleri belirlenir ve ardından SOLID187 eleman yardımıyla "Mesh" (sonlu eleman ağı) oluşturulmaktadır. Bu tez çalışmasında, çerçevelerin geometrisi SOLID187 elemanı kullanılarak ağı tanımlanmış, sınır koşulları ve yüklemeleri belirlenmiş ve ardından sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 14'te

SOLID187'nin geometrik detayları gösterilmiştir. Her çerçeve modeli için ANSYS tarafından otomatik olarak oluşturulan mesh ile ilgili eleman ve düğüm sayıları Tablo 4'te listelenmiştir.



Şekil 14. SOLID187 geometrik detayları.

(https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html)

Tablo 4. Eleman ve düğüm noktası sayıları

Model numarası	Kirişin gövde boşluğu	Kolon boşluğu	Düğüm nokta sayısı	Eleman sayısı
Model A.1	Dairesel	Yok	19268	9425
Model A.2	Kare	Yok	20197	10093
Model A.3	Altıgen	Yok	22320	10927
Model A.4	Sekizgen	Yok	24078	11615
Model A.5	Dairesel	Kare	21291	10221
Model A.6	Kare	Kare	21908	10748
Model A.7	Altıgen	Kare	24541	11890
Model A.8	Sekizgen	Kare	25971	12332
Model A.9	Yok	Yok	27648	14114
Model B.1	Dairesel	Yok	21815	10804
Model B.2	Kare	Yok	20402	10200
Model B.3	Altıgen	Yok	22784	11210
Model B.4	Sekizgen	Yok	25098	12168

Model B.5	Dairesel	Kare	22901	11078
Model B.6	Kare	Kare	22173	10868
Model B.7	Altıgen	Kare	24415	11884
Model B.8	Sekizgen	Kare	26829	12800
Model B.9	Yok	Yok	28071	14352
Model B.10	Yok	Kare	17259	8812

2.7. Zorlanmış Titreşim Analizi İçin Hesaplamalar

Çerçevelerin serbest titreşim analizleri sonucunda, serbest titreşim modlarının doğal titreşim frekansları belirlenmiştir. Bu analizde, çerçevelerin sadece yatay ve düşey yer değiştirmeleri dikkate alınarak, modların frekansı ve periyotları hesaplanmıştır. Dinamik analiz kapsamında adım tipi yükleme uygulanmış ve hem sönümlü hem de sönümsüz durumları için çeşitli çerçeve modelleri incelenmiştir.

Sönümsüz zorlanmış titreşim durumunda, yatay ve düşey tekil yükleme olmak üzere iki farklı senaryo değerlendirilmiştir. Düşey tekil yükleme durumunda, düşey yer değiştirme modunun periyodu hesaplanırken; yatay tekil yükleme durumunda ise yatay yer değiştirme modunun periyodu dikkate alınmıştır. Sönümsüz zorlanmış titreşim analizinde, toplam süre modun periyodunun altı katı (6 * mod periyodu) olarak bu çalışma için belirlenmiştir.

Sönümlü zorlanmış titreşim durumunda, birinci modun frekansından açısal frekans (ω) hesaplanmıştır. Açısal frekans, periyodik hareketin birim zamanda kaç radyan ölçüldüğünü ifade eden bir kavramdır ($\omega = 2 \pi F_1 = 2\pi / T$) . Önemli faktörlerden biri olan yapısal sönüm oranı, genellikle çelik yapılarda %2 ile %5 arasında değişmektedir. Bu çalışmada, üç farklı yapısal sönüm oranı ayrı ayrı ele alınmıştır. Yapısal sönüm oranının iki ile çarpılıp açısal frekansa bölünmesi sonucunda sönüm katsayısı elde edilmiştir ($\beta = \frac{2\varepsilon}{\omega_1}$) . ANSYS programının öğrenci sürümü kullanıldığından dolayı analizler belirli bir sınır dahilinde gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, yalnızca Model A1'in sönümlü zorlanmış titreşim analizi yapılabilmektedir. Model A'nın yatay yer değiştirmesi dikkate alınarak 5 tonluk yatay dinamik yük

uygulanmıştır. Toplam süreç ise modun periyodunun üç katı (3 * mod periyodu) olarak belirlenmiştir.

2.8. ANSYS’de Çerçeve Modellerin Oluşturulması

2.8.1. Geometri oluşturulması

ANSYS Workbench 2024 programında aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Program açılarak “ File” sekmesi üzerinden “Save as” seçeneği ile proje bir klasöre kaydedilmiştir.
- “Toolbox” -> “Analysis system” -> “Static structural” seçeneği sürüklenerek “Project schematic” sayfasına yerleştirilmiştir (şekil 15).
- “Engineering Data” bölümünden malzeme özellikleri seçimi yapılmıştır. Bu çalışma için (Structural Steel) seçilmiştir.
- “Geometry” sekmesine sağ tıklanarak “New design modeler” seçeneği ile yine pencere açılmıştır.
- “Sketching” bölümünde, XY düzleminde “Modeling” alanında çerçevenin ana hatları tasarım ölçüleriyle çizilmiştir (şekil 16).
- YZ düzlemi seçilerek, çerçevenin en kesit profili de çizilmiştir.
- “Create” -> “Sweep” sekmesi tıklanarak, çerçevenin profili ve ana hattı seçilip çerçeve çizimi tamamlanmıştır.
- Çerçevenin kiriş ve/veya kolonunda istenen boşlukları oluşturmak için “Create” -> “Pattern” sekmesine tıklanarak gerekli boşluk şekli çizilmiştir.
- “Booleen” sekmesi kullanılarak kirişten çizilen boşluklar çıkarılmıştır (şekil 17).
- “Project schematic” -> “Model” üzerine sağ tıklanarak “Mesh” seçilmiş, SOLID187 eleman tipi ile sonlu eleman ağı oluşturulmuştur (şekil 18).

2.8.2. Statik analizi

- Çerçevelerin mesnet koşulları, iki kolonun alt ucu “Fixed” olarak seçilerek sabit mafsalsal şekilde tanımlanmıştır.

- Yük tanımlaması, “Environment” -> “Loads” sekmesinden yayılı yük için “Pressure” ve tekil yükler için “Force” seçenekleri kullanılmıştır (şekil 19).
- “Solution”-> “Results” menüsünden, istenilen statik analiz sonuçları “Deformation” ve “Stress” sekmelerinden toplam yer değiştirme ve gerilmeler elde edilmiştir (şekil 20).

2.8.3. Dinamik analizi

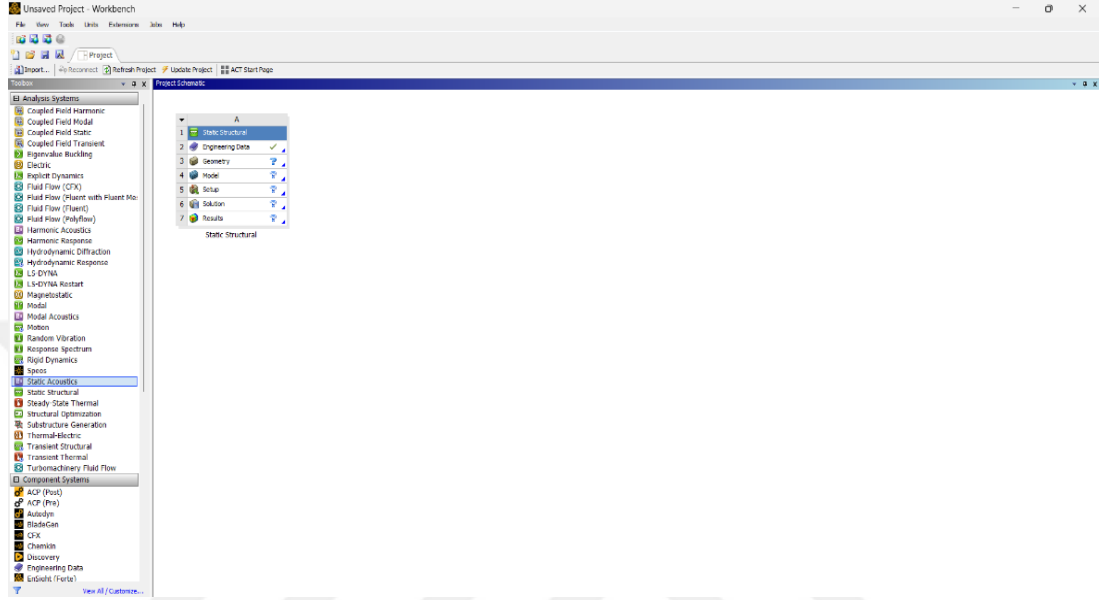
2.8.3.1. Serbest titreşim analizi

- Daha önce modellenen çerçevelerin serbest titreşim analizi için “Solution” sekmesine sağ tıklanarak “Transfer data to new”-> “Modal” seçeneği ile veri aktarımı yapılmıştır. Uygulanan yükü kaldırılmış ve yalnızca mesnet koşulları ile 10 adet farklı deformasyon modu eklenmiştir. Bu sayede modelin toplam yer değiştirmeleri ve frekans değerleri elde edilmiştir (şekil 21).

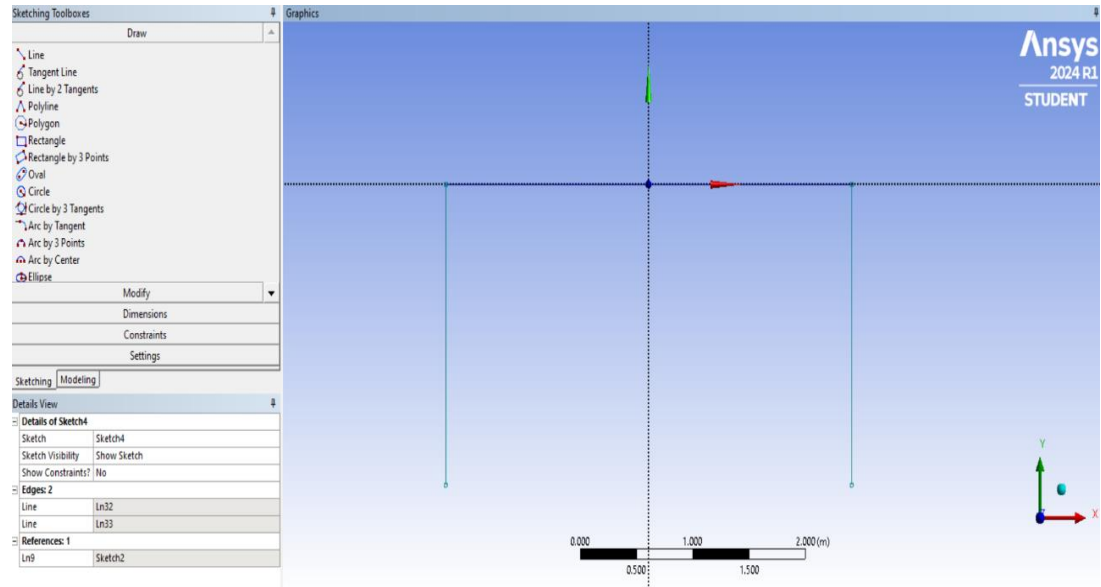
2.8.3.2. Zorlanmış titreşim

- Serbest titreşim analizinde, modelin düşey ve yatay yer değiştirmeleri yalnızca X eksen ve Y eksen yönlerinde modları belirlenmiş ve periyotları hesaplanmıştır.
- “Transient structural” kısmına model geometrisi ve mesnet koşulları aktarılmıştır.
- Bu çalışma kapsamında, 6 adımlı sönümsüz ve 3 adımlı sönümlü zorlanmış titreşim analizi gerçekleştirilmiştir.
- “Analysis settings” bölümünde, “Step end time” kısmına toplam geçen periyot süresi saniye cinsinden girilmiştir.
- Toplam yer değiştirme sonuçlarında, aralıklı zaman sürecinde oluşan maksimum ve minimum değerleri elde edilmiştir (şekil 22).

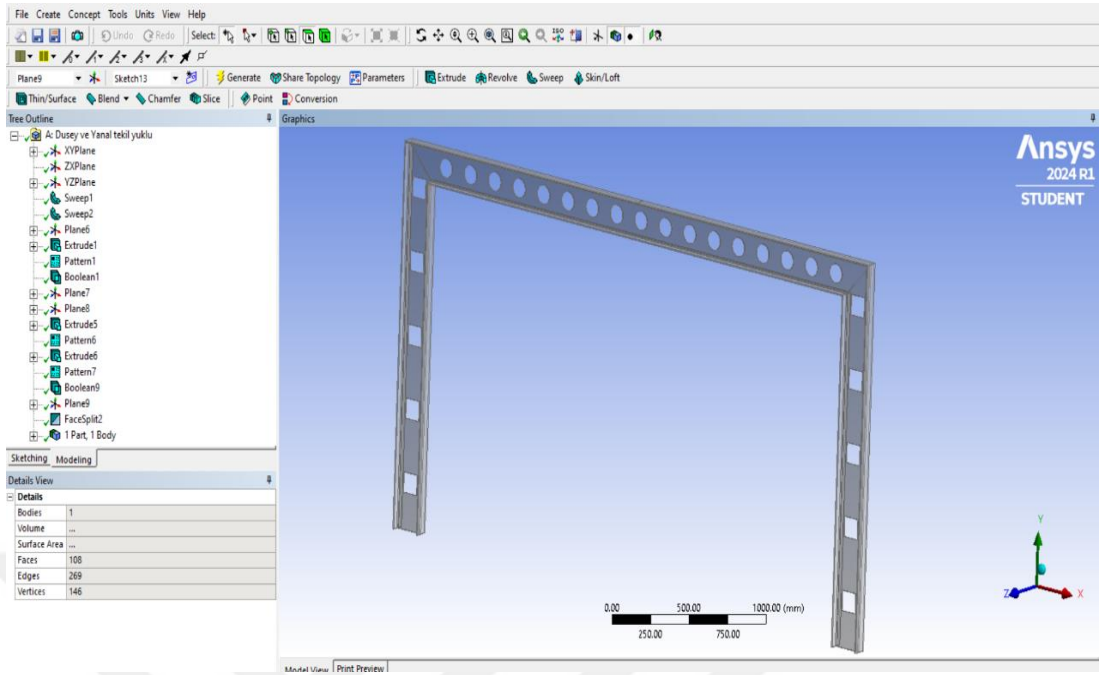
- Sönümlü zorlanmış titreşim analizi için “Damping controls” -> “Stiffness coefficient” kısmında sönüm katsayısı girilmiştir (şekil 23).



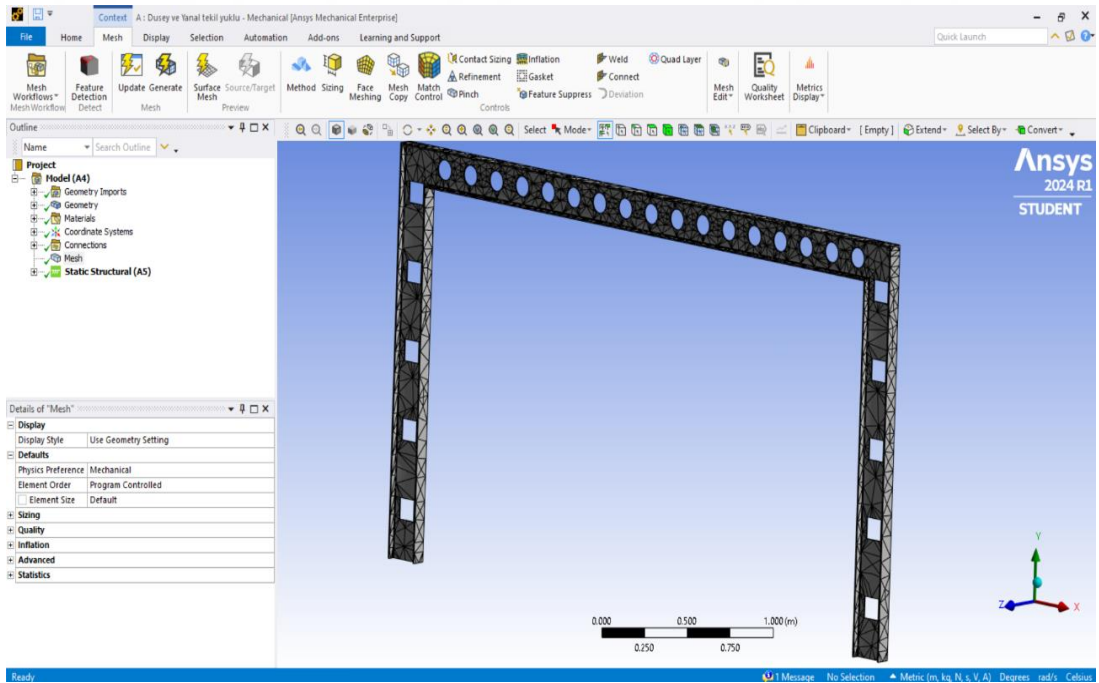
Şekil 15. ANSYS 2024 R1 Workbench ana sayfası.



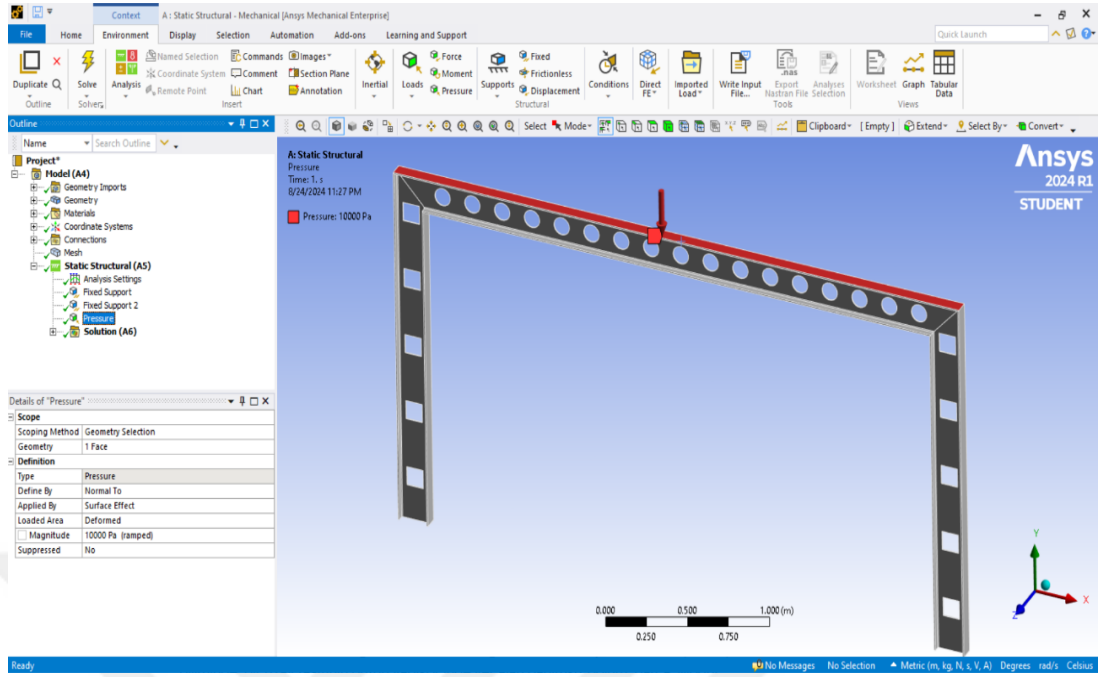
Şekil 16. Modellenen çerçevenin ana hatları.



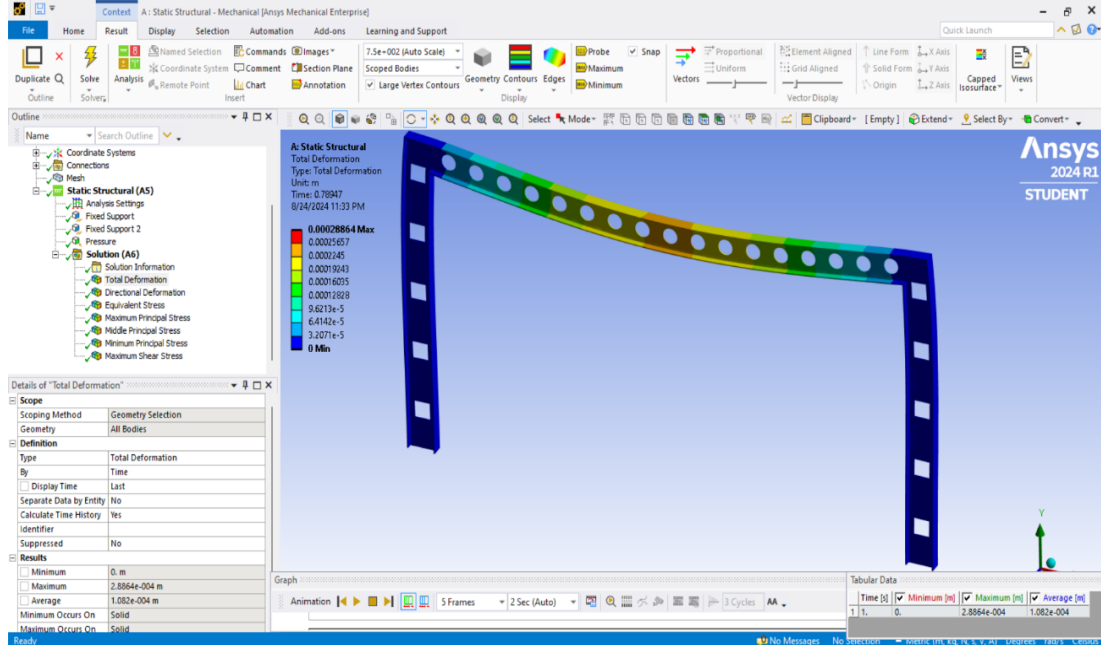
Şekil 17. Çerçeve için geometrik modelin oluşturulması .



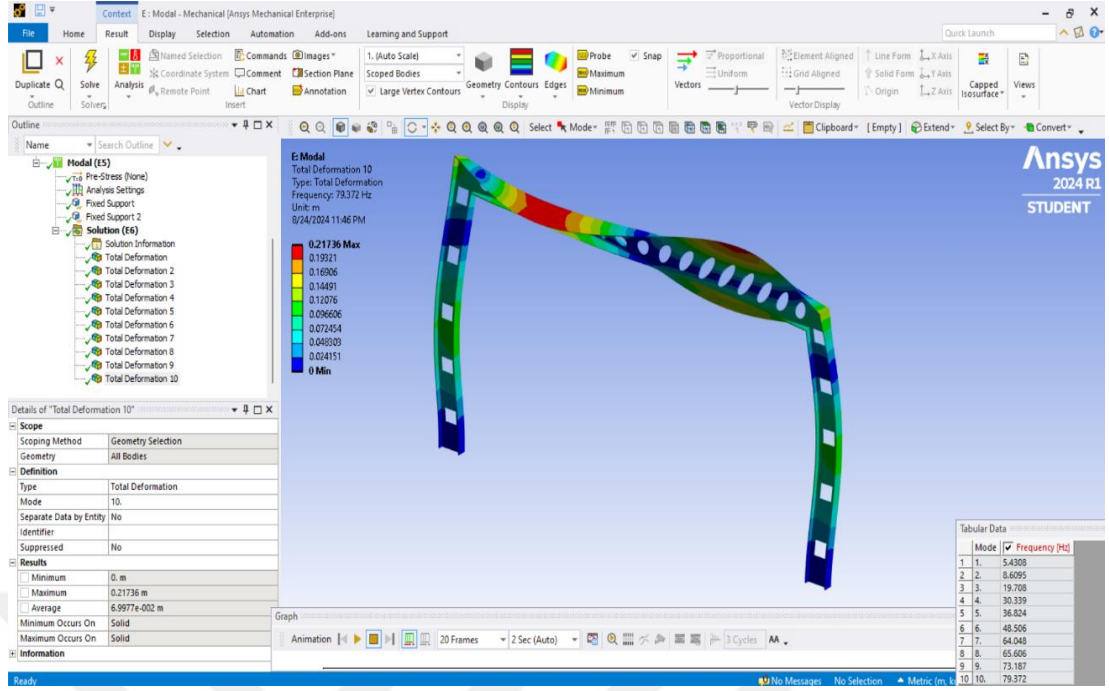
Şekil 18. Sonlu eleman ağının oluşturulması



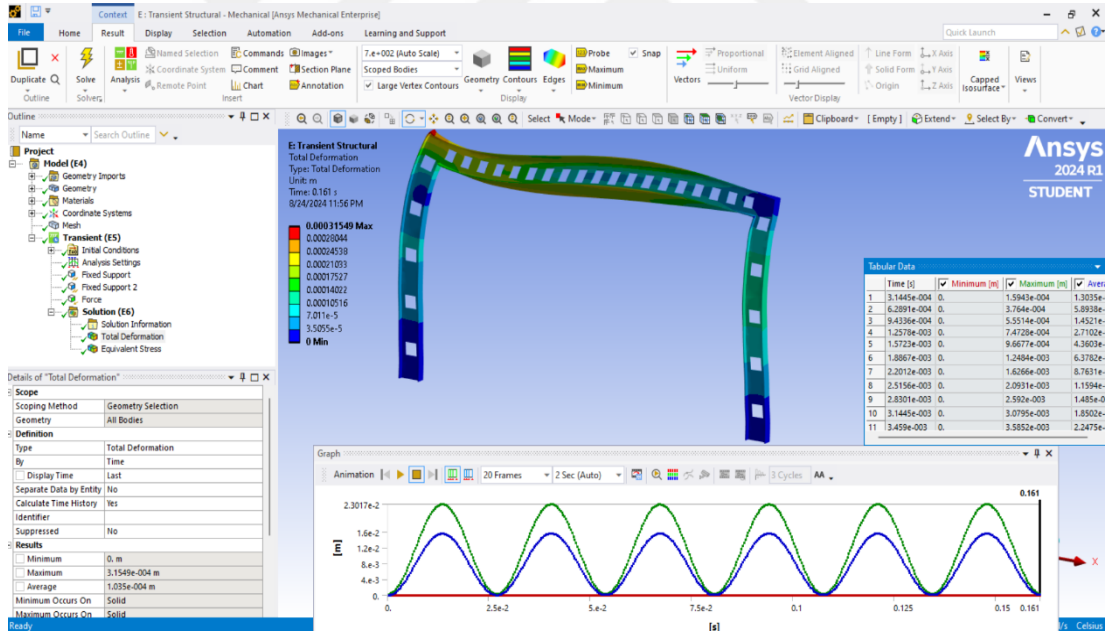
Şekil 19. Yayıllı yük uygulanması



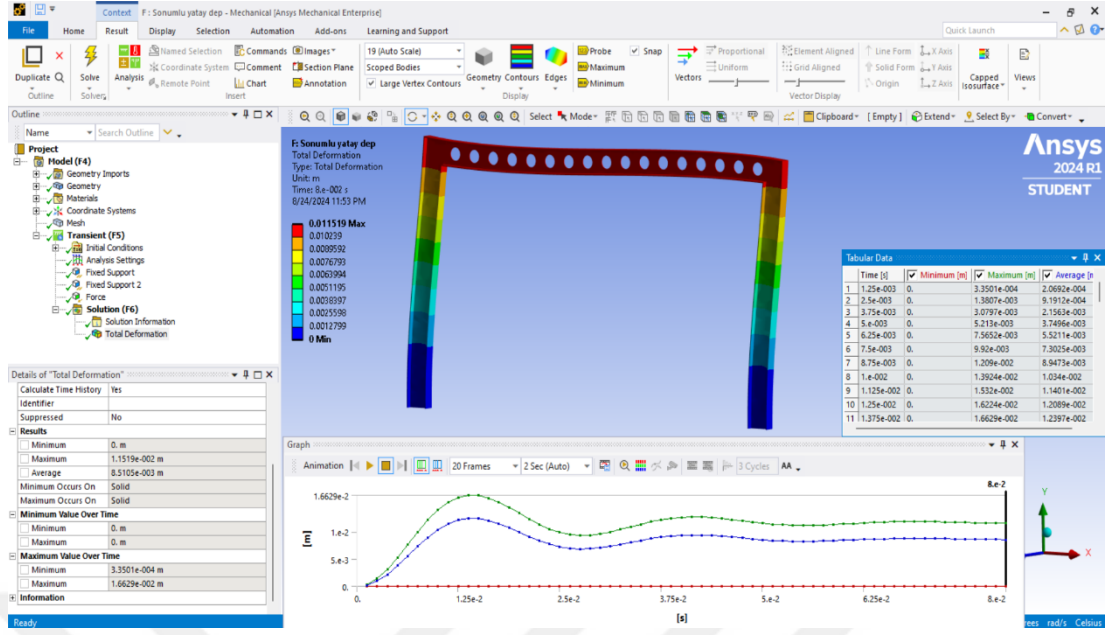
Şekil 20. Statik analiz sonuçlarının elde edilmesi



Şekil 21. Serbest titreşim analiz sonuçlarının elde edilmesi



Şekil 22. Sönümsüz zorlanmış titreşim analiz sonuçlarının elde edilmesi



Şekil 23. Sönümlü zorlanmış titreşim analiz sonuçlarının elde edilmesi

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Statik Analiz

Çeşitli analiz sistemlerini içeren ANSYS 2024 R1 programı kullanılarak, petek çerçeve sistemlerinin statik analizi gerçekleştirilmiştir. ANSYS programı, sonlu elemanlar yöntemi ile problemin yaklaşık çözümlerini hesaplamak amacıyla kullanılmaktadır.

Petek çerçevelerinin kiriş ve kolonları, farklı gövde boşluk geometrilerine göre ve çeşitli yükleme durumlarına göre incelenerek çerçevenin performansına olan etkileri değerlendirilmiştir. Analizi yapılan tüm modellerde IPE200 profili enkesit olarak seçilmiştir. Kirişlerin gövde boşlukları dairesel, kare, altıgen ve sekizgen olacak şekilde değiştirilmiş, kolonların ise boşluksuz ve dairesel boşluklu olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, çerçevenin aynı açıklık uzunluğu korunarak, farklı eğimli bir kiriş uygulamasının analize etkisi araştırılmıştır. Yükleme durumları, dört farklı senaryo olarak tüm çerçevelere uygulanmıştır. Ek olarak, tüm modellerin boşluksuz kolon ve kirişten oluşan çerçevelerinin analizi ele alınmıştır. Toplam 76 farklı modelleme tasarlanmıştır.

Statik analiz sonucunda, yer değiştirme değerleri, asal gerilmelerin ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) değerleri, Von-Mises gerilmesi ve maksimum kayma gerilme değerleri elde edilmiştir.

3.1.1. Petek çerçeve modellerin yer değiştirme sonuçları

Modellerde en büyük toplam yer değiştirme, yatay ve düşey yer değiştirme değerleri Tablo (5- 8)'de listelenmiştir. Bu değerler, iki farklı çerçeve tipine göre, dört farklı kiriş boşluk şekli, kolonun dairesel boşluklu ve boşluksuz modellerinin değerleri ve dört farklı yükleme durumları için yapılan statik analiz sonuçlarından elde edilmiştir.

Tablo 5. Yayılı yük yükleme sonucunda oluşan yer değiştirme değerleri (mm) .

Model Numarası	Toplam yer değiştirme (mm)	Yatay yer değiştirme (mm)	Düşey yer değiştirme (mm)
A.1	0.27431	0.03463	0.27431
A.2	0.27905	0.03304	0.27904
A.3	0.28106	0.03311	0.28106
A.4	0.29763	0.03199	0.29763
A.5	0.28864	0.03522	0.28864
A.6	0.29297	0.03467	0.29297
A.7	0.29523	0.03465	0.29523
A.8	0.31006	0.03474	0.31006
A.9	0.24436	0.03256	-0.24436
B.1	0.20181	-0.08158	-0.20177
B.2	0.20470	0.08269	-0.20470
B.3	0.20679	0.08305	-0.20679
B.4	0.21685	0.08585	-0.21684
B.5	0.21668	-0.08564	-0.21657
B.6	0.21982	-0.08756	-0.21976
B.7	0.22014	0.08611	-0.22012
B.8	0.23368	-0.09219	-0.23358
B.9	0.19712	0.08012	-0.19704
B.10	0.19952	0.08105	-0.19952

Tablo 5'ten elde edilen verilere göre, yayılı yük yükleme sonucunda meydana gelen en büyük toplam yer değiştirme değeri Model A.8'de, en küçük toplam yer değiştirme değeri ise sırasıyla Model B.9, B.10 ve B1'de elde edilmiştir.

Ayrıca her Model tipi ayrı ayrı karşılaştırıldığında, Model A'nın en büyük yer değiştirmesi 8.durumda, en küçük yer değiştirmesi ise 9.durumda olduğu bulunmuştur. Model B'nin en büyük yer değiştirme değeri 8.durumda, en küçük yer değiştirme değeri ise 9.durumda olarak tablodan gözlemlenmiştir. Sadece Yayılı yüke maruz kalan bir çerçeve sisteminin yer değiştirme açısından değerlendirildiğinde, Model B çerçeve tipi Model A'ya göre daha güvenli bir modeldir. Ek olarak, kolonlar boşluklu olarak kullanılacaksa I profilli boşluksuz kolona göre daha fazla yer değiştirme göstereceğinden dolayı daha az güvenilir bir durum olduğu dikkate alınmalıdır.

Çerçeve kirişinde oluşan gövde boşluk şekline göre değerlendirildiğinde, dairesel şeklin en az yer değiştirme sonucunu verdiği ve en riskli boşluk şeklinin ise sekizgen gövde boşluklu çerçeve sistemi olduğu tablodan belirlenmiştir.

Tablo 6. Düşey tekil yük yükleme sonucu oluşan yer değiştirme değerleri (mm).

Model Numarası	Toplam yer değiştirme (mm)	Yatay yer değiştirme (mm)	Düşey yer değiştirme (mm)
A.1	17.05100	1.80480	-17.05100
A.2	15.52700	-1.55360	-15.52600
A.3	15.65200	1.52870	15.65200
A.4	18.20300	1.62490	18.20300
A.5	17.64600	1.85970	-17.64600
A.6	16.34300	1.60130	-16.34300
A.7	16.36100	1.57930	-16.36100
A.8	19.00500	1.67980	-19.00400
A.9	14.16900	1.59950	-14.16900
B.1	12.54000	4.95030	-12.54000
B.2	12.83200	5.05410	-12.83200
B.3	12.92900	5.08790	-12.92900
B.4	13.76500	5.36840	-13.75800
B.5	13.26800	5.24820	-13.26100
B.6	13.53400	5.38720	-13.53300
B.7	13.60600	5.29120	-13.60500
B.8	14.61100	5.74230	-14.61100
B.9	12.07300	4.85250	-12.07100
B.10	12.02900	4.82510	-12.02900

Tablo 6'den elde edilen verilere göre, düşey tekil yük yükleme sonucu meydana gelen en büyük toplam yer değiştirme değeri Model A.8'de, en küçük toplam yer değiştirme değeri ise Model B.10, B.9 ve B.1'de elde edilmiştir.

İki farklı modeli ayrı değerlendirildiğinde, Model A'nın en büyük yer değiştirme 8.durumda, en küçük yer değiştirme ise 9.durumda olduğu bulunmuştur. Model B'nin yer değiştirmesinin en büyük değeri 8.durumda, en küçük değeri 10.durumda elde edilmiştir.

Düşey yük uygulanmış bir çerçeve sisteminin yer değiştirme açısından değerlendirildiğinde, yer değiştirme değerlerinin daha küçük olması sebebiyle Model B çerçeve tipi tercih edilmelidir. Petek çerçevenin kiriş gövde boşluğu geometrisi olarak en düşük yer değiştirme değerleri kare ve dairesel boşluklarda bulunmuştur.

Tablo 7. Yanal tekil yük yükleme sonucunda oluşan yer değiştirme değerleri (mm).

Model Numarası	Toplam yer değiştirme (mm)	Yatay yer değiştirme (mm)	Düşey yer değiştirme (mm)
A.1	11.59900	11.58300	1.74730
A.2	10.65900	10.64500	1.02340
A.3	10.66500	10.65100	1.01430
A.4	11.51700	11.50100	1.12430
A.5	12.62100	12.60500	1.16330
A.6	11.66400	11.65000	1.00130
A.7	11.69900	11.68400	1.50970
A.8	12.55300	12.53700	1.10050
A.9	10.95200	10.93800	1.03640
B.1	13.34600	13.33400	2.80170
B.2	13.39300	13.38500	2.82220
B.3	13.45800	13.45000	2.84570
B.4	13.70600	13.69900	2.96880
B.5	14.38900	14.37500	2.86420
B.6	14.51000	14.50300	2.92230
B.7	14.52600	14.51700	2.97620
B.8	14.81400	14.80800	3.04510
B.9	13.32300	13.31000	2.71830
B.10	14.02200	14.01000	2.76530

Tablo 7'nin verilerine göre yanal tekil yük yükleme sonucunda meydana gelen en büyük toplam yer değiştirme değeri Model B.8'de, en küçük toplam yer değiştirme değeri ise Model A.2'de bulunmuştur. Model A'nın en büyük yer değiştirme 5.durumda, en küçük yer değiştirme 2.durumda oluşmaktadır. Model B'nin en büyük yer değiştirme değeri 8.durumda, en küçük değeri ise 9. Ve 1. durumda elde edilmiştir.

Yanal tekil yükleme durumunda, petek çerçevenin gövde boşluk geometrisi kare ve dairesel olarak tercih edilmelidir. Model A tipi tasarımında yer değiştirme değerleri daha kontrollü bir yönde kalmaktadır.

Tablo 8. Düşey ve yanal tekil yük yükleme sonucunda oluşan yer değiştirme değerleri (mm) .

Model Numarası	Toplam yer değiştirmesi (mm)	Yatay yer değiştirmesi (mm)	Düşey yer değiştirmesi (mm)
A.1	20.58600	12.45200	17.48400
A.2	18.80400	11.36800	15.92300
A.3	18.86300	11.35500	16.02700
A.4	21.45700	12.23000	18.59300
A.5	21.70400	13.49600	18.15700
A.6	20.01500	12.46600	16.74300
A.7	20.01700	12.45900	16.75900
A.8	22.66900	13.35100	19.38500
A.9	17.81700	11.70200	14.56100
B.1	15.96600	15.69900	-10.36500
B.2	16.11600	15.81200	-10.59800
B.3	16.21700	15.87400	-10.68700
B.4	16.77600	16.25700	-11.35700
B.5	17.17800	17.02200	-11.01100
B.6	17.33700	17.16400	-11.19300
B.7	17.24300	17.00700	-11.20700
B.8	18.07000	17.65900	-12.04900
B.9	15.76000	15.72800	-9.95920
B.10	16.35400	16.35400	-9.98950

Tablo 8'in verilerine göre, düşey ve tekil yük yükleme durumunda petek çerçevelerde oluşan en büyük ve en küçük yer değiştirme değerlerinin yükleme I durumuna (sadece düşey yük yükleme durumu) ait sonuçlarla aynı modellerde olduğu gözlemlenmiştir.

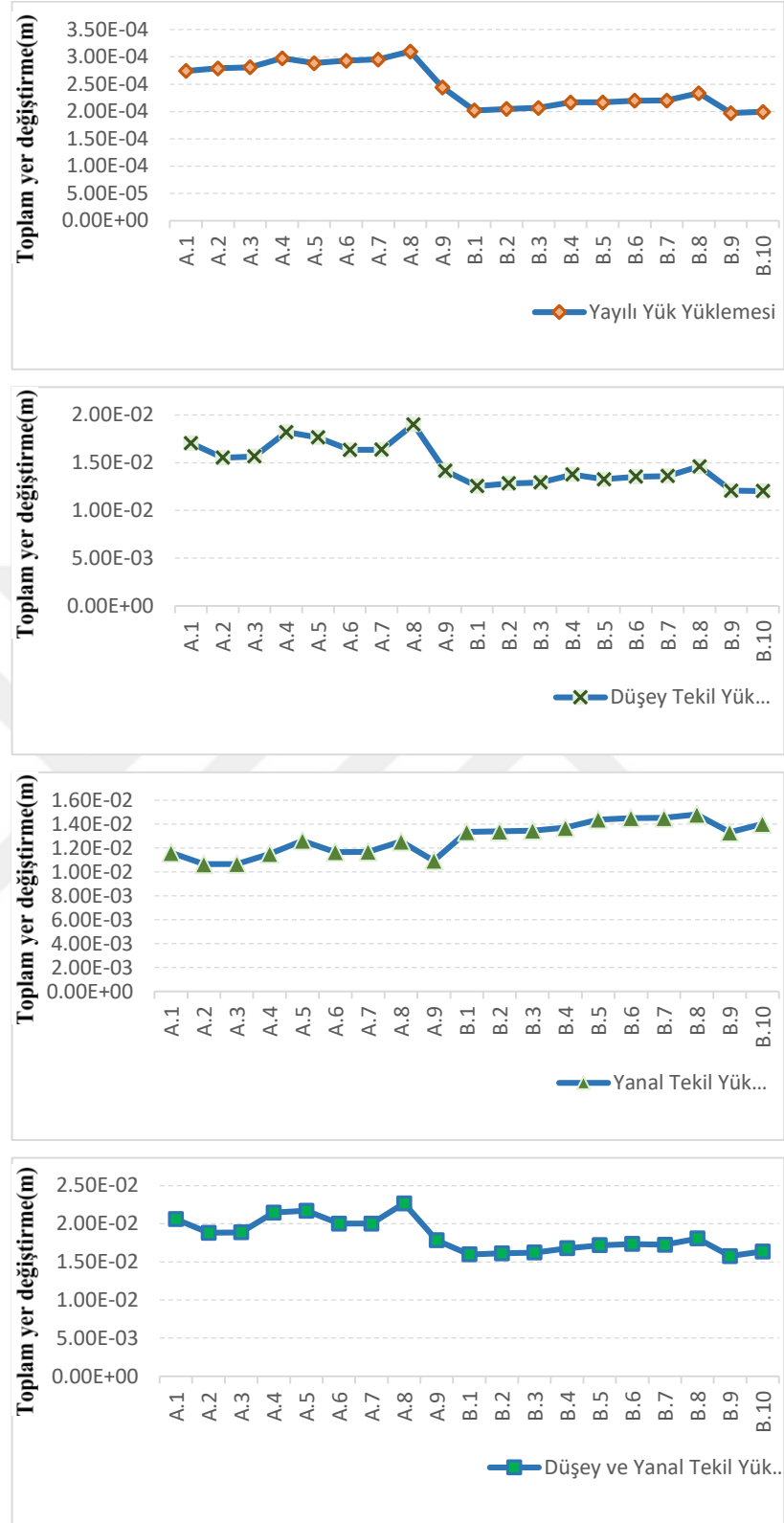
Yapılan tüm analizlerin sonuçlarından elde edilen en önemli gözlem, her türlü yüklemeye maruz kalan bir çerçevenin I profilli durumunun, petek durumuna göre daha az yer değiştirmeye sahip olduğudur. Ancak, daha ekonomik ve daha fazla kirişin derinliği gerektiren tasarımlarda petek çerçeve tercih edilmelidir.

Seçilen iki farklı çerçeve açıklık şekline göre, kirişin ve kolonun gövde boşluk geometrisi olarak dairesel ve kare şekillerin tercih edilmesi gerektiği, sekizgen boşlukların tercih edilmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Modellerin yer değiştirme değerleri daha iyi karşılaştırmak için şekil (24 -25)'te her bir yükleme durumu için ayrı bir karşılaştırma grafiği hazırlanmıştır.

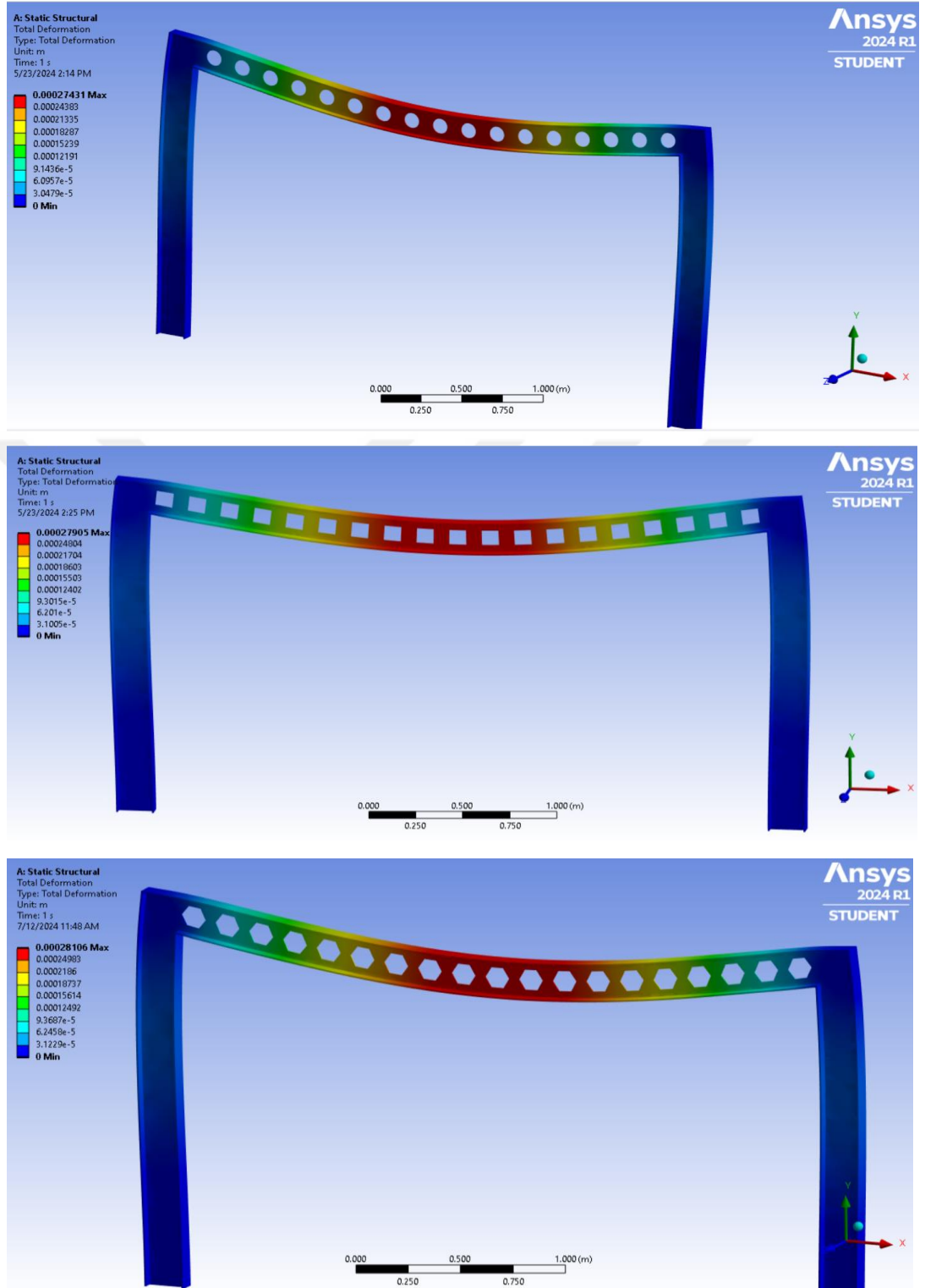


Şekil 24. Toplam yer değiştirme değerlerinin grafiği

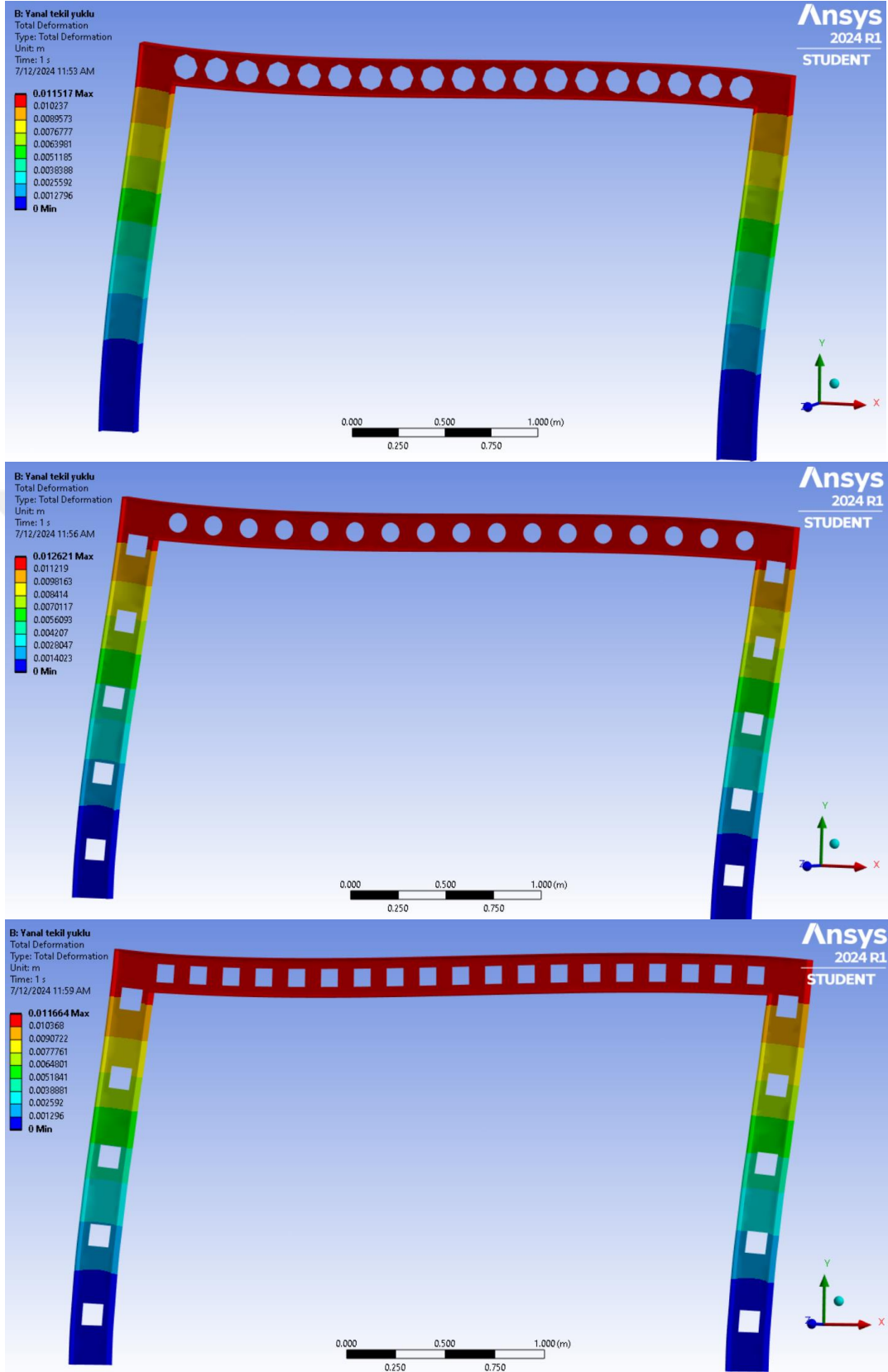


Şekil 25.Toplam yer değıştirme değierlerinin grafiği

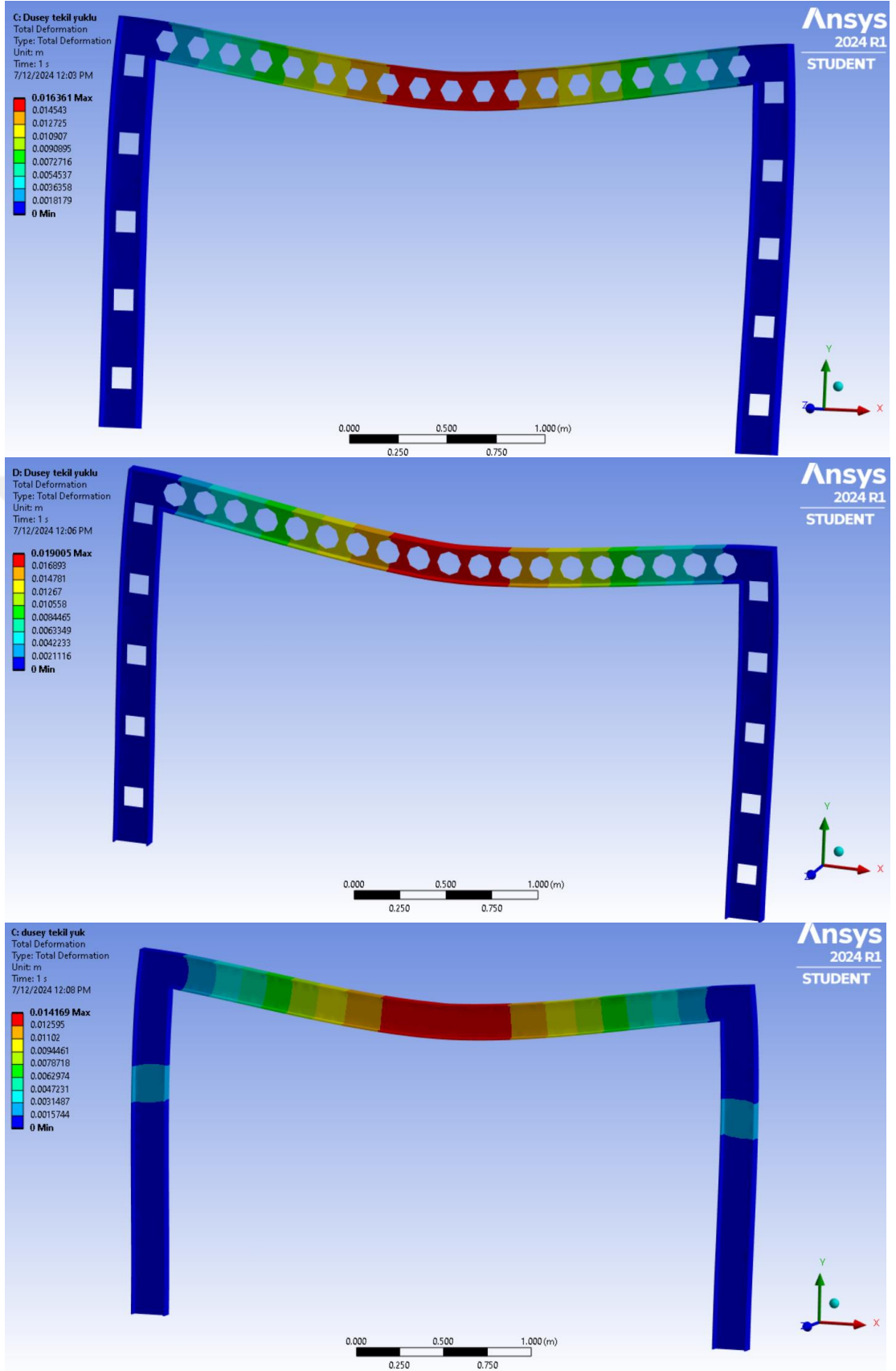
ANSYS'ten elde edilen sonuçların görselleri şekil (26-31)'de verilmiştir



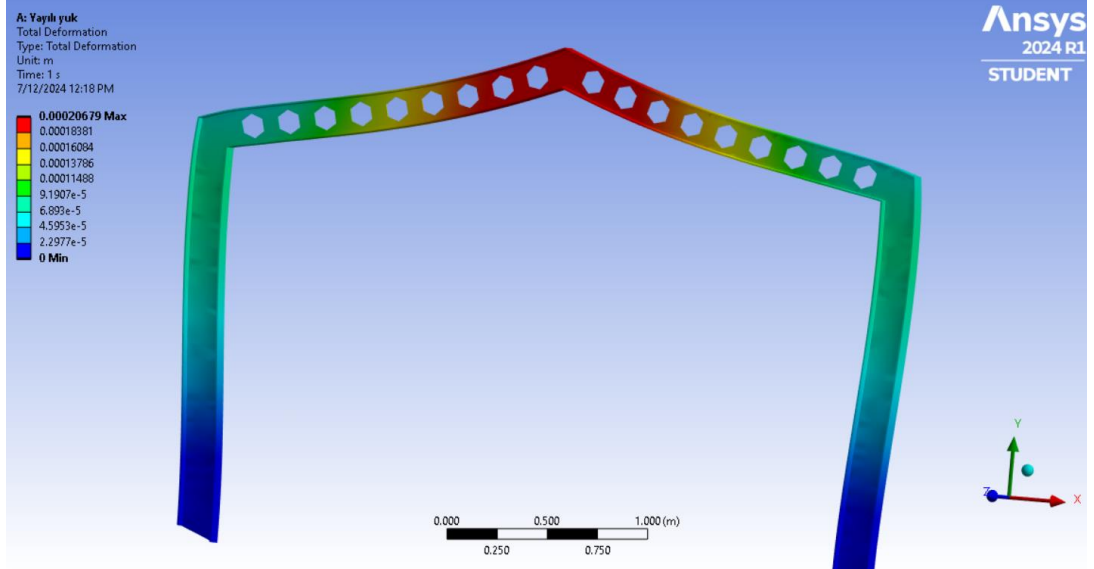
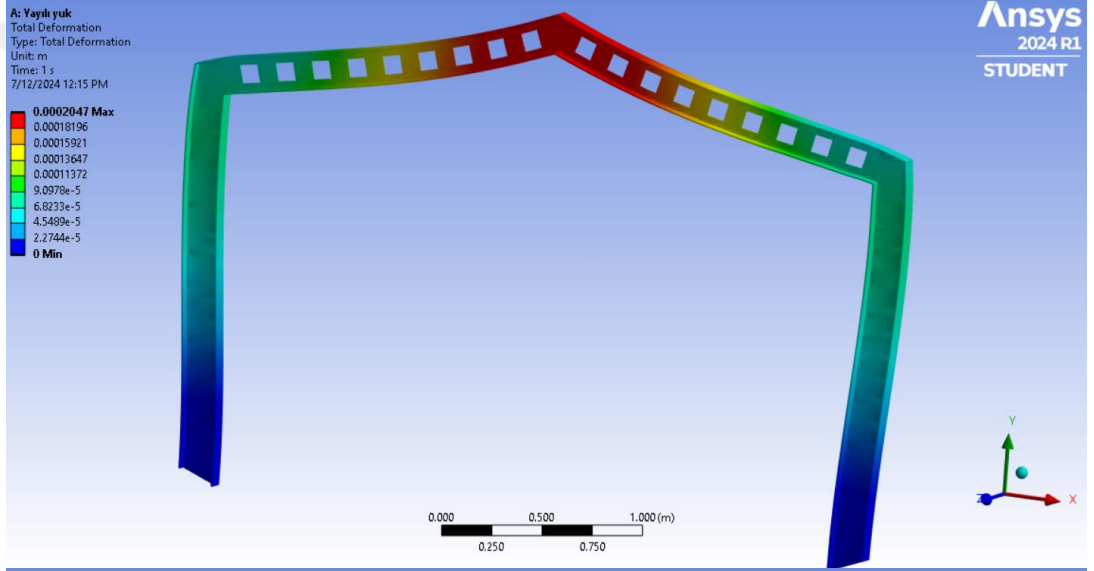
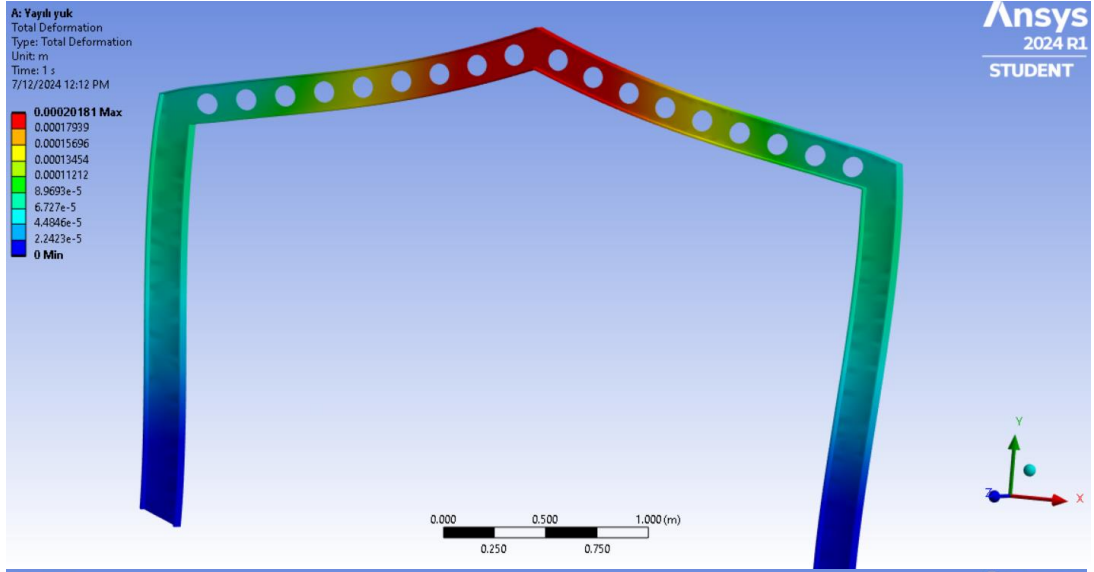
Şekil 26. Yayıllı yük yükleme durumunda Model A'nın toplam yer değıştirme değeri -ANSYS 2024 analizi



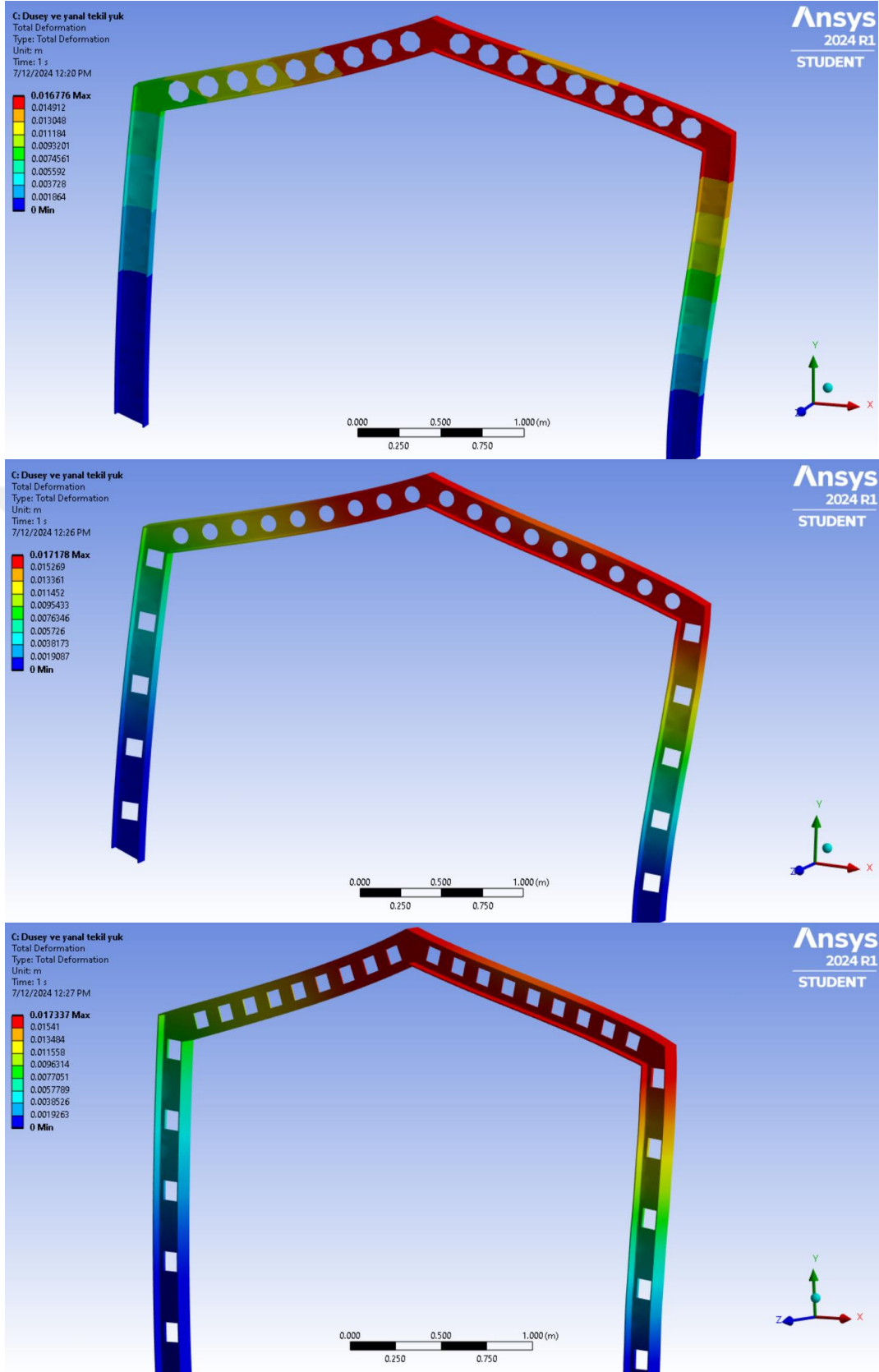
Şekil 27. Yanal tekil yük yükleme durumunda Model A'nın toplam yer değıştirme değerleri -ANSYS 2024 analizi



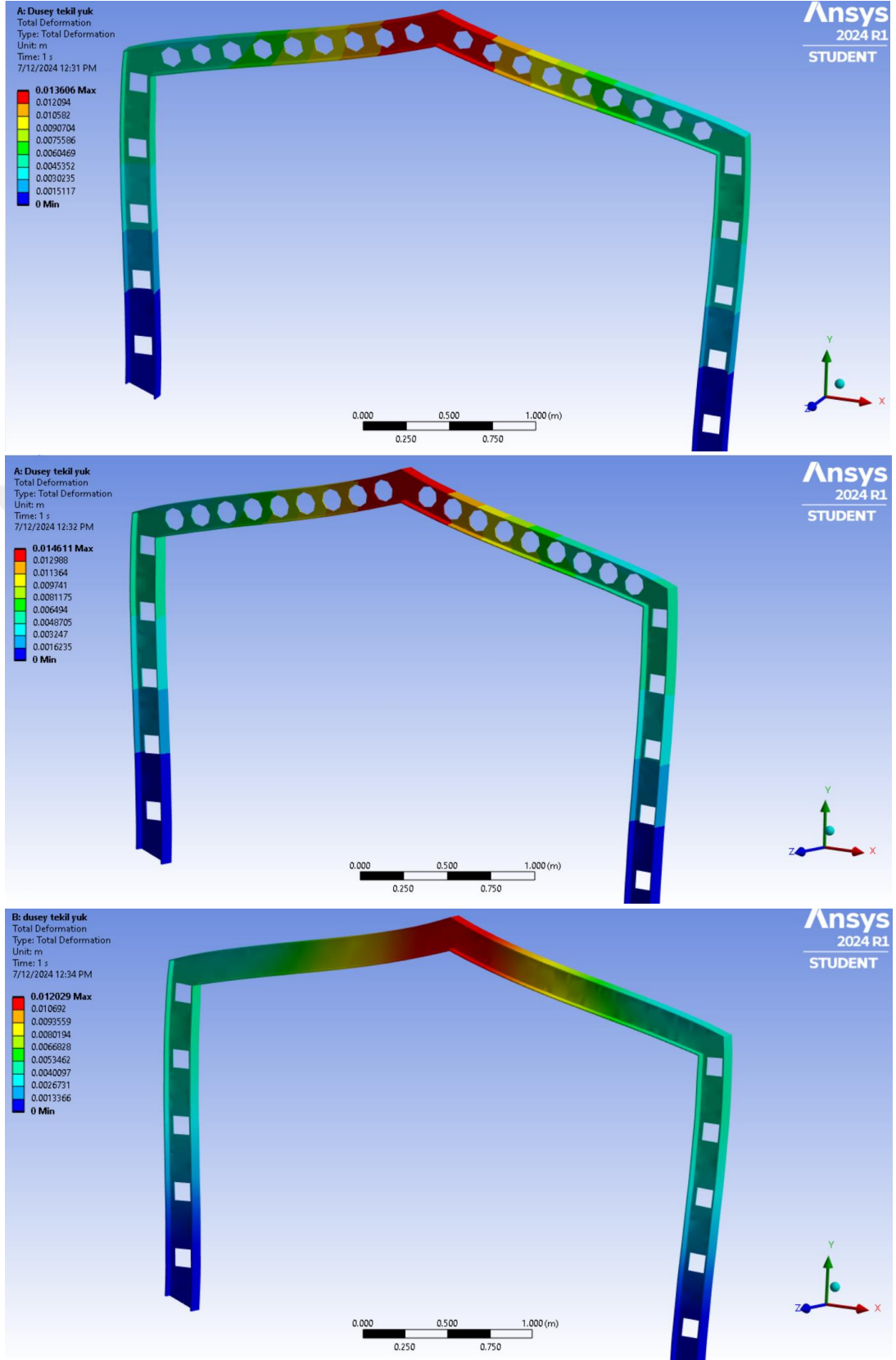
Şekil 28. Düşey tekil yük yükleme durumunda Model A'nın toplam yer değıştirme değeri -ANSYS 2024 analizi



Şekil 29. Yayılı yük yükleme durumunda Model B'nin toplam yer değıştirme değeri -ANSYS 2024 Analizi



Şekil 30. Düşey ve yanal tekil yük yükleme durumunda Model B'nin toplam yer değiştirme değerleri -ANSYS 2024 Analizi



Şekil 31. Düşey tekil yük yükleme durumunda Model B'nin toplam yer değiştirme değerleri -ANSYS 2024 Analizi

3.1.2. Gerilme analizi

3.1.2.1. Asal gerilmeleri (σ_1 , σ_2 , σ_3)

Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan ANSYS programının statik analizinden en büyük maksimum, ortanca ve minimum asal gerilme değerleri Tablo (9- 12)'de gösterilmiştir. Elde edilen değerler her farklı yükleme durumu (yayılı, düşey ve tekil yük yükleme durumları) ve her farklı bir model için sıralanmıştır.

Tablo 9. Yayılı yük yüklemesi sonucunda oluşan en büyük maksimum, ortanca ve minimum asal gerilme değerleri (Pa) .

Model Numarası	σ_1 (Pa)	σ_2 (Pa)	σ_3 (Pa)
A.1	8.5005E+06	-7.3368E+06	-1.4181E+07
A.2	1.0405E+07	-7.6848E+06	-1.5974E+07
A.3	1.2228E+07	-7.5332E+06	-1.6265E+07
A.4	1.3403E+07	-6.9653E+06	-1.8599E+07
A.5	7.9903E+06	-6.0025E+06	-1.7964E+07
A.6	1.0342E+07	-7.8659E+06	-1.9854E+07
A.7	9.9453E+06	-7.0645E+06	-2.1487E+07
A.8	1.4874E+07	-6.7089E+06	-1.9355E+07
A.9	8.5772E+06	-8.4396E+06	-1.9187E+07
B.1	8.2383E+06	-7.3176E+06	-1.4428E+07
B.2	8.1162E+06	-7.0798E+06	-1.3316E+07
B.3	9.7059E+06	-7.6321E+06	-1.3469E+07
B.4	1.3090E+07	-7.7271E+06	-1.3568E+07
B.5	7.8199E+06	-6.7987E+06	-1.6844E+07
B.6	7.5128E+06	-6.9152E+06	-1.6060E+07
B.7	1.0193E+07	-6.7995E+06	-1.5788E+07
B.8	1.2113E+07	-6.8866E+06	-1.6655E+07
B.9	7.1691E+06	-8.9501E+06	-1.7010E+07
B.10	5.6670E+06	-6.1375E+06	-1.4456E+07

Tablo 9.' un verilerine göre yayılı yüke maruz kalmış bir A tipi çerçevenin en büyük asal gerilme mutlak değeri A.7'de, en küçük asal gerilme mutlak değeri ise A.5'te elde edilmiştir. Model A petek çerçeve sisteminde, petek kolon ve kiriş kullanıldığında ve gövde boşlukları dairesel tipte seçildiğinde, en düşük asal gerilme değeri elde edilebilmektedir. Model B'nin en büyük asal gerilme mutlak değeri B.9 ve B.8'de, en küçük asal gerilme mutlak değerleri ise B.10 ve B.7'de elde edilmiştir. Model B petek çerçevesinin en küçük asal gerilmesinin istenen tasarımında, altıgen boşluklu kiriş kullanılması gerektiği tablodan gözlemlenmiştir. Model tipine göre en

küçük asal gerilme açısından tercih yapılması gerekiyorsa Model B tipinde daha az gerilme oluşmaktadır. Sadece yayılı yüke maruz kalan bir çerçevenin kolon ve kirişinin boşluklu olarak kullanılması asal gerilme değerini düşürdüğünden dolayı önerilmektedir.

Tablo 10. Düşey tekil yük yükleme sonucu oluşan en büyük maksimum, ortanca ve minimum asal gerilme değerleri (Pa) .

Model Numarası	σ_1 (Pa)	σ_2 (Pa)	σ_3 (Pa)
A1	3.8137E+08	-3.9803E+08	-7.6576E+08
A.2	5.0967E+08	-3.2582E+08	-7.2191E+08
A.3	5.1869E+08	-3.3699E+08	-7.3564E+08
A.4	7.7366E+08	-3.4037E+08	-8.1647E+08
A.5	3.8642E+08	-3.3163E+08	-9.1986E+08
A.6	5.1441E+08	-3.3233E+08	-9.1555E+08
A.7	5.2293E+08	-3.0605E+08	-8.6586E+08
A.8	8.1885E+08	-3.2254E+08	-9.6273E+08
A.9	4.1798E+08	-4.0159E+08	-8.2603E+08
B.1	5.0829E+08	-3.3427E+08	-6.9678E+08
B.2	4.7432E+08	-3.4889E+08	-6.5566E+08
B.3	5.0948E+08	-3.4562E+08	-6.5816E+08
B.4	4.7604E+08	-3.7015E+08	-6.6417E+08
B.5	5.1736E+08	-3.3737E+08	-8.0016E+08
B.6	4.6781E+08	-3.4076E+08	-7.7723E+08
B.7	4.6587E+08	-3.2794E+08	-7.6303E+08
B.8	5.7550E+08	-3.2547E+08	-7.9862E+08
B.9	6.2527E+08	-4.6141E+08	-8.1749E+08
B.10	4.0039E+08	3.4759E+08	-6.6206E+08

Tablo 10'den elde edilen verilere göre, düşey tekil yüklü petek çerçevelerin en büyük asal gerilme mutlak değerleri sırasıyla Model A için A.8 ve Model B için B.9'da, en küçük asal gerilme mutlak değerleri ise A.7 ve B.8'de oluşmaktadır.

Tablo 11. Yanal tekil yük yükleme sonucu oluşan en büyük maksimum,ortanca ve minimum asal gerilme değerleri (Pa) .

Model Numarası	σ_1 (Pa)	σ_2 (Pa)	σ_3 (Pa)
A.1	3.6249E+08	-2.0247E+08	-4.3432E+08
A.2	3.7291E+08	-1.9164E+08	-4.3446E+08
A.3	3.6258E+08	-1.8782E+08	-4.4722E+08
A.4	3.9897E+08	-1.8707E+08	-4.5445E+08
A.5	4.1473E+08	-1.9920E+08	-5.4944E+08
A.6	4.6314E+08	1.9553E+08	-5.3991E+08
A.7	4.7305E+08	-2.0569E+08	-5.4282E+08
A.8	4.7490E+08	-1.8427E+08	-5.5869E+08
A.9	4.3995E+08	-2.4933E+08	-5.1724E+08
B.1	5.0233E+08	2.2492E+08	-2.9065E+08
B.2	4.5442E+08	2.6494E+08	-2.8591E+08
B.3	4.7368E+08	2.2691E+08	-2.8296E+08
B.4	4.6772E+08	2.1027E+08	-3.0353E+08
B.5	5.5596E+08	2.5086E+08	-4.1432E+08
B.6	5.4877E+08	2.4964E+08	-4.3209E+08
B.7	5.8780E+08	2.4371E+08	-3.4464E+08
B.8	5.5921E+08	2.3622E+08	-4.3976E+08
B.9	5.9530E+08	3.3868E+08	-3.8156E+08
B.10	4.7850E+08	2.5263E+08	-3.7647E+08

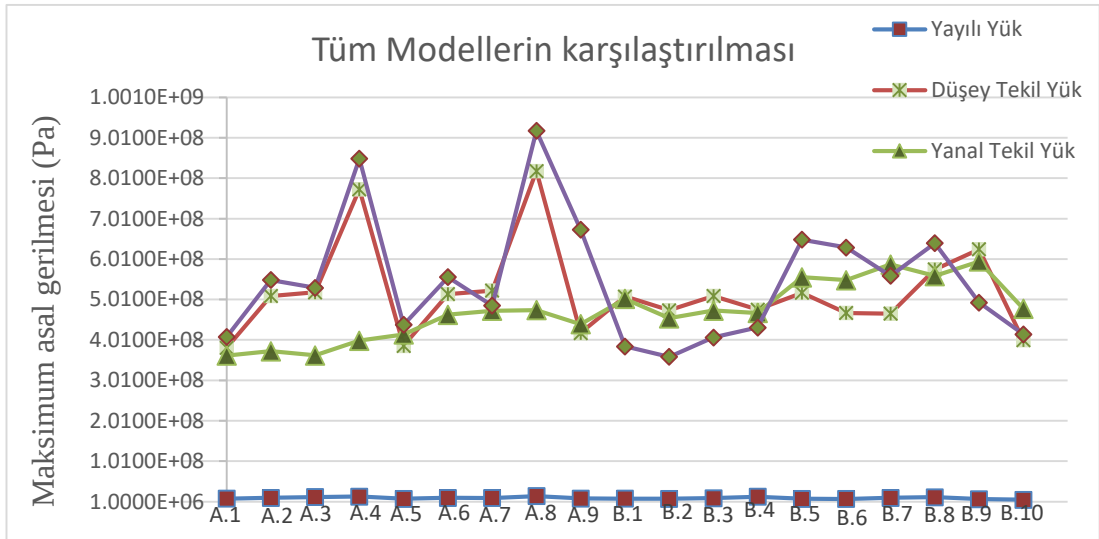
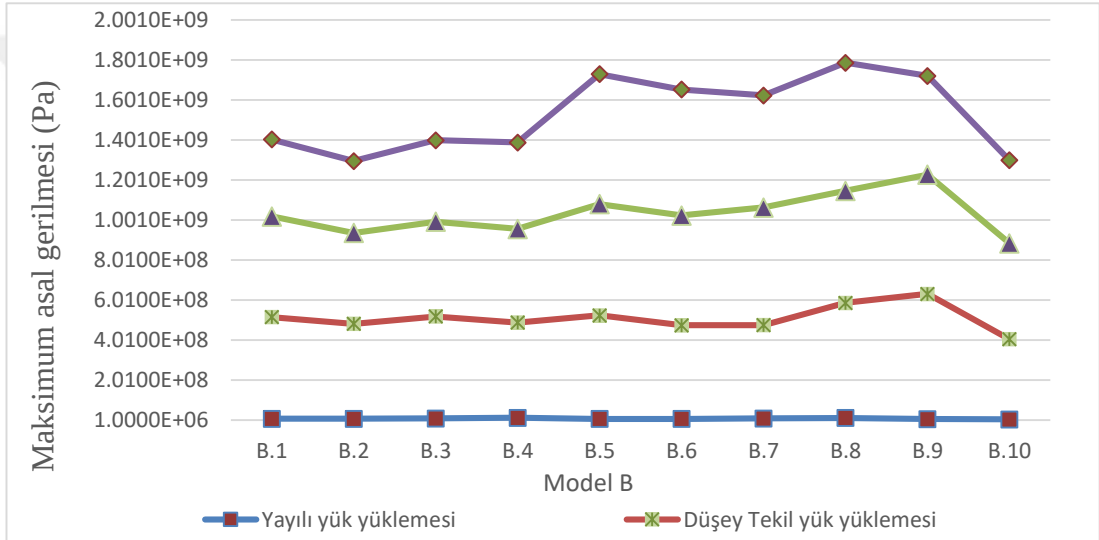
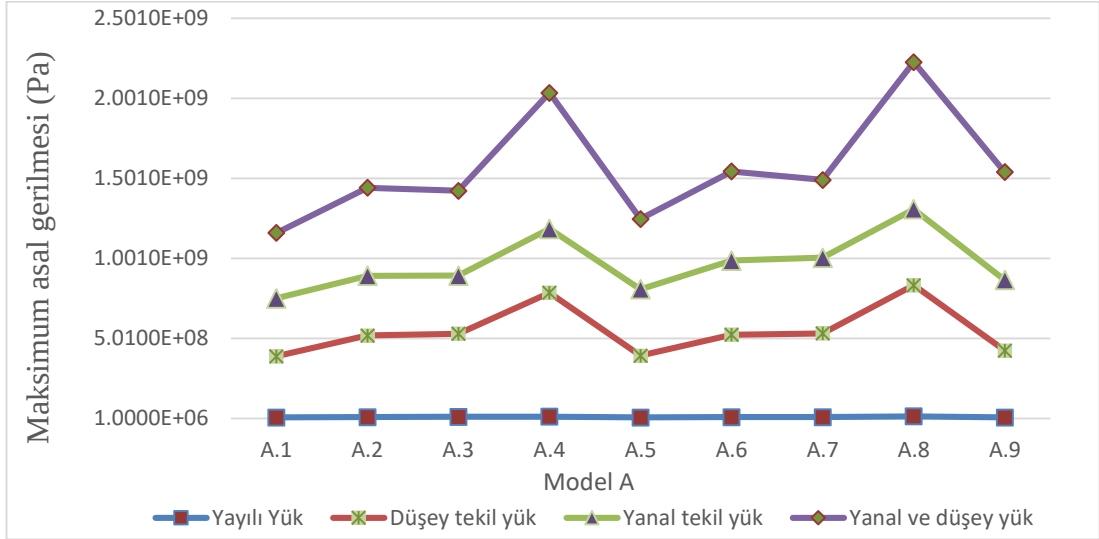
Tablo 11'in verilerine göre, yanall tekil yüklü petek çerçevellerin en büyük asal gerilme mutlak değlerleri sırasıyla Model B için B.9 ve A için A.8'de, en küçük asal gerilme mutlak değlerleri ise A.8 ve B.4'te oluşmaktadır.

Tablo 12. Düşey ve yanal tekil yük yükleme sonucunda oluşan en büyük maksimum,ortanca ve minimum asal gerilme değerleri (Pa) .

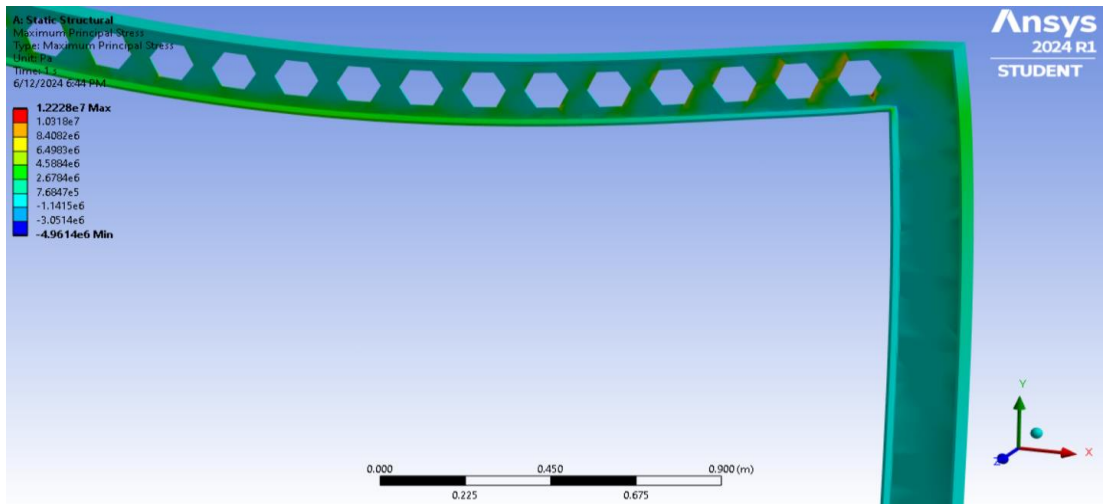
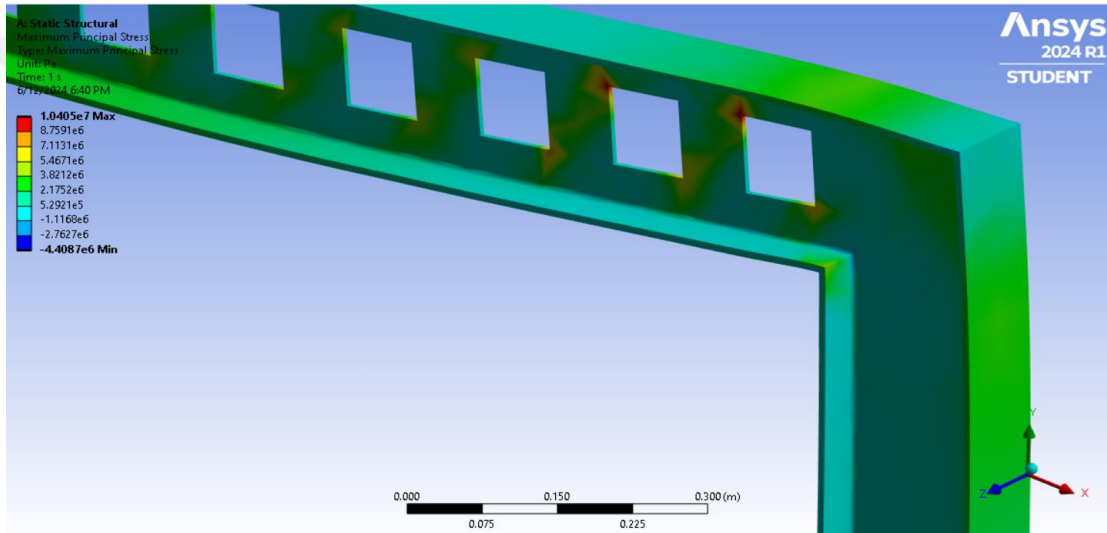
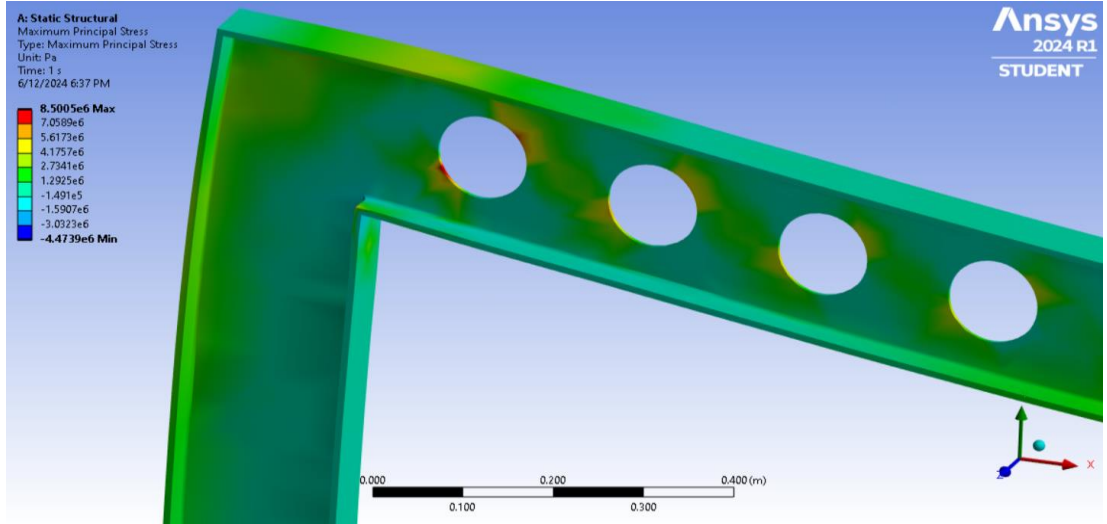
Model Numarası	σ_1 (Pa)	σ_2 (Pa)	σ_3 (Pa)
A.1	4.0824E+08	-6.1822E+08	-1.2101E+09
A.2	5.4917E+08	-4.9322E+08	-1.1474E+09
A.3	5.2983E+08	-5.4759E+08	-1.1499E+09
A.4	8.4938E+08	-5.3960E+08	-1.2151E+09
A.5	4.3822E+08	-5.2727E+08	-1.4626E+09
A.6	5.5651E+08	-5.0407E+08	-1.4626E+09
A.7	4.8599E+08	-5.0159E+08	-1.3816E+09
A.8	9.1834E+08	-5.0758E+08	-1.5202E+09
A.9	6.7387E+08	-6.6074E+08	-1.3275E+09
B.1	3.8475E+08	-4.4650E+08	-9.5733E+08
B.2	3.5911E+08	-4.5297E+08	-9.3799E+08
B.3	4.0719E+08	-4.4900E+08	-9.3782E+08
B.4	4.3143E+08	-5.0710E+08	-9.3628E+08
B.5	6.4893E+08	-4.8409E+08	-1.1455E+09
B.6	6.2941E+08	-4.8710E+08	-1.1177E+09
B.7	5.5965E+08	-4.6640E+08	-1.1054E+09
B.8	6.4023E+08	-4.6621E+08	-1.1127E+09
B.9	4.9319E+08	-6.5976E+08	-1.1820E+09
B.10	4.1512E+08	-4.4639E+08	-9.3817E+08

Tablo12.'den elde edilen verilere göre, düşey ve yanal tekil yüklü petek çerçevelerin en küçük asal gerilme mutlak değerleri sırasıyla B.2 ve A.1'de, en büyük asal gerilme mutlak değerleri ise A.8 ve B.9'da oluşmaktadır.

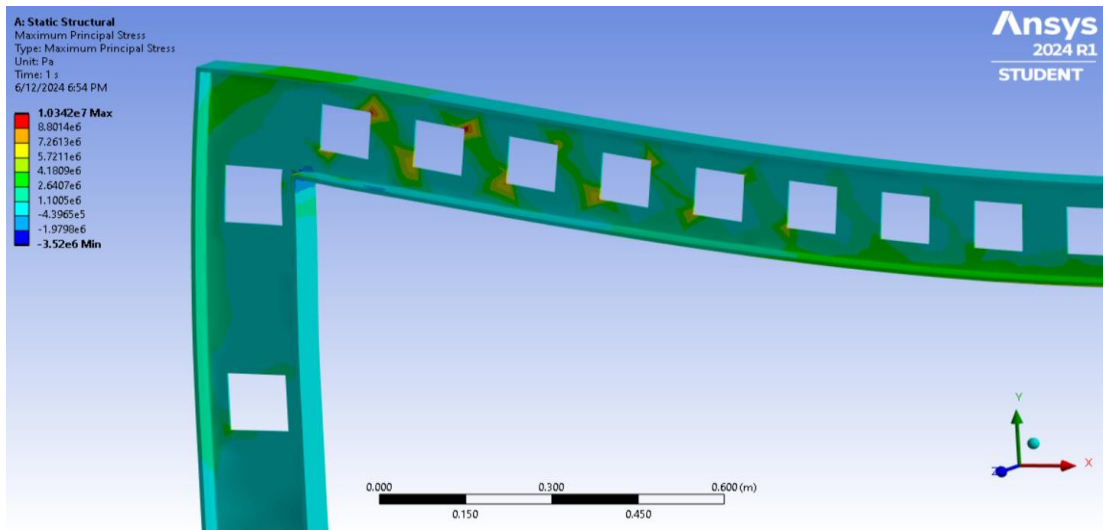
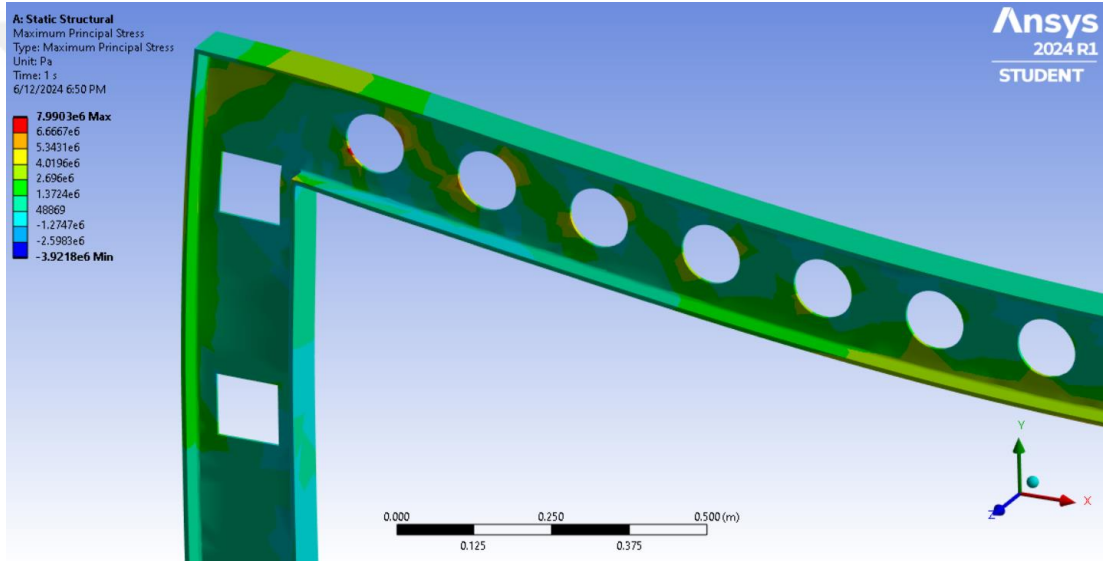
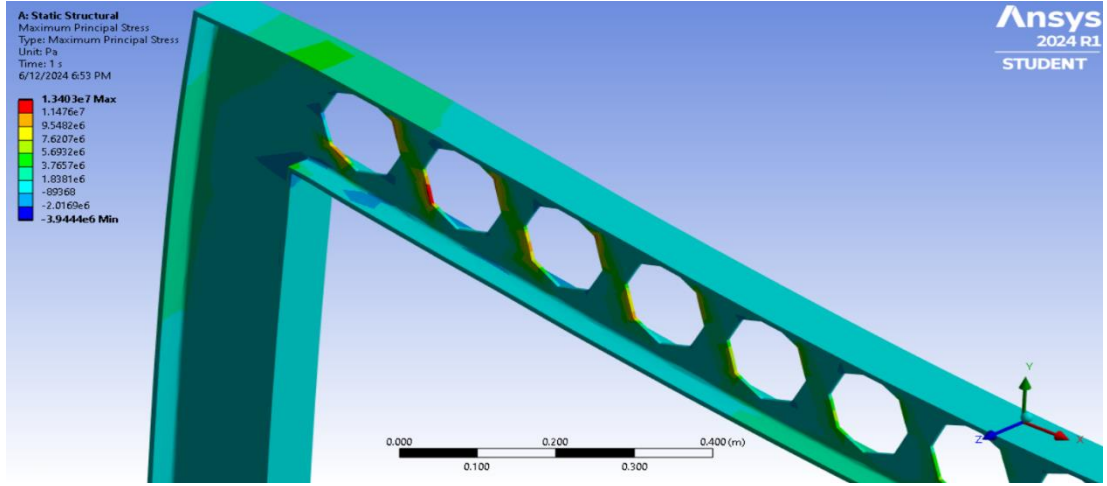
Yukarıdaki tablolara göre, çerçevenin boşluklu kolonunun, kirişinin gövde boşluk tipi ve yükleme durumu değiştikçe asal gerilmelerin değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir.



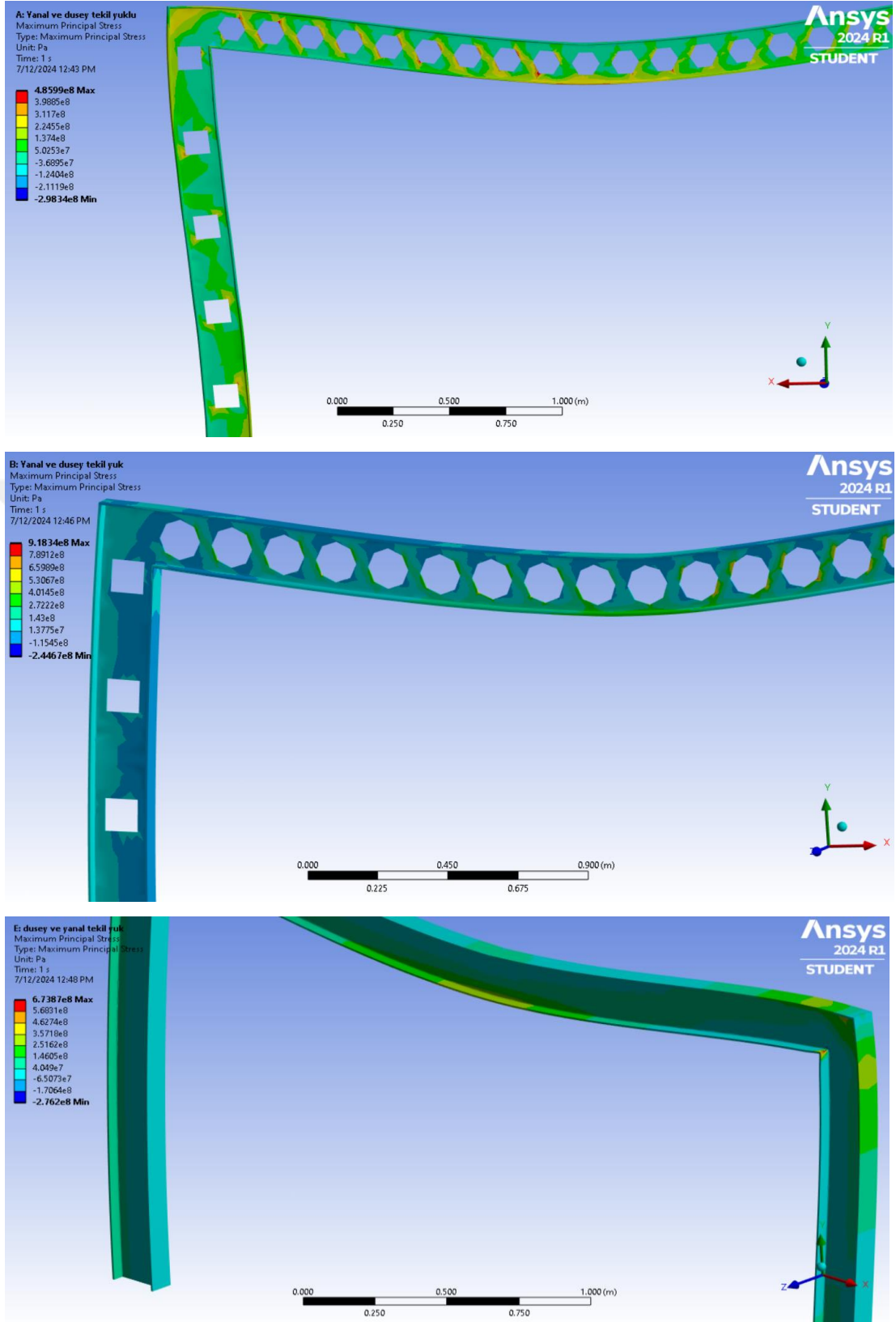
Şekil 32. Model A ve Model B'nin en büyük maksimum asal gerilme grafikleri.



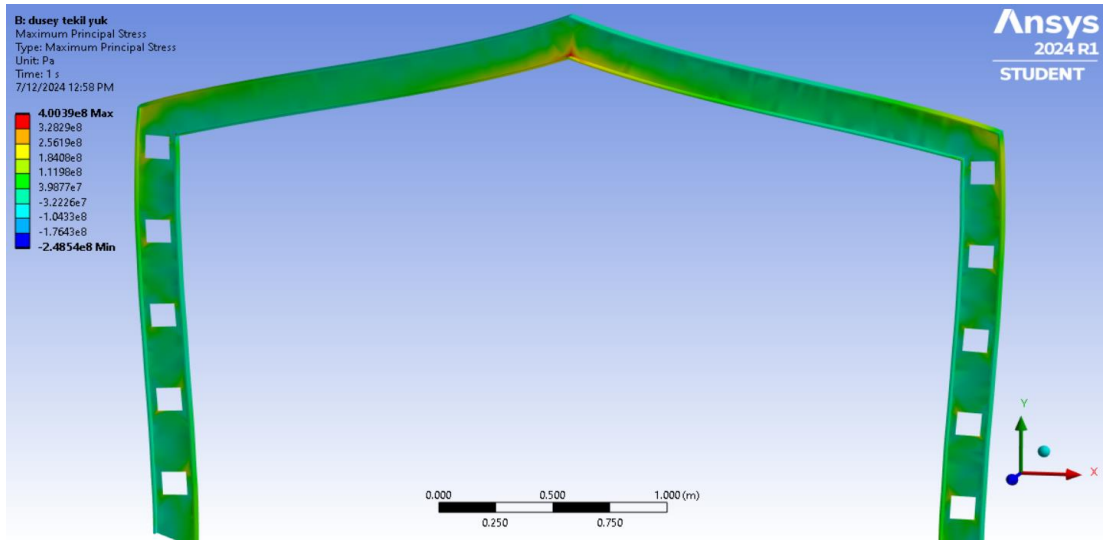
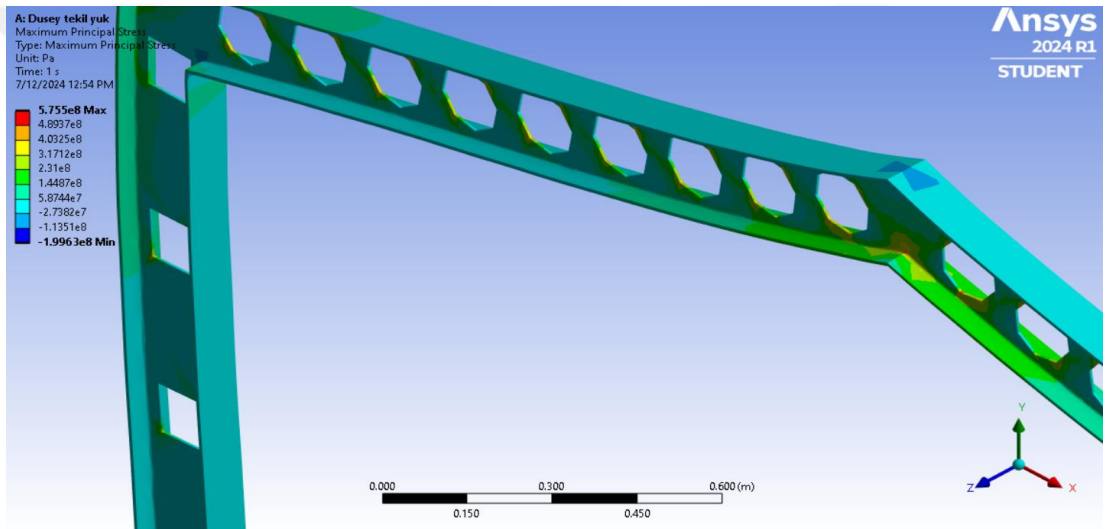
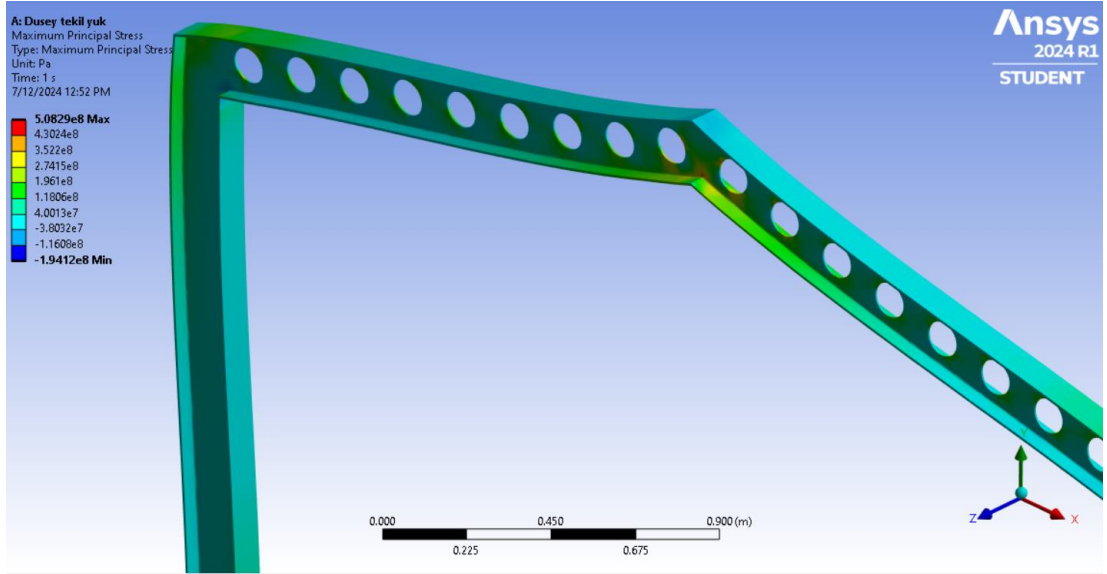
Şekil 33. Model A yayılı yük yükleme durumu için en büyük maksimum asal gerilmesi



Şekil 34. Model A yayılı yük yükleme durumu için oluşan en büyük maksimum asal gerilmesi



Şekil 35. Model A düşey ve yanl yük yükleme durumunda oluşan en büyük maksimum asal gerilmesi



Şekil 36. Model B'nin düşey tekil yük yükleme durumunda oluşan en büyük maksimum asal gerilmesi

3.1.2.2. Von-Mises gerilmesi

Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan ANSYS programının statik analizinden en büyük Von-Mises gerilme değerleri aşağıdaki Tablo (13-16)'da gösterilmiştir. Elde edilen değerler tüm yükleme durumları (yayılı, düşey ve tekil yük yükleme durumları) ve tüm modeller için sıralanmıştır.

Tablo 13. Yayılı yük yükleme sonucunda oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri (Pa)

Model Numarası	Von-Mises gerilmesi (Pa)
A.1	1.2427E+07
A.2	1.3144E+07
A.3	1.3411E+07
A.4	1.7462E+07
A.5	1.6286E+07
A.6	1.8243E+07
A.7	1.8101E+07
A.8	1.8070E+07
A.9	1.6363E+07
B.1	1.1825E+07
B.2	1.1019E+07
B.3	1.1153E+07
B.4	1.2074E+07
B.5	1.4220E+07
B.6	1.3594E+07
B.7	1.3480E+07
B.8	1.4196E+07
B.9	1.3897E+07
B.10	1.1710E+07

Tablo 13'ten elde edilen verilere göre, yayılı yüklü modellenen petek çerçevelerin en büyük Von-Mises gerilme değerleri sırasıyla Model A için A.6 ve Model B için B.5'te, en küçük değerleri ise B.2 ve A.1'de bulunmuştur. Dolayısıyla Von-mises gerilmenin değerleri incelendiğinde, Model B daha iyi sonuç vermiştir. Model A'nin dairesel tipi ve Model B'nin kare ve altıgen tipinde en küçük Von-Mises değerlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, çerçeve petek kirişlerin gövde boşluklarının Von-Mises gerilme değerlerine etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çerçevelerde boşluklu kolon kullanılması Von-Mises gerilme oluşumunu artırdığı tablodan tespit edilmiştir.

Tablo 14. Düşey tekil yük yükleme sonucu oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri (Pa)

Model Numarası	Von-Mises gerilmesi (Pa)
A.1	6.5937E+08
A.2	6.2521E+08
A.3	6.3681E+08
A.4	7.9030E+08
A.5	8.3693E+08
A.6	8.1663E+08
A.7	8.3313E+08
A.8	8.8550E+08
A.9	7.3950E+08
B.1	5.7245E+08
B.2	5.4431E+08
B.3	5.4987E+08
B.4	5.6077E+08
B.5	6.7311E+08
B.6	6.5838E+08
B.7	6.4056E+08
B.8	6.7914E+08
B.9	6.6181E+08
B.10	5.2495E+08

Tablo 14'ten elde edilen verilere göre, düşey tekil yüklü modellenen petek çerçevelerin en büyük Von-Mises gerilme değerleri sırasıyla A.8 ve B.8'de, en küçük değerleri ise B için B.10, B.2 ve A için A.2'de bulunmuştur. Ayrıca her iki model için, çerçeve gövde boşluklarının kare olduğunda Von-Mises gerilmesinin en az olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 15. Yanal tekil yük yükleme sonucu oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri (Pa)

Model Numarası	Von-Mises gerilmesi (Pa)
A.1	3.8239E+08
A.2	3.5266E+08
A.3	3.4828E+08
A.4	3.8457E+08
A.5	5.0774E+08
A.6	4.7369E+08
A.7	5.1358E+08
A.8	5.0153E+08
A.9	4.6983E+08
B.1	4.1646E+08
B.2	3.6446E+08
B.3	3.9515E+08
B.4	3.8134E+08
B.5	4.7757E+08
B.6	4.8427E+08
B.7	5.1504E+08
B.8	5.0612E+08
B.9	4.8790E+08
B.10	4.4725E+08

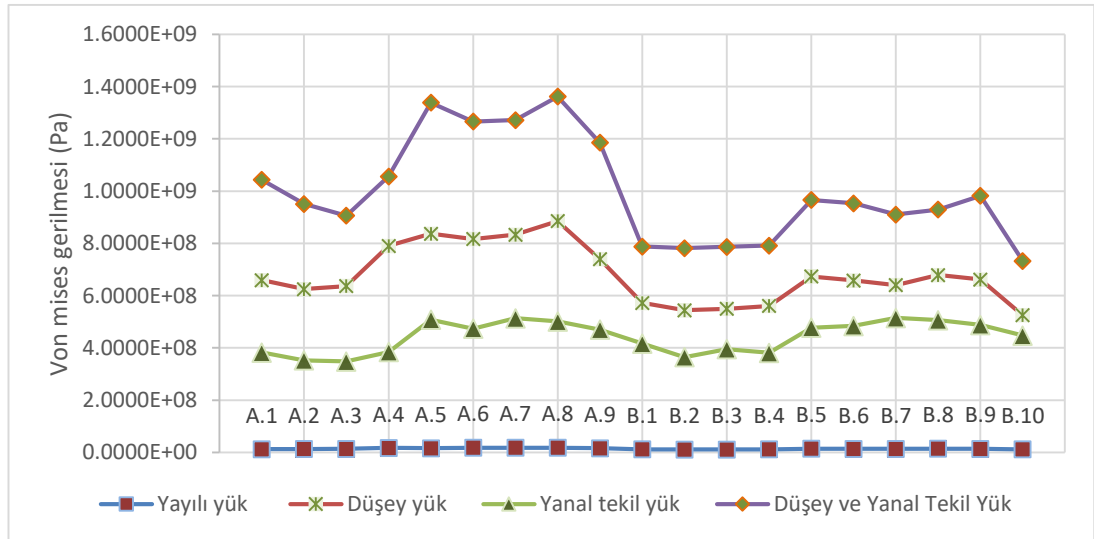
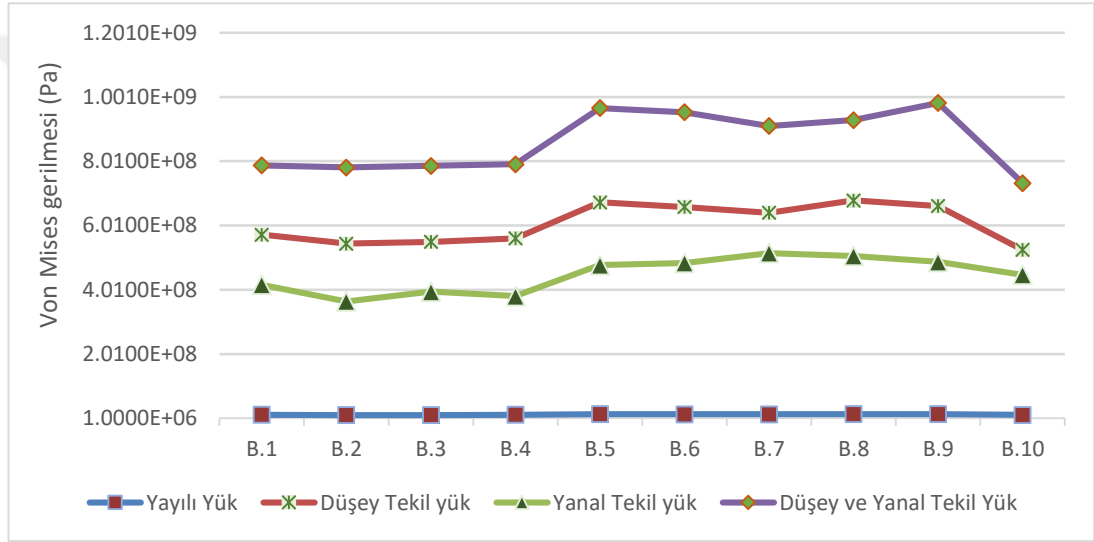
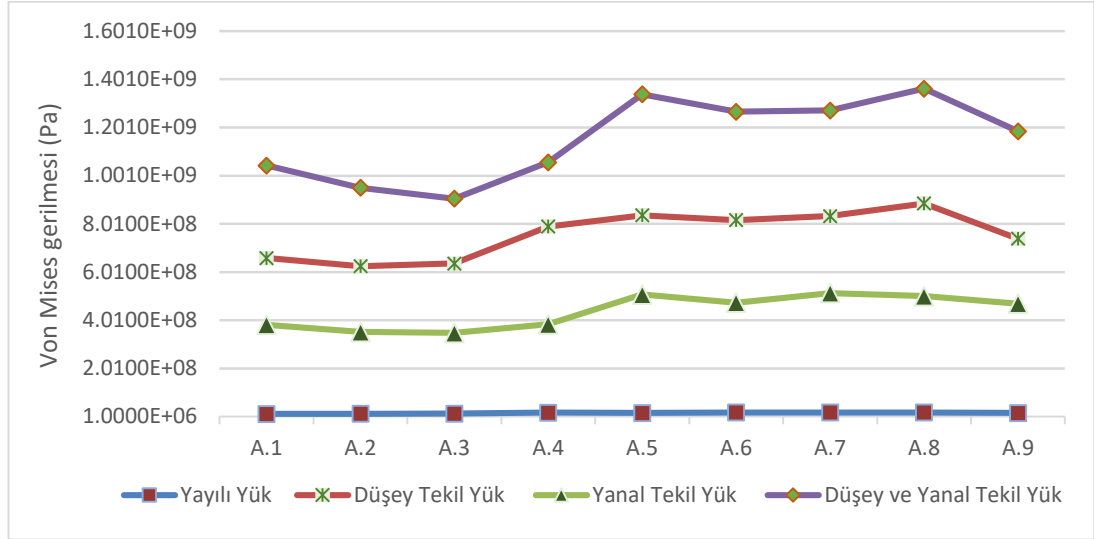
Tablo 15' in verilerine göre, Von-Mises gerilmesinin en büyük değeri, Model A'nın petek kolonlu ve altıgen gövde boşluklu kiriş durumunda, Model B'nin ise benzer şekilde petek kolonlu ve altıgen gövde boşluklu olan çerçeve modellerinde oluşmuştur. En küçük değeri ise, hem Model A hem de Model B'nin düz I profilli kolonlu ve kirişleri kare gövde boşluklu petek çerçevelerinde bulunmuştur.

Tablo 16. Düşey ve yanal tekil yük yükleme sonucunda oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri (Pa)

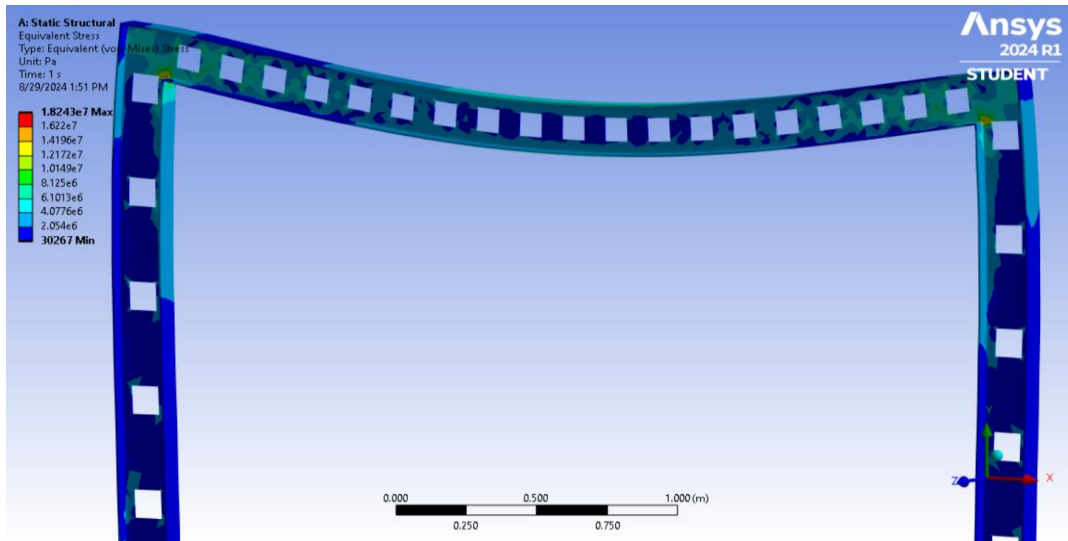
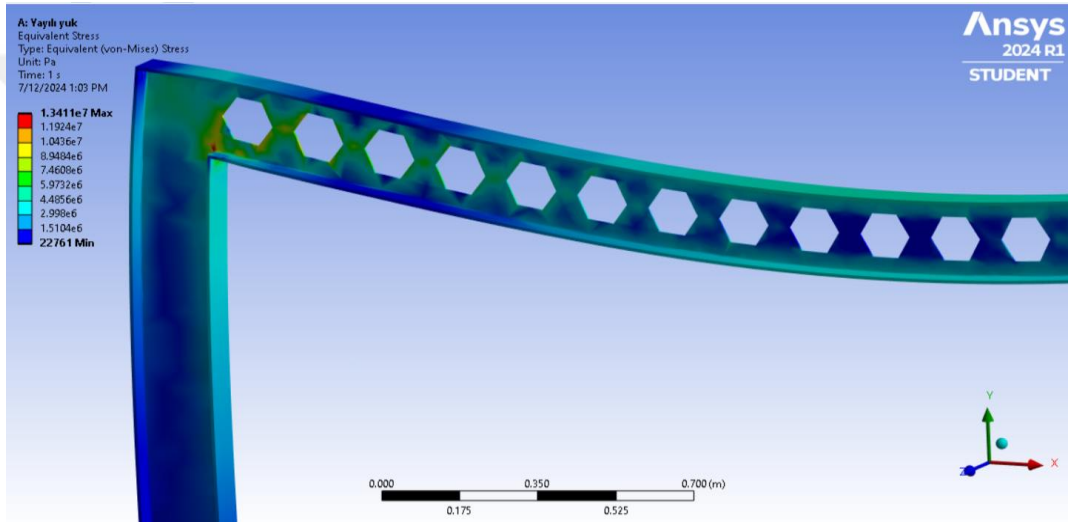
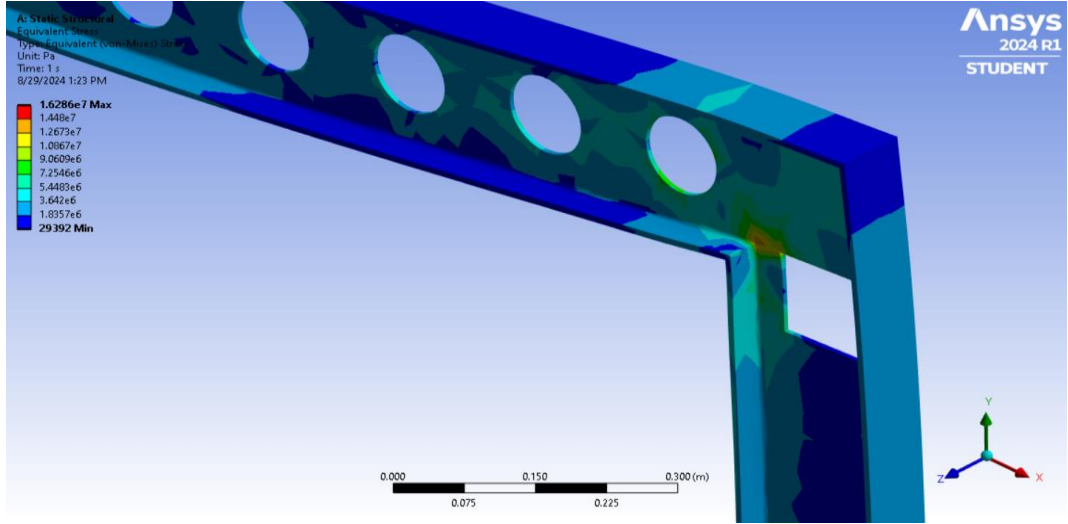
Model Numarası	Von-Mises gerilmesi (Pa)
A.1	1.0431E+09
A.2	9.5064E+08
A.3	9.0606E+08
A.4	1.0563E+09
A.5	1.3388E+09
A.6	1.2661E+09
A.7	1.2717E+09
A.8	1.3620E+09
A.9	1.1855E+09
B.1	7.8793E+08
B.2	7.8174E+08
B.3	7.8670E+08
B.4	7.9181E+08
B.5	9.6644E+08
B.6	9.5355E+08
B.7	9.1063E+08
B.8	9.2935E+08
B.9	9.8238E+08
B.10	7.3296E+08

Tablo 16'dan elde edilen verilere göre, düşey ve tekil yüklü modellenen petek çerçevelerin en büyük Von-Mises gerilme değerleri sırasıyla A.8,B.9 ve B.5'te,en küçük değerleri ise B.10,B.2 ve A.3'de bulunmuştur. Dolayısıyla, Von-mises gerilme değerleri incelendiğinde, çerçeve petek kirişlerin gövde boşluklarının ve çerçeve modelinin Von-Mises gerilme değerlerine etkisi olduğunu gözlemlenmiştir.

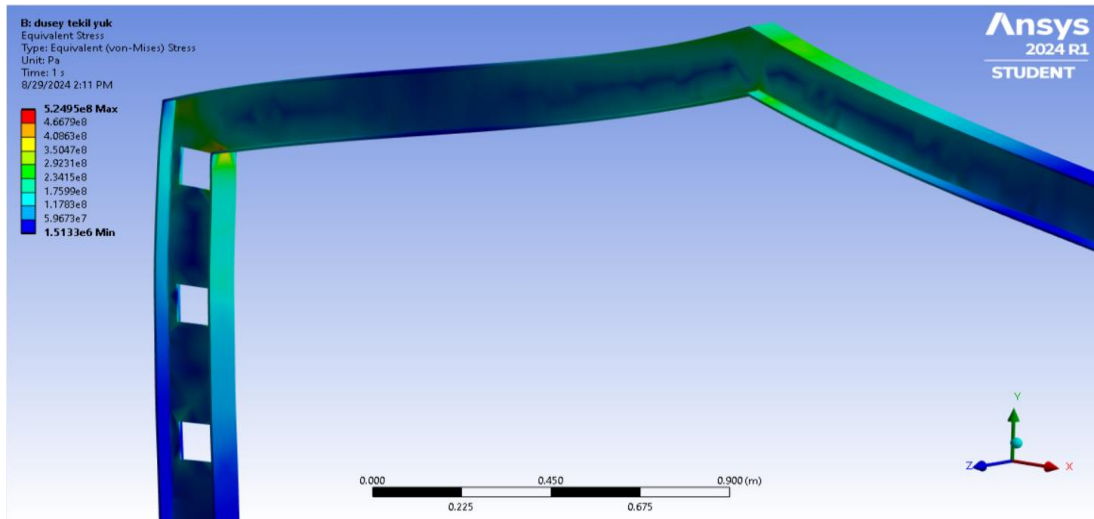
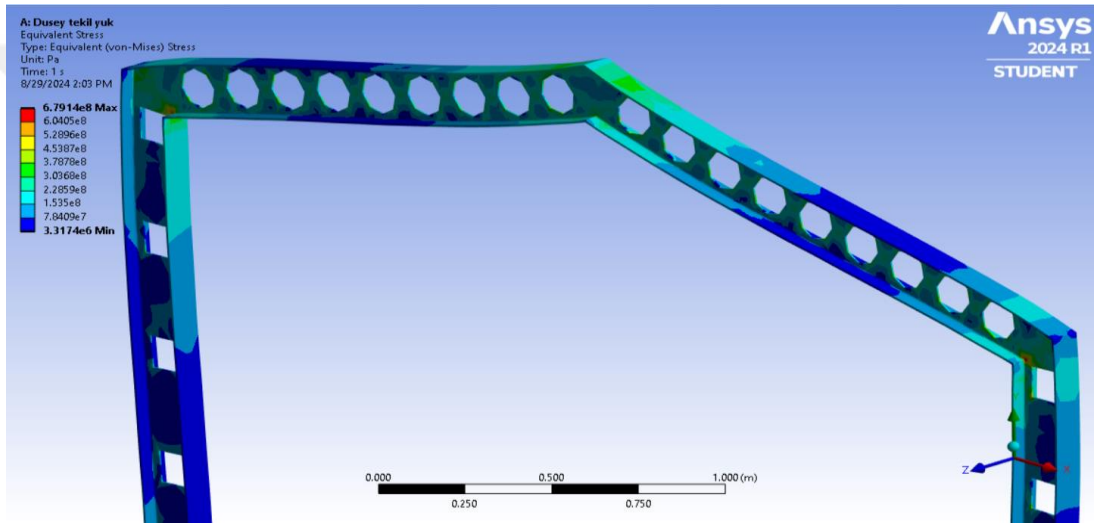
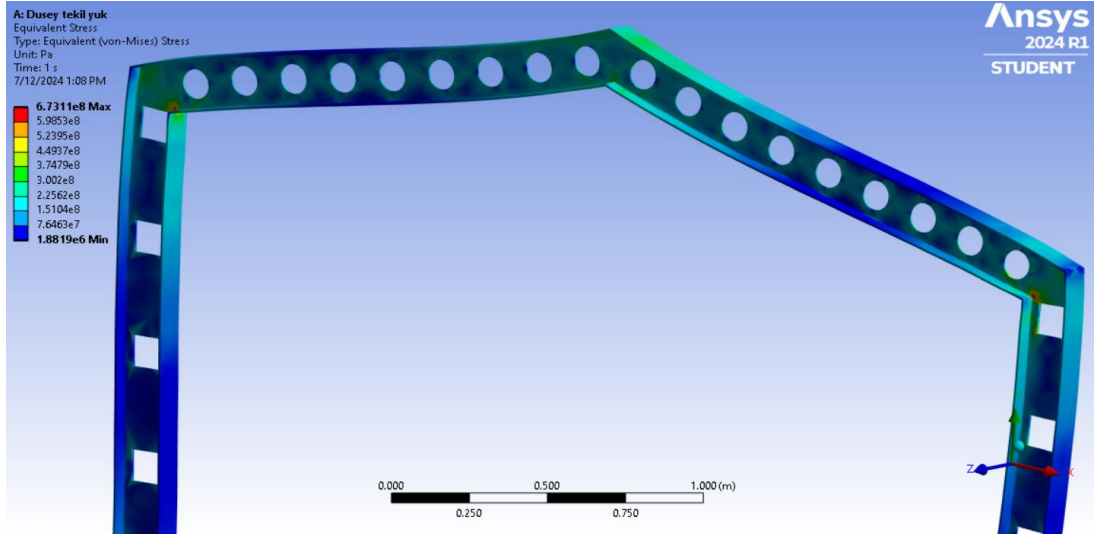
Modellerde oluşan en büyük Von-Mises gerilme değerleri, gövde boşlukların tipi ve farklı yükleme durumları etkisini daha iyi karşılaştırabilmek için aşağıdaki şekil 37.'de, sonuçların grafiği hazırlanmıştır.



Şekil 37. Statik analiz sonucundan modellerde oluşan en büyük Von-Mises gerilme grafikleri



Şekil 38. Yayılı yük yükleme durumunda Model A'nın Von-Mises gerilme değerleri - ANSYS 2024 Analizi



Şekil 39. Düşey tekil yük yükleme durumunda Model B'nin Von-Mises gerilme değerleri -ANSYS 2024 Analizi

3.1.2.3. Maksimum kayma gerilmesi

Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan statik analizinden en büyük maksimum kayma gerilme değerleri aşağıdaki Tablo (17- 20)'de gösterilmiştir. Elde edilen değerler tüm yükleme durumu (yayılı, düşey ve tekil yük yükleme durumları) ve tüm modeller için sıralanmıştır.

Tablo 17. Yayılı yük yükleme sonucunda oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri (Pa) .

Model Numarası	Maksimum kayma gerilmesi (Pa)
A.1	7.0653E+06
A.1*	6.6520E+06
A.2	7.1869E+06
A.3	7.1342E+06
A.4	9.1931E+06
A.5	8.6378E+06
A.6	9.1325E+06
A.7	9.4065E+06
A.8	9.3449E+06
A.9	9.0394E+06
B.1	6.5496E+06
B.2	6.1498E+06
B.3	6.2035E+06
B.4	6.4376E+06
B.5	7.6863E+06
B.6	7.3867E+06
B.7	7.2592E+06
B.8	7.6147E+06
B.9	7.8205E+06
B.10	6.5343E+06

Tablo 17.'den elde edilen verilere göre, yayılı yüklü yükleme durumunda petek çerçevelerin en büyük maksimum kayma gerilme değerleri sırasıyla Model A için A.7, Model B için B.9'da, en küçük değerleri ise B.2 ve A.1'de bulunmuştur. Dolayısıyla maksimum kayma gerilmenin değerleri incelendiğinde, Model B daha iyi sonuç vermiştir. Model A'nın dairesel boşluklu kirişin tipinde ve Model B'nin kare tipinde en küçük maksimum kayma gerilme değerlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, çerçeve petek kirişlerin gövde boşluklarının maksimum kayma gerilme değerlerine etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çerçevelerde petek kolon kullanılması diğer gerilmelerde olduğu gibi maksimum kayma gerilme oluşumunu artırdığı da bulunmuştur.

Şekil (41- 42)'de gösterildiği gibi maksimum kayma gerilmesi en çok kolon-kiriş birleşim bölgesinde oluşmaktadır. Tablo.17'de ek olarak Model A.1*'ın kirişin sağ ve sol kenarındaki bulunan boşlukları kolondan 40 cm fazla uzaklaştırarak tasarlanmıştır. Model A.1*'ın Model A.1'e göre elde edilen en büyük maksimum kayma gerilmesi %5.94 azaldığını analiz sonuçlarından tespit edilmiştir.

Tablo 18. Düşey tekil yük yükleme sonucunda oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri (Pa) .

Model Numarası	Maksimum kayma gerilmesi (Pa)
A.1	3.7690E+08
A.2	3.4131E+08
A.3	3.4150E+08
A.4	4.0340E+08
A.5	4.4081E+08
A.6	4.1374E+08
A.7	4.2522E+08
A.8	4.5553E+08
A.9	3.9363E+08
B.1	3.1634E+08
B.2	3.0253E+08
B.3	3.0447E+08
B.4	3.1208E+08
B.5	3.6440E+08
B.6	3.5709E+08
B.7	3.4608E+08
B.8	3.6515E+08
B.9	3.7809E+08
B.10	2.9744E+08

Tablo 18'den elde edilen verilere göre, düşey tekil yük yükleme durumunda modellenen petek çerçevelerin en büyük maksimum kayma gerilme değerleri sırasıyla A için A.8, B için B.9 ve B.8'de, en küçük değerleri ise B.10, B.2 ve A.2'de bulunmuş. Ayrıca her iki model için, çerçeve gövde boşluklarının kare olduğunda maksimum kayma gerilmesinin en az olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 19. Yanal tekil yük yükleme sonucu oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri (Pa) .

Model Numarası	Maksimum kayma gerilmesi (Pa)
A.1	2.1657E+08
A.2	1.9442E+08
A.3	1.8972E+08
A.4	2.1578E+08
A.5	2.5674E+08
A.6	2.4468E+08
A.7	2.5884E+08
A.8	2.6478E+08
A.9	2.4044E+08
B.1	2.2856E+08
B.2	2.0583E+08
B.3	2.1884E+08
B.4	2.1218E+08
B.5	2.5575E+08
B.6	2.5638E+08
B.7	2.7789E+08
B.8	2.7153E+08
B.9	2.7835E+08
B.10	2.3637E+08

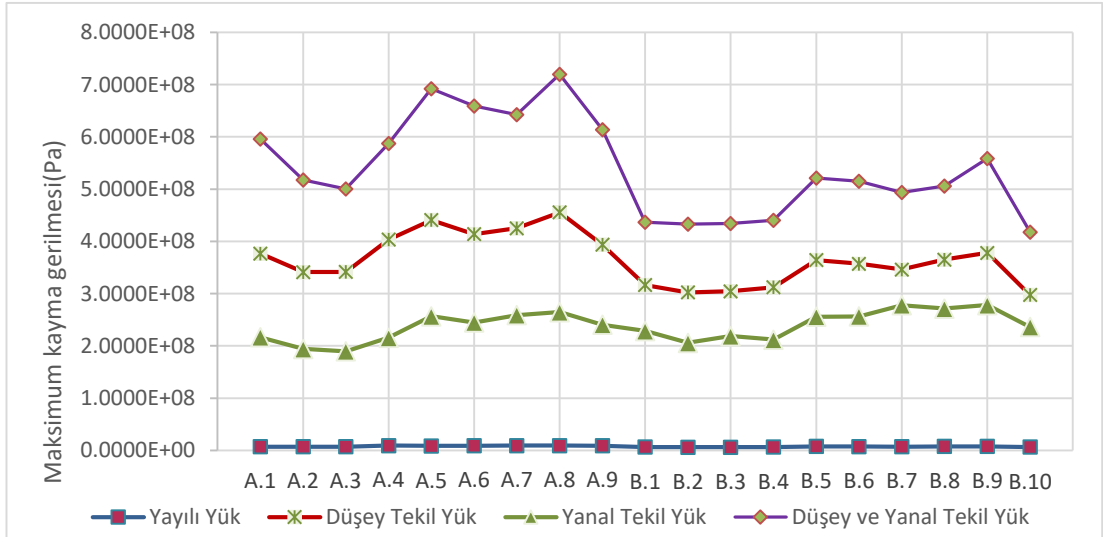
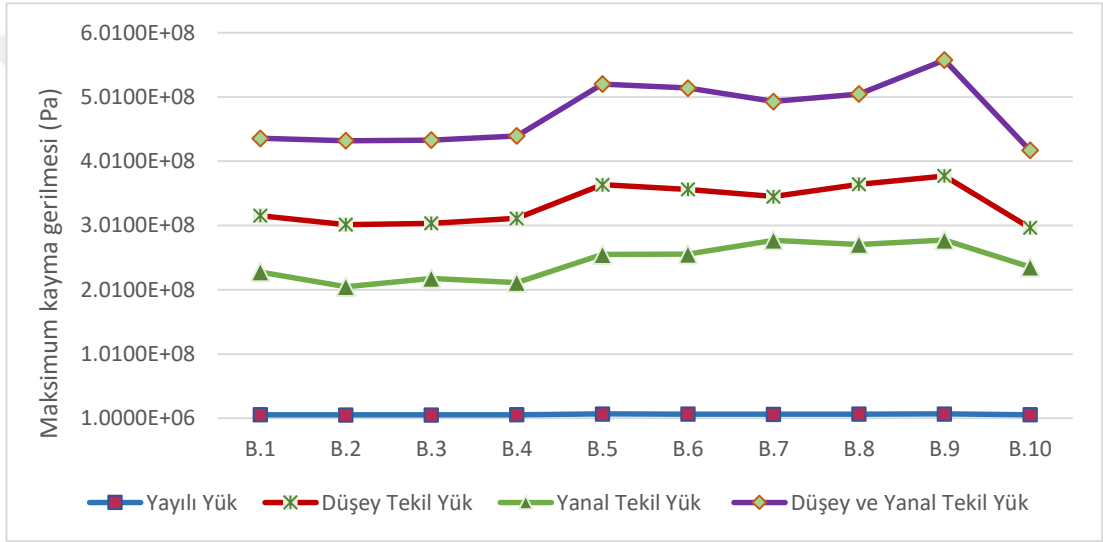
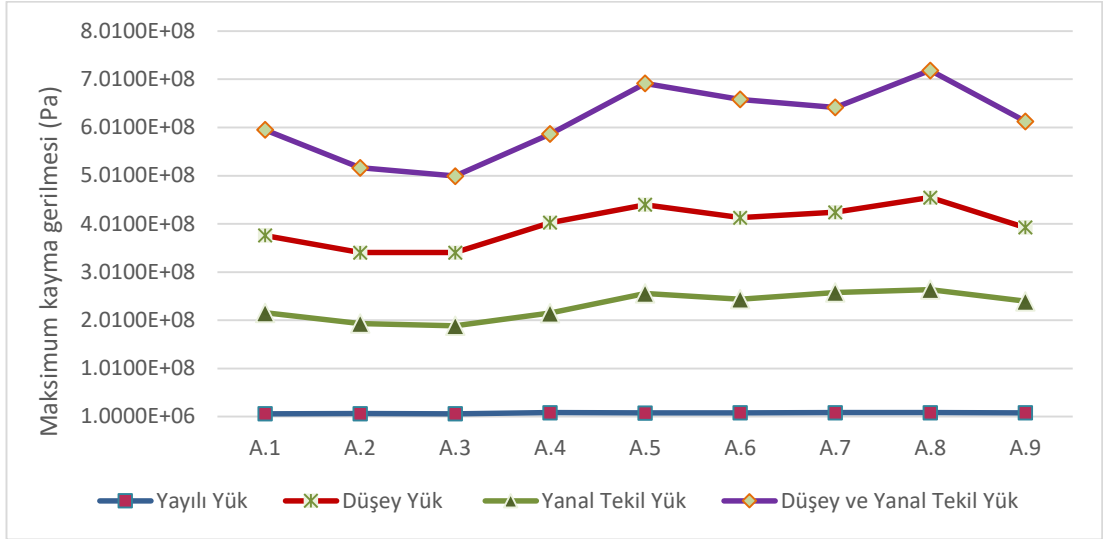
Tablo 19.'un verilerine göre, maksimum kayma gerilmesinin en büyük değeri Model A'nın petek kolonlu ve kirişi sekizgen gövde boşluklu, Model B'nin petek kolonlu ve kirişi altıgen gövde boşluklu olan çerçeve modellerinde oluşmaktadır. En küçük değeri ise Model A ve B'nin boşluksuz kolonlu ve kirişleri altıgen ve kare gövde boşluklu petek çerçevelerinde bulunmuştur.

Tablo 20. Düşey ve yanal tekil yük yükleme sonucu oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri (Pa) .

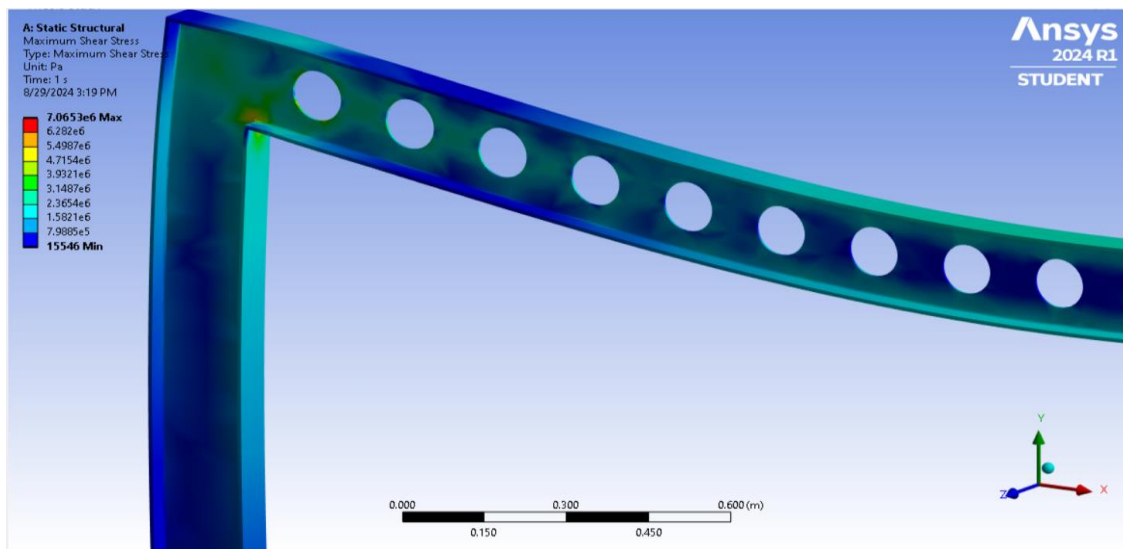
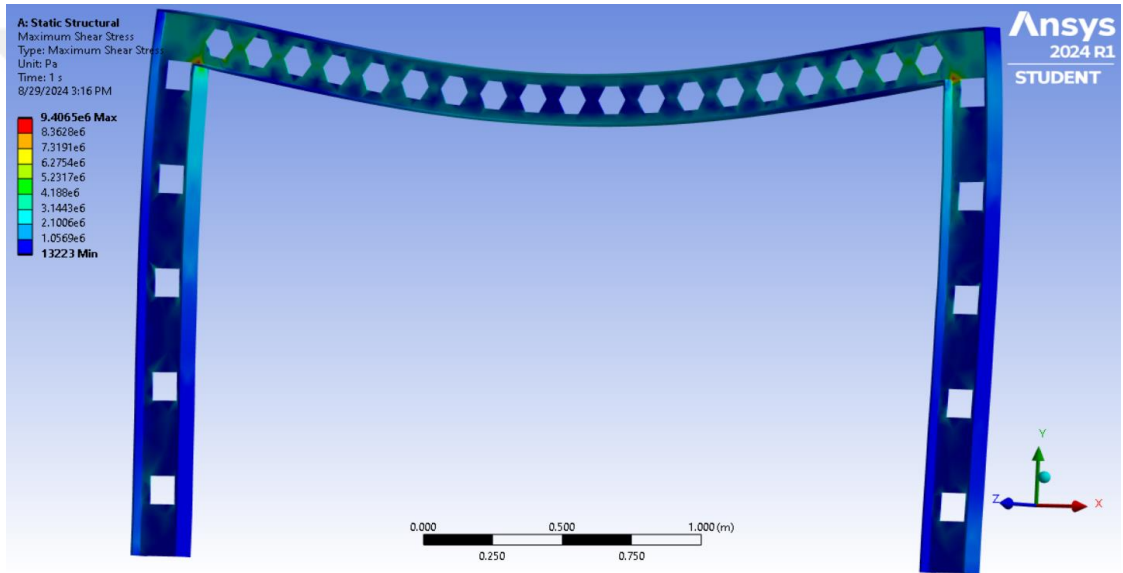
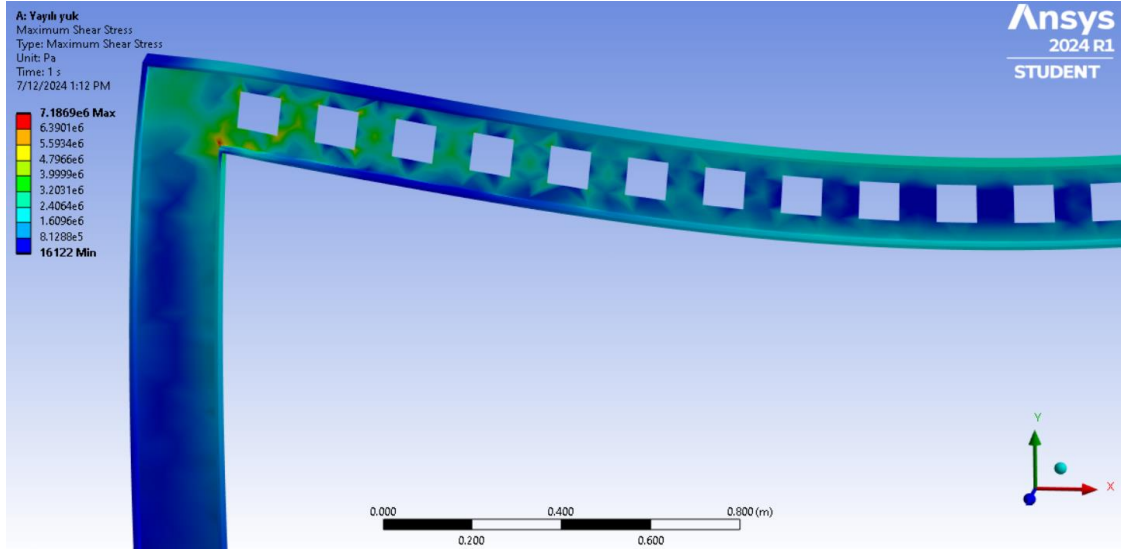
Model Numarası	Maksimum kayma gerilmesi (Pa)
A.1	5.9616E+08
A.2	5.1760E+08
A.3	5.0035E+08
A.4	5.8760E+08
A.5	6.9242E+08
A.6	6.5922E+08
A.7	6.4278E+08
A.8	7.1949E+08
A.9	6.1366E+08
B.1	4.3667E+08
B.2	4.3296E+08
B.3	4.3404E+08
B.4	4.4029E+08
B.5	5.2111E+08
B.6	5.1484E+08
B.7	4.9385E+08
B.8	5.0569E+08
B.9	5.5844E+08
B.10	4.1793E+08

Tablo 20’den elde edilen verilere göre, düşey ve tekil yüklü modellenen petek çerçevelerin en büyük maksimum kayma gerilme değerleri sırasıyla A için A.8,B için B.9 ve B.5’te,en küçük değerleri ise B.10,B.2 ve A.3’te bulunmuştur. Dolayısıyla, maksimum kayma gerilme değerleri incelendiğinde, çerçeve petek kirişlerin gövde boşluklarının ve çerçeve modelinin maksimum kayma gerilme değerlerine etkisi olduğunu gözlemlenmiştir.

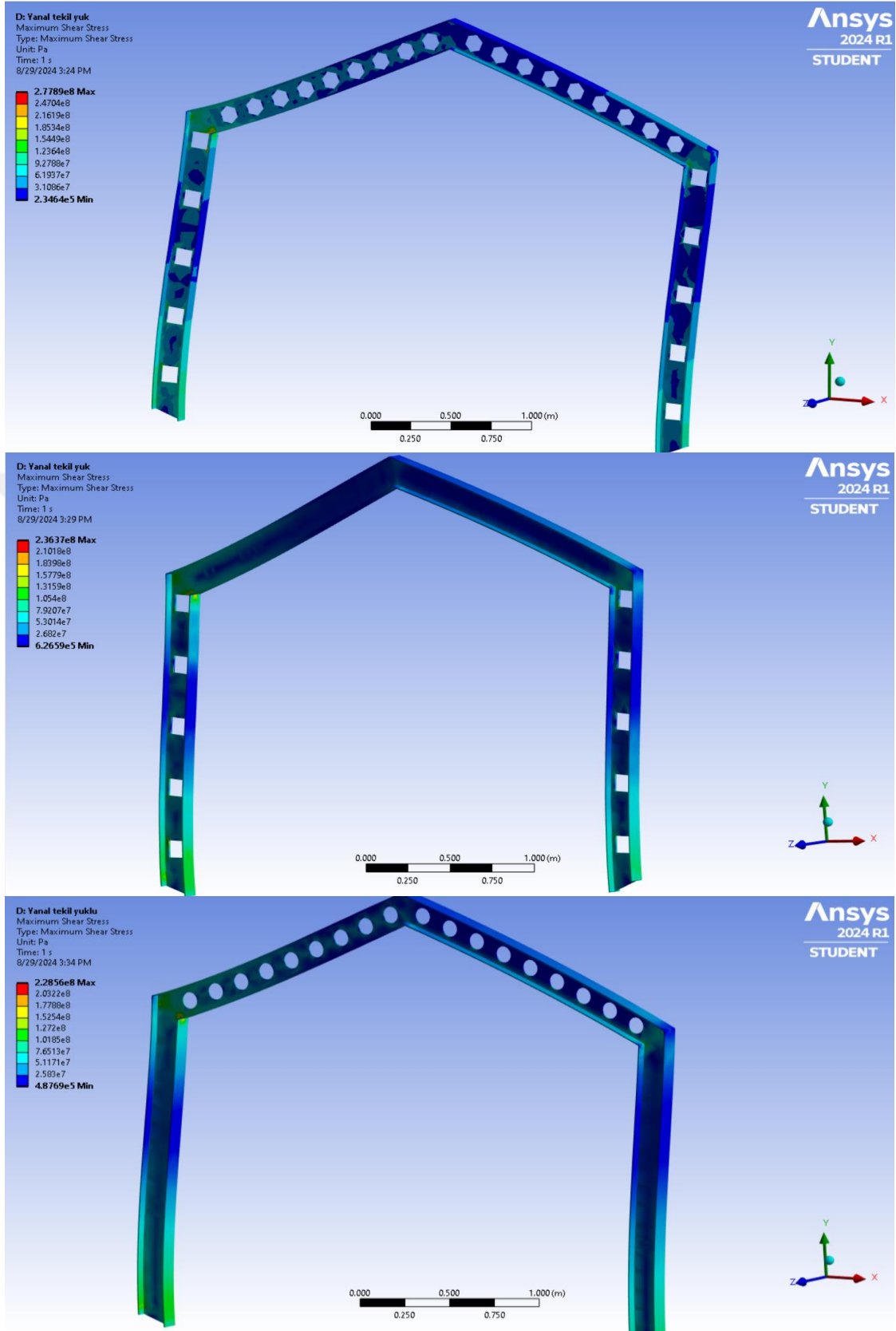
Modellerde oluşan en büyük maksimum kayma gerilme değerleri, gövde boşlukların tipi ve farklı yükleme durumları etkisini daha iyi karşılaştırabilmek için aşağıdaki şekil 40.’da sonuçların grafiği hazırlanmıştır.



Şekil 40. Statik analizinden modellerde oluşan en büyük maksimum kayma gerilme grafikleri



Şekil 41. Yayılı yük yükleme durumunda maksimum kayma gerilme değerleri - ANSYS 2024 Analizi



Şekil 42. Yanal Tekil yük yükleme durumunda maksimum kayma gerilme değerleri - ANSYS 2024 Analizi

3.1.2.4. Analiz sonuçların doğrulaması

Bu bölümde I profil Model A'nın çerçeve sistemi aynı boyutları ve 3 farklı yükleme durumları uygulayarak SAP2000 programında statik analizi gerçekleştirmiştir.

Amacı, ANSYS programından elde edilen sonuçlarını doğrulaması sağlamaktadır.

Tablo 21. Model A9 için elde edilen SAP2000 ve ANSYS programın analiz sonuçları

Model A9	ANSYS	SAP2000
Durum I	2.4436E-4	2.21E-4
Durum II	1.4169E-2	1.109E-2
Durum IV	1.4561E-2	1.113E-2

Tablo 21'in yorumlanması: tablodaki sonuçlar genel olarak tutarlılık göstermektedir. SAP2000, ince çubuk teorisine dayalı bir modelleme yaklaşımını benimserken, ANSYS ise üç boyutlu elastisite teorisine göre analiz yapmaktadır. Bu farklılık, ANSYS'ten elde edilen sonuçların daha büyük ve gerçeğe daha yakın olmasına neden olmaktadır.

3.2. Dinamik Analizi

3.2.1. Serbest titreşim analizi

Bu çalışma kapsamında modellenen çerçevelerin serbest titreşim durumunu incelemek amacıyla, ANSYS 2024 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz gerçekleştirilmiştir. Çerçeve modeli, kolon ve kirişin boşluk durumlarına göre sistemin serbest titreşim davranışı üzerinde çalışılmıştır.

Serbest titreşimin analizi, yapı üzerinde dış yük etkisi olmadan belirli bir zaman periyodu içinde doğal titreşim frekansların oluşumunu inceler. Bir yapının rezonans kontrolünün sağlanabilmesi için serbest titreşim analizi büyük önem taşımaktadır.

Serbest titreşim, bir yapının her hangi bir dış yük uygulamaksızın bir darbeye veya yer değiştirmeye karşı doğal tepkiyi ifade eder. Bu tepkilerin yapısal özelliklere bağlı olarak belirlendiği için, bu tezde statik analizde olduğu gibi modellenen iki farklı çerçeve için serbest titreşim analizi yapılmıştır. Her Modelin kolonları sadece kare boşluklu ve ankastre uçlu, kirişi ise dairesel, kare, altıgen ve sekizgen olmak üzere dört farklı gövde boşluk şekli ele alınmıştır.

Toplam 19 farklı modelin serbest titreşim analizi bu çalışmada incelenmiştir. Her çerçeve modeli için 10 adet farklı modun analizini gerçekleştirilmiştir. ANSYS programının verdiği sonuçlar doğrultusunda, frekans değerleri ve çerçevelerin serbest titreşim şekilleri bu çalışmada sunulmuştur.

3.2.1.1. Serbest titreşim frekansları

Serbest titreşimde birim zamandaki titreşim sayısı “doğal frekans” olarak adlandırılır ve Hertz (Hz) cinsinde ölçülür. Her bir titreşim için geçen süre ise “Periyot” olarak tanımlanır. Frekansın tersinin alınmasıyla ($1/\text{Frekans} = \text{periyot}$) periyot değeri elde edilir ve bu değer saniye cinsinden ölçülür.

Frekans değerleri, ANSYS programı yardımıyla her model için 10 adet olarak elde edilmiştir. Periyot değerleri ise hesaplanarak sonuçlara eklenmiştir.

Tablo (22 – 23)’te, tüm çerçeve modellerin modları için frekansları listelenmiştir.

Tablo 22.Model A'nın serbest titreşim frekansları (Hz)

Mod No	Frekans (Hz)				
	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5
Mod 1	5.45	6.52	6.61	6.10	5.43
Mod 2	8.61	10.05	10.15	9.35	8.61
Mod 3	19.68	23.90	24.10	22.29	19.71
Mod 4	30.88	31.64	31.91	32.45	30.34
Mod 5	38.13	38.73	38.98	39.19	36.82
Mod 6	48.30	58.41	58.98	54.29	48.51
Mod 7	63.34	74.21	74.53	67.98	64.05
Mod 8	66.38	76.44	77.02	71.95	65.61
Mod 9	75.04	76.89	77.55	76.05	73.19
Mod 10	79.06	90.03	90.04	84.43	79.37
	A.6	A.7	A.8	A.9	
Mod 1	6.53	6.62	6.10	5.78	
Mod 2	10.17	10.26	9.40	9.06	
Mod 3	24.13	24.32	22.26	21.51	
Mod 4	33.46	33.70	31.45	30.35	
Mod 5	37.25	37.45	37.80	37.25	
Mod 6	58.89	59.40	54.54	52.60	
Mod 7	74.94	73.81	68.96	67.91	
Mod 8	75.02	75.67	69.80	69.57	
Mod 9	75.42	75.80	74.36	76.79	
Mod 10	86.37	87.08	83.14	79.13	

Tablo 22'nin değerleri incelendiğinde, model A çerçevesinin kolon ve kiriş boşluk tipine göre serbest titreşim frekans sonuçlarına etkisinin olduğu görülmektedir. Model A'nın petek kolon ve altıgen gövde boşluklu kirişten oluşan çerçevesinde, en yüksek frekans değerleri birinci modda ve ikinci, üçüncü, dördüncü ve altıncı modlarda elde edilmiştir. Serbest titreşim frekansın birinci modu ile ikinci, dördüncü, beşinci, sekizinci ve dokuzuncu modlarında en düşük değerler, model A'nın petek kolonlu ve dairesel gövde boşluklu çerçevesinde meydana gelmiştir. Üçüncü, altıncı, yedinci ve onuncu modlarda ise en düşük değerler, boşluksuz kolonlu ve dairesel gövde boşluklu model A çerçevesinde bulunmuştur. Çerçevenin boşluksuz kolonlu ve altıgen gövde boşluklu durumunda, sekizinci, dokuzuncu ve onuncu modlarda en yüksek frekans değerleri elde edilmiştir. Beşinci modun en yüksek frekans değerleri ise boşluksuz kolon ve sekizgen gövde boşluklu çerçevede

oluşturmuştur. Ayrıca, petek kolon ve kare gövde boşluklu çerçeve tipinde yedinci modun en yüksek frekansı değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

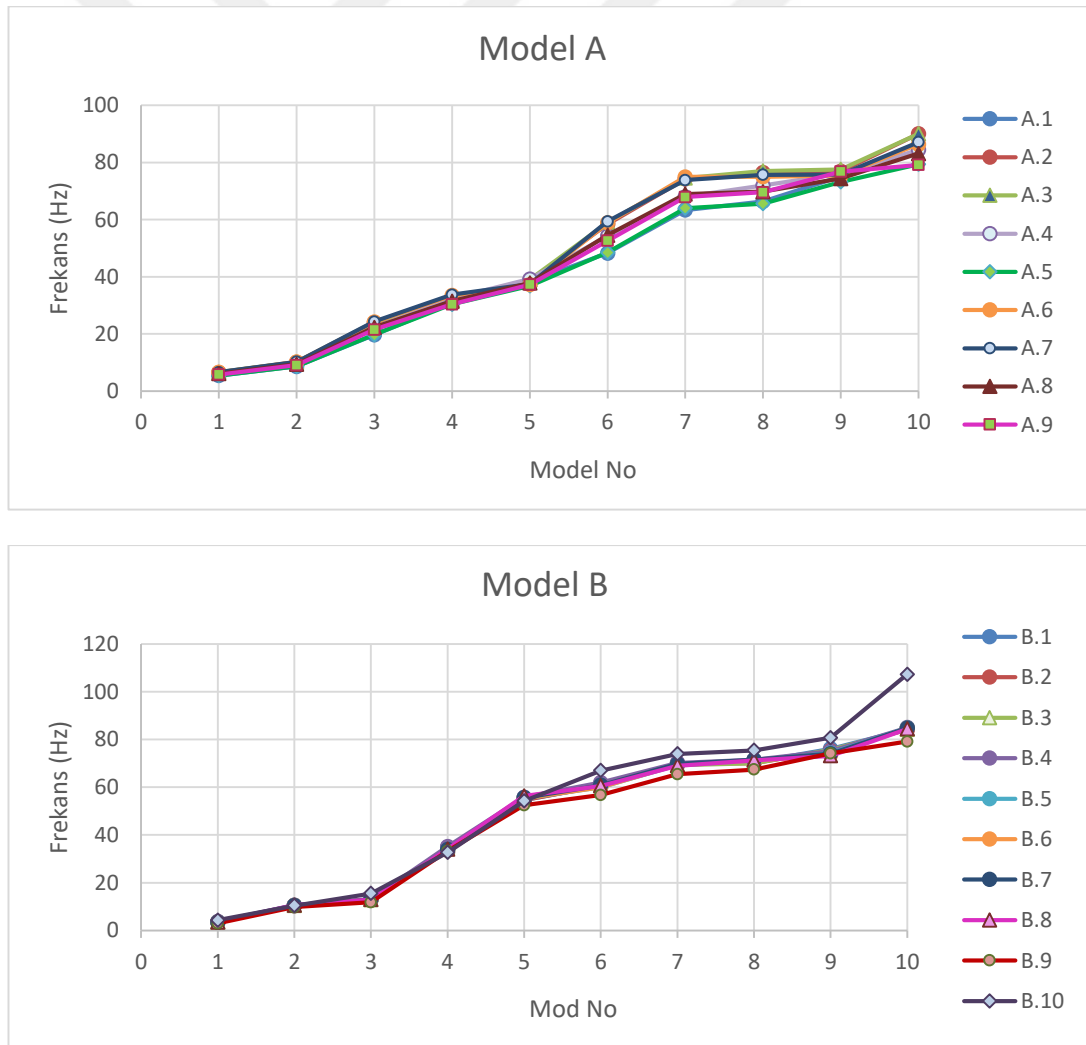
Tablo 23.Model B'nin serbest titreşim frekansları (Hz)

Mod No	Frekans (Hz)				
	B.1	B.2	B.3	B.4	B.5
Mod 1	3.58	3.46	3.56	3.76	3.45
Mod 2	10.32	10.24	10.36	10.56	10.45
Mod 3	12.89	12.62	12.78	13.17	12.94
Mod 4	34.63	34.60	34.81	35.13	33.62
Mod 5	54.56	54.56	55.06	55.75	55.20
Mod 6	60.60	60.50	60.99	61.96	59.95
Mod 7	69.73	69.89	69.26	70.16	69.24
Mod 8	70.44	70.03	69.96	71.48	71.06
Mod 9	76.08	75.34	75.68	75.04	74.25
Mod 10	84.24	84.06	84.14	84.95	84.74
	B.6	B.7	B.8	B.9	B.10
Mod 1	3.43	3.51	3.47	2.95	4.27
Mod 2	10.39	10.43	10.58	9.76	10.35
Mod 3	12.83	12.94	12.93	11.81	15.51
Mod 4	33.50	33.83	34.08	33.25	32.66
Mod 5	55.24	55.57	56.28	52.41	54.22
Mod 6	60.00	60.81	60.52	56.68	66.96
Mod 7	69.34	69.71	68.95	65.42	73.93
Mod 8	71.11	71.44	71.25	67.33	75.38
Mod 9	73.42	74.00	73.12	74.16	80.71
Mod 10	84.56	84.74	84.42	79.07	107.28

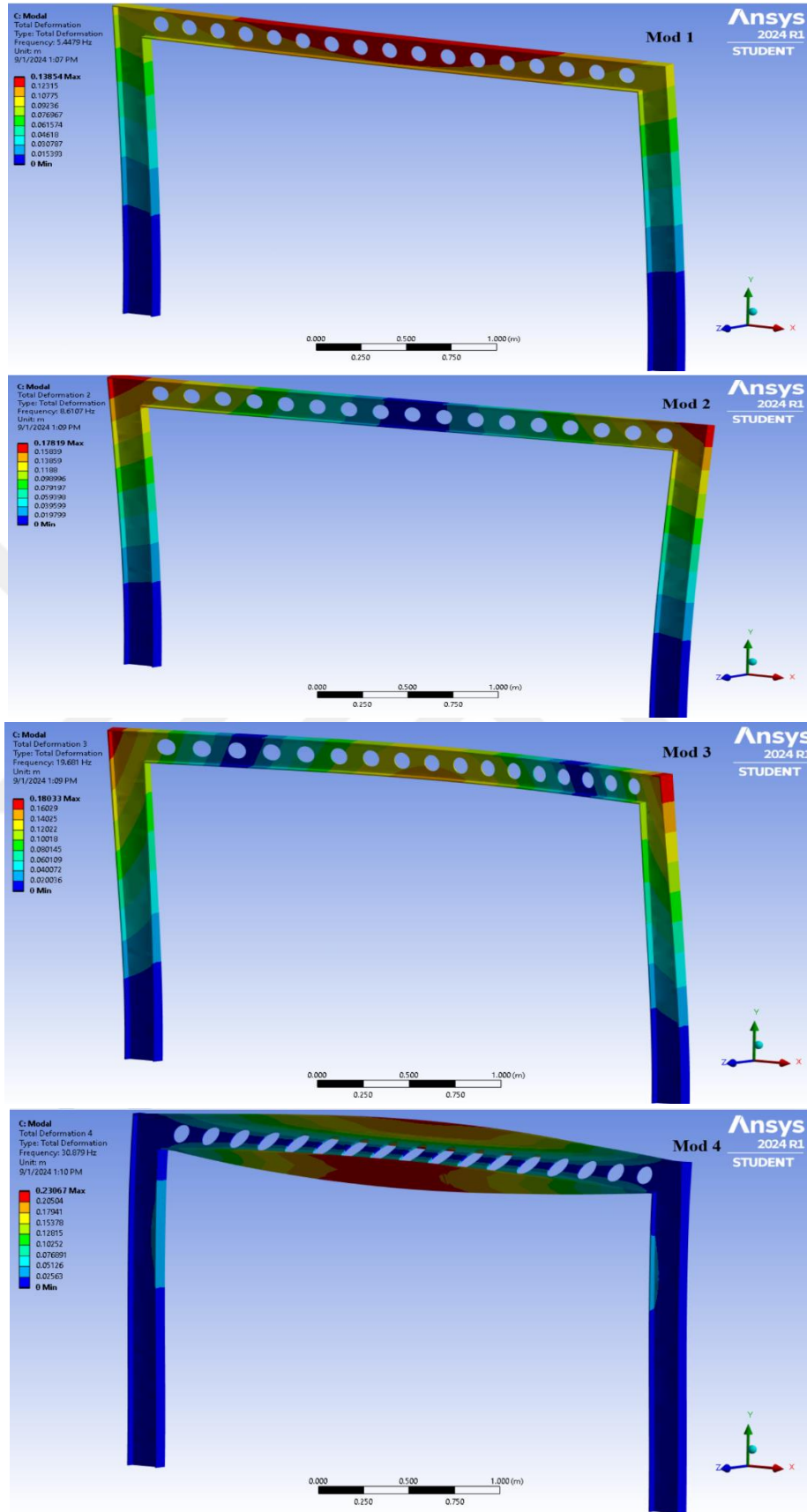
Tablo 23 , Model B çerçevesinin farklı boşluk tipleri ile serbest titreşim sonuçlarını göstermektedir. Model B'nin boşluksuz kirişli ve boşluklu kolon çerçeve tipinde, birince, üçüncü, altıncı, yedinci, sekizinci, dokuzuncu ve onuncu modlarda diğer çerçeve tiplerine göre en yüksek frekans değerine ulaşmıştır. Ayrıca, petek kirişi kullanan çerçeve tiplerinde sekizgen gövde boşluklu tipi aynı modlarda ikinci sırada yer almışken, dördüncü modda en yüksek serbest titreşim frekanslı tip olarak belirlenmiştir. Boşluklu kolon ve kirişli sekizgen gövde boşluklu çerçeve tipi ise ikinci ve beşinci modlarda en yüksek frekans değerlerine sahiptir. En düşük serbest titreşim frekans sonuçları değerlendirildiğinde, dördüncü ve dokuzuncu mod hariç tüm modlarda en düşük değer boşluksuz I profilli çerçeve tipinde görülmüştür.

Petek çerçeveler arasında ise kirişi kare boşluklu çerçeve tipi ikinci, üçüncü ve onuncu modlarda ikinci sırada yer almıştır. Birinci modda petek kolonlu ve kirişi kare gövde boşluklu çerçeve tipi ikinci sıraya yerleşmişken, aynı sırada altıncı modun petek kolonlu kirişi dairesel gövde boşluklu çerçeve tipi bulunmuştur. Model B'nin petek kolonlu ve sekizgen gövde boşluklu kiriş tipinde, dokuzuncu modda en düşük frekans değeri oluşmuştur. Serbest titreşim frekansının dördüncü modunda en düşük frekans değerleri sırasıyla boşluksuz çerçeve tipinde, ardından yalnızca boşluklu kolon çerçeve tipinde ve son olarak petek kolonlu kirişi kare gövde boşluklu kiriş çerçeve tipinde meydana gelmiştir.

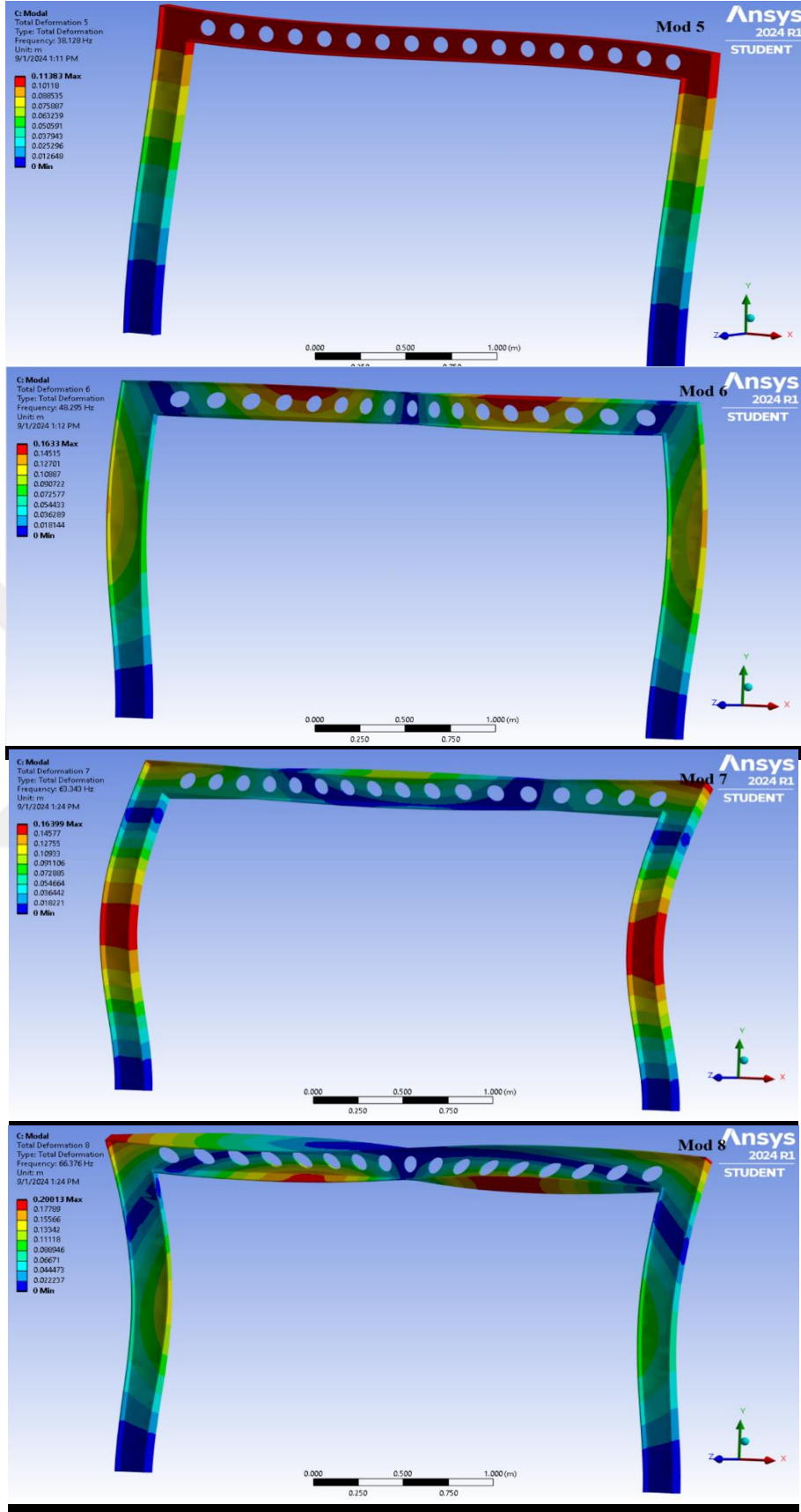
Model A ve Model B'nin doğal titreşim frekansları, şekil 43'te grafik olarak gösterilmiştir. Ayrıca ANSYS programı üzerinden elde edilen farklı mod şekilleri ise şekil (44-51)'de sunulmuştur.



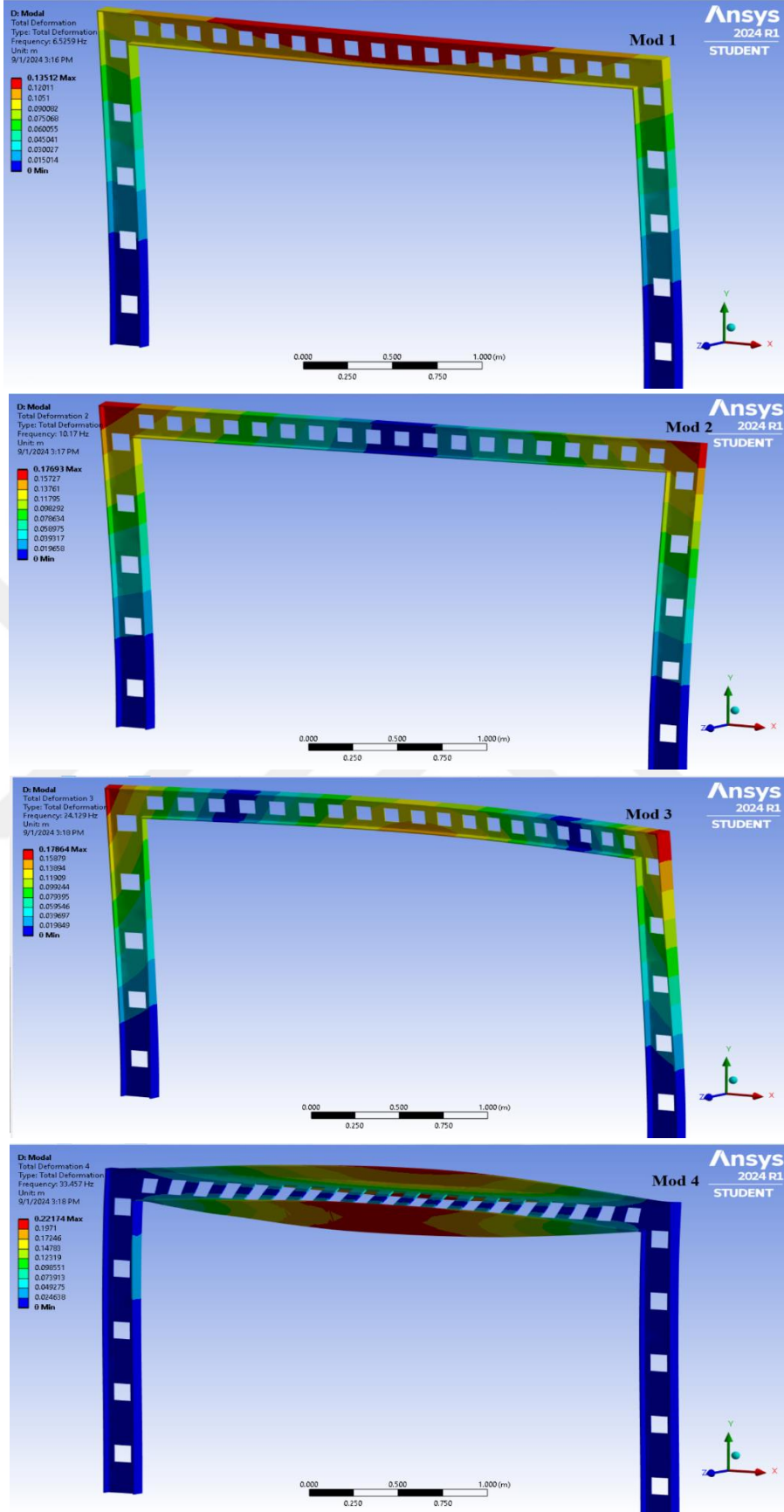
Şekil 43. Model A ve B çerçevelerinin serbest titreşim frekanslarının mukayesesi.



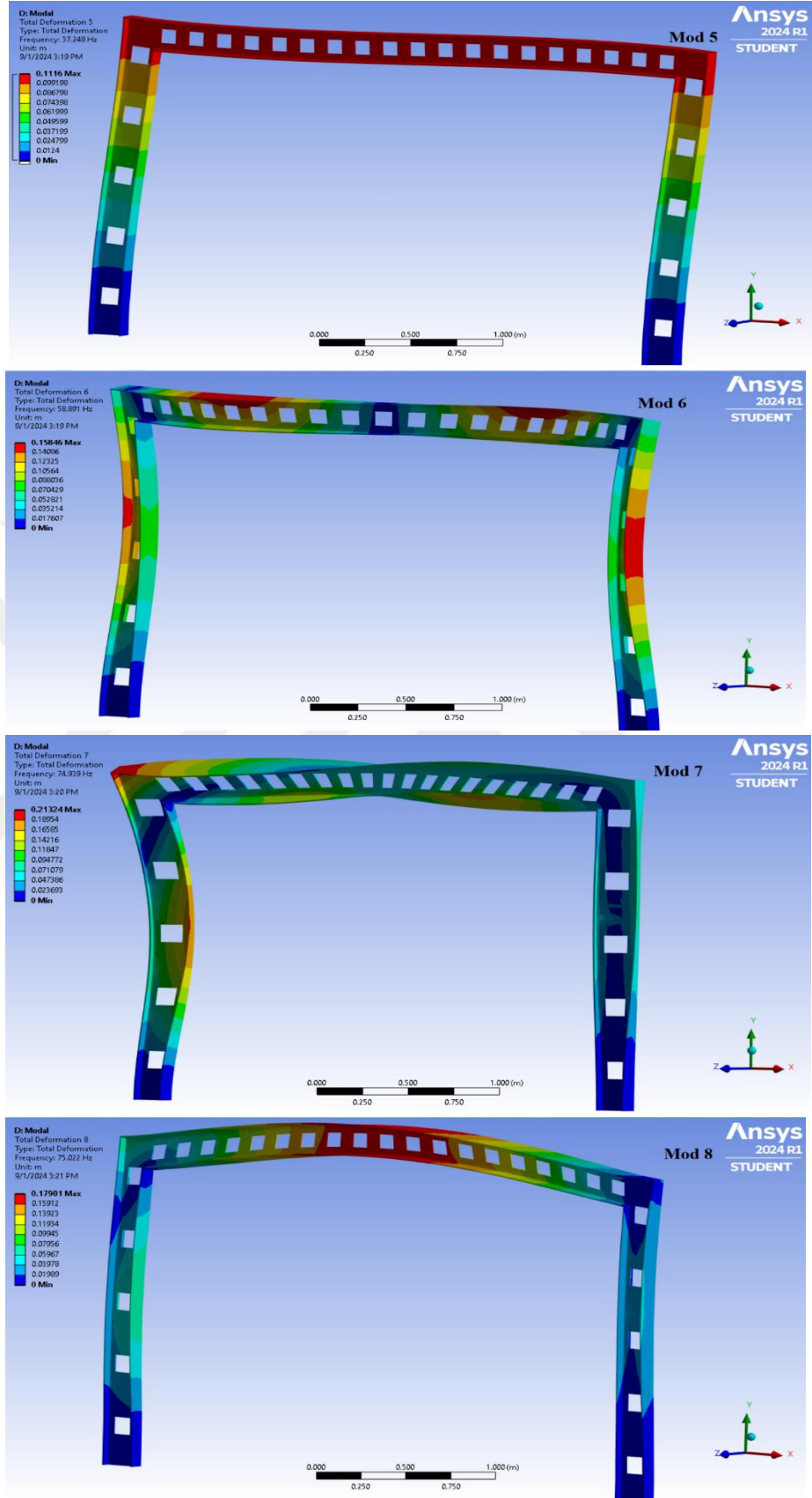
Şekil 44. Model A'nın kirişi dairesel gövde boşluklu çerçevesinin ilk 4 mod şekli



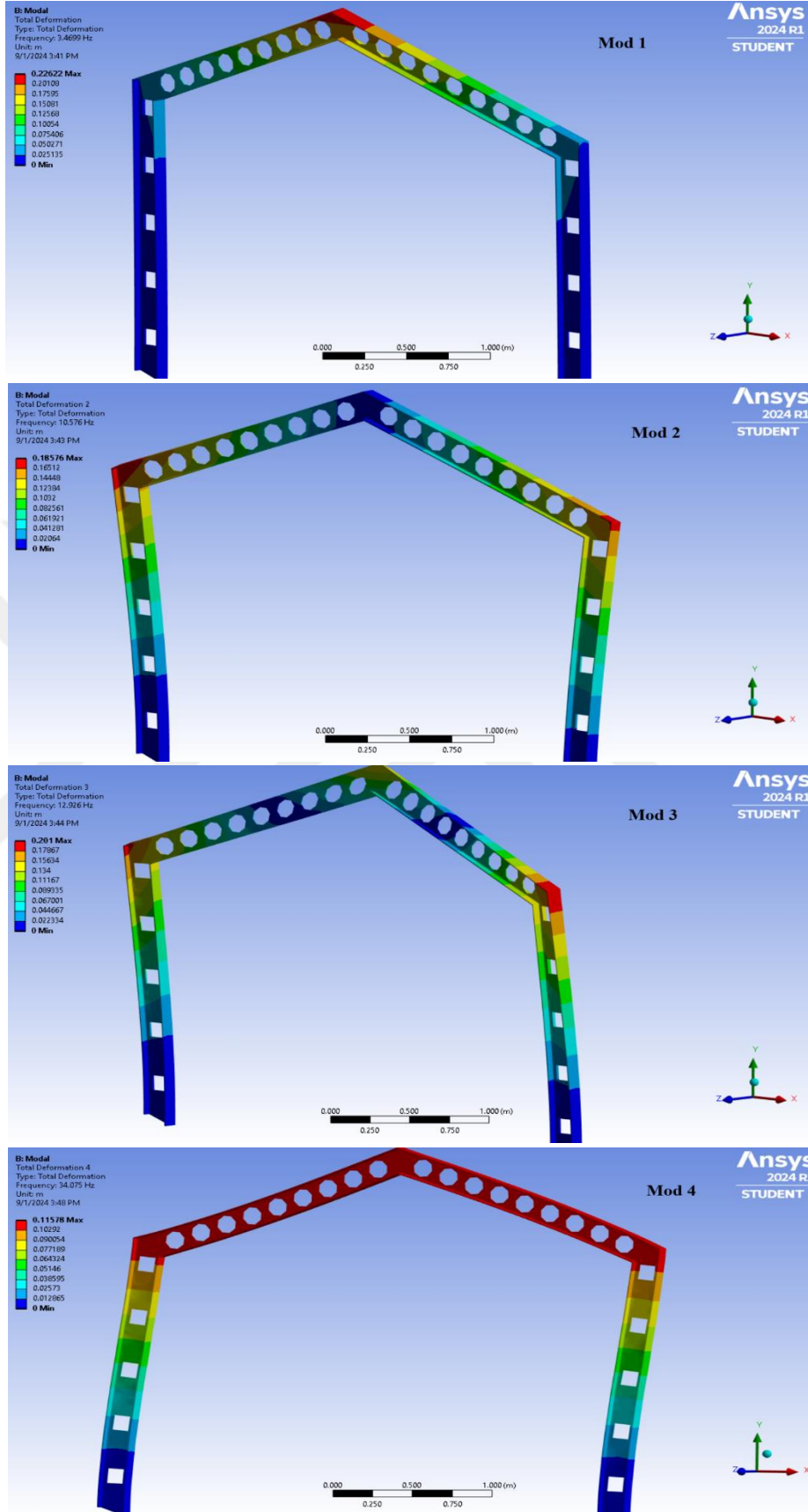
Şekil 45. Model A'nın kirişi dairesel gövde boşluklu çerçevesinin 5-8 mod şekli



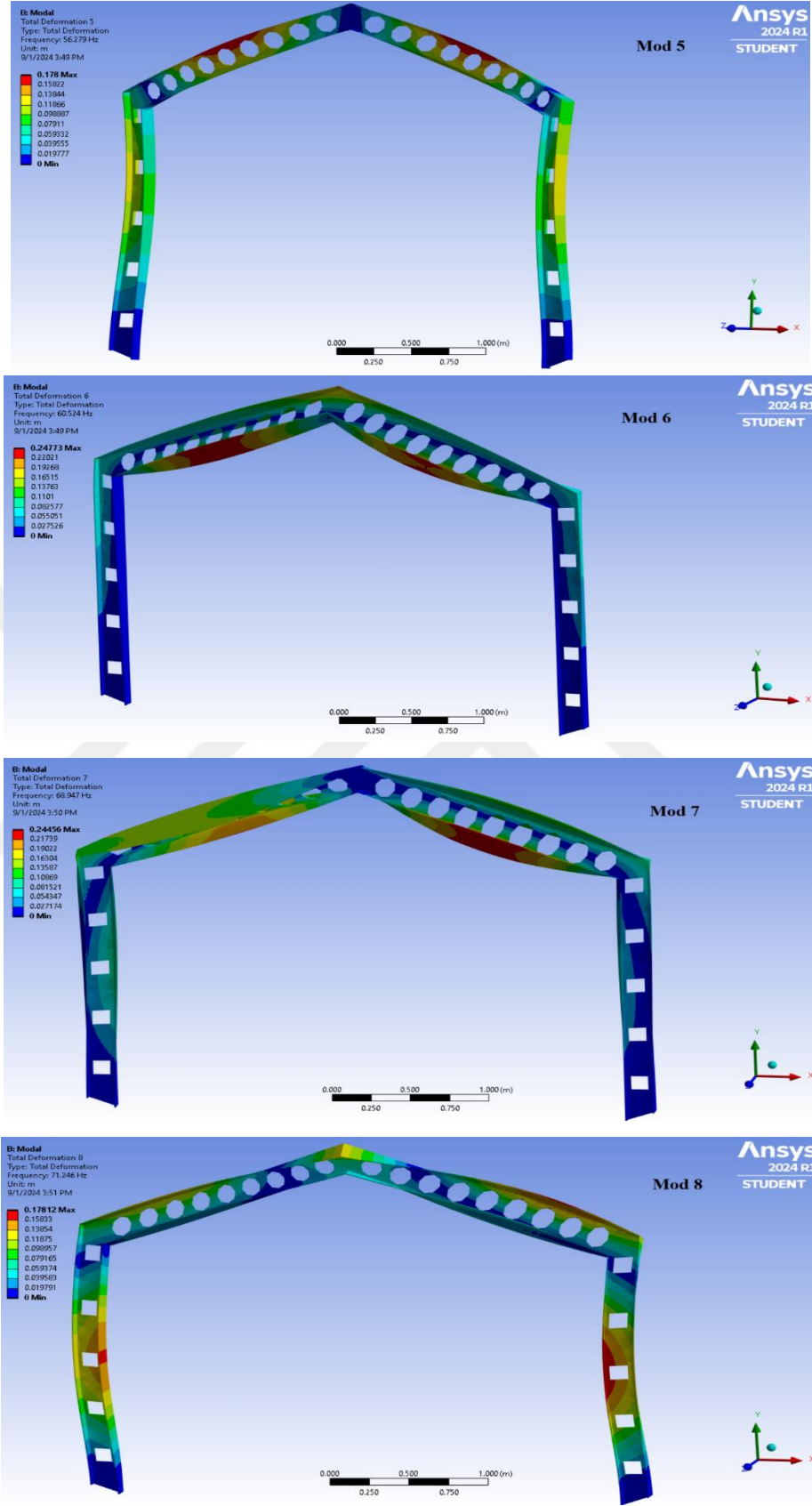
Şekil 46. Model A'nın kirişi ve kolonu kare gövde boşluklu çerçevesinin ilk 4 mod şekli



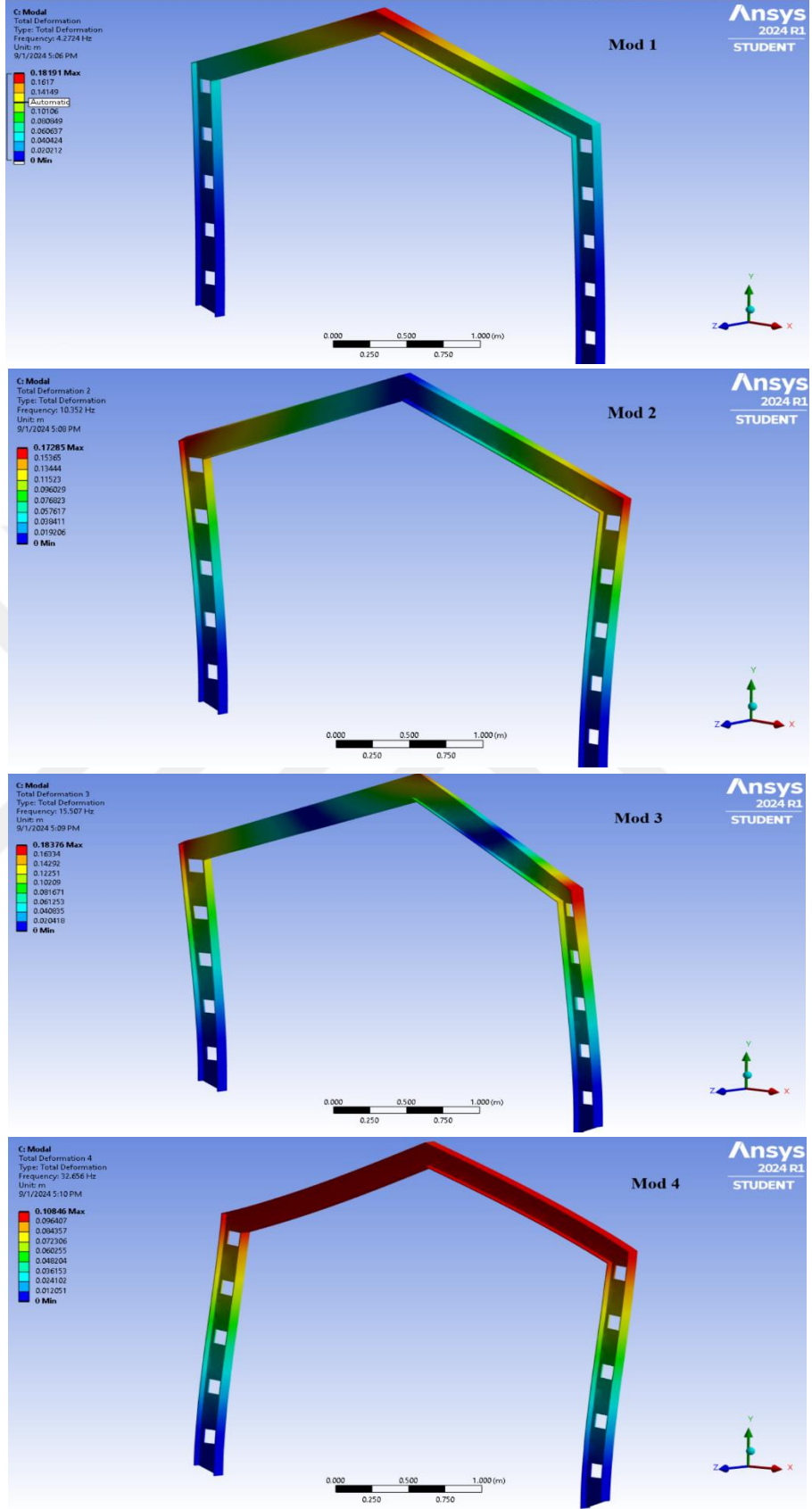
Şekil 47. Model A'nın kirişi ve kolonu kare gövde boşluklu çerçevesinin 5-8mod şekli



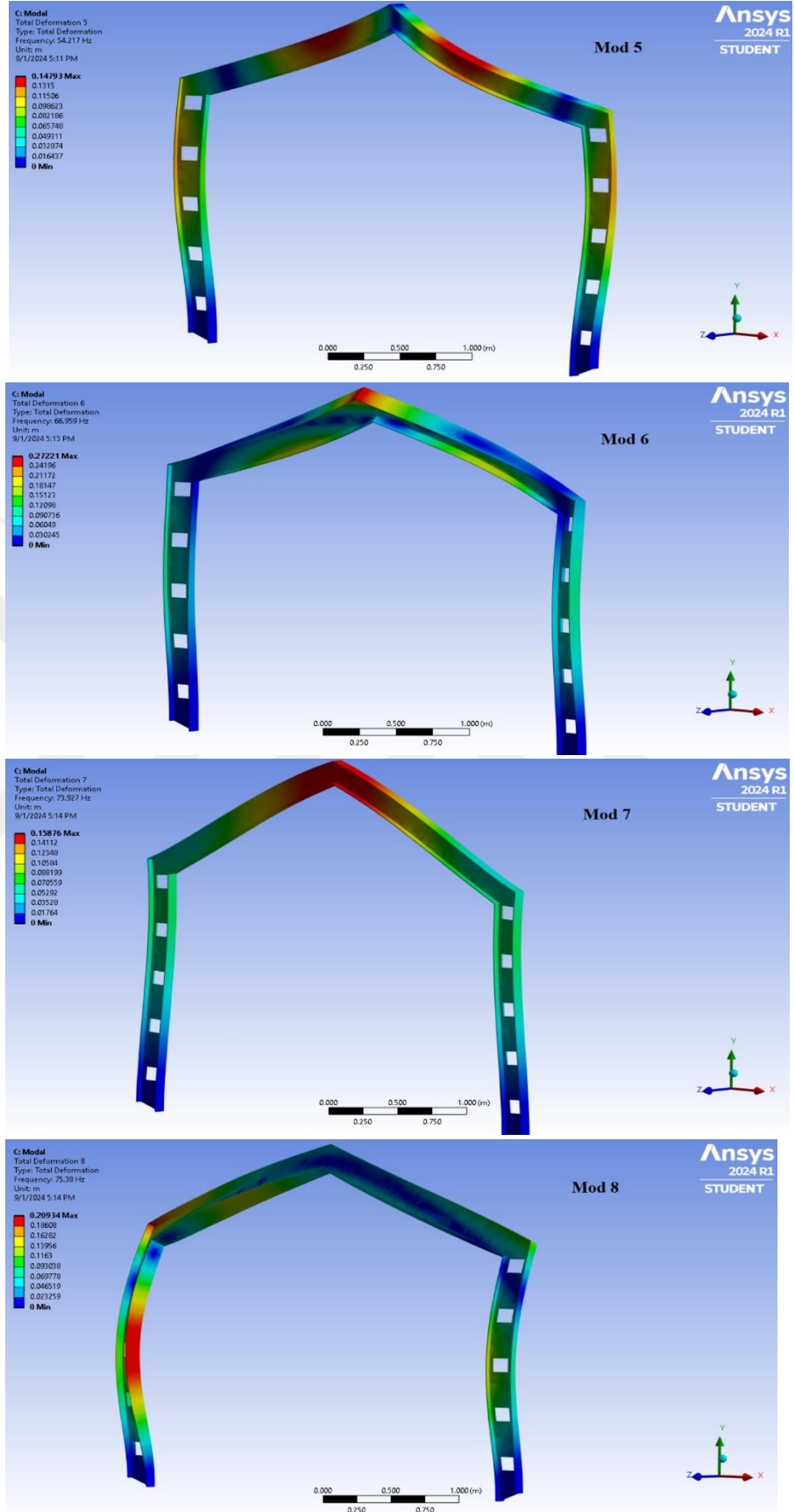
Şekil 48. Model B'nin kolunu kare ve kirişi sekizgen gövde boşluklu çerçevesinin ilk 4 mod şekli



Şekil 49. Model B'nin kolonu kare ve kirişi sekizgen gövde boşluklu çerçevesinin 5-8mod şekli



Şekil 50. Model B'nin boşluksuz kirişi ve kare boşluklu kolon çerçevesinin ilk 4 mod şekli



Şekil 51. Model B'nin boşluksuz kirişi ve kare boşluklu kolon çerçevesinin 5-8mod şekli

3.2.2. Zorlanmış titreşim analizi

Bu bölümde, ANSYS programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik yüklere maruz kalan çerçeve tiplerinin zorlanmış titreşim davranışı incelenmiştir. Zorlanmış titreşim analizi kapsamında, statik analizde kullanılan yatay ve düşey yüklerin zamana bağlı dinamik etkileri çerçeveler üzerinde değerlendirilmiştir. Yüklerin zamana bağlı olarak oluşturduğu yer değiştirmeler sunulmuş, doğal frekanslar, dış kuvvetin frekansı ve sönüm gibi parametrelerin analiz üzerindeki kritik etkileri vurgulanmıştır. Bu analiz, özellikle rezonans durumlarını önceden tespit etmek ve yapısal hasarları önlemek açısından büyük önem taşımaktadır. (Noori ve ark 2021) Çalışmada adım tipi yükleme kullanılarak, sönümsüz ve sönümlü olarak çerçevelere uygulanmıştır. Toplam 18 adet farklı çerçeve modeli üzerinde zorlanmış titreşim analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2.2.1. Sönümlü titreşim analizi

Serbest titreşim analizinden elde edilen frekans değerlerinden periyotlar hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında altı periyot için çözüm ele alınmıştır.

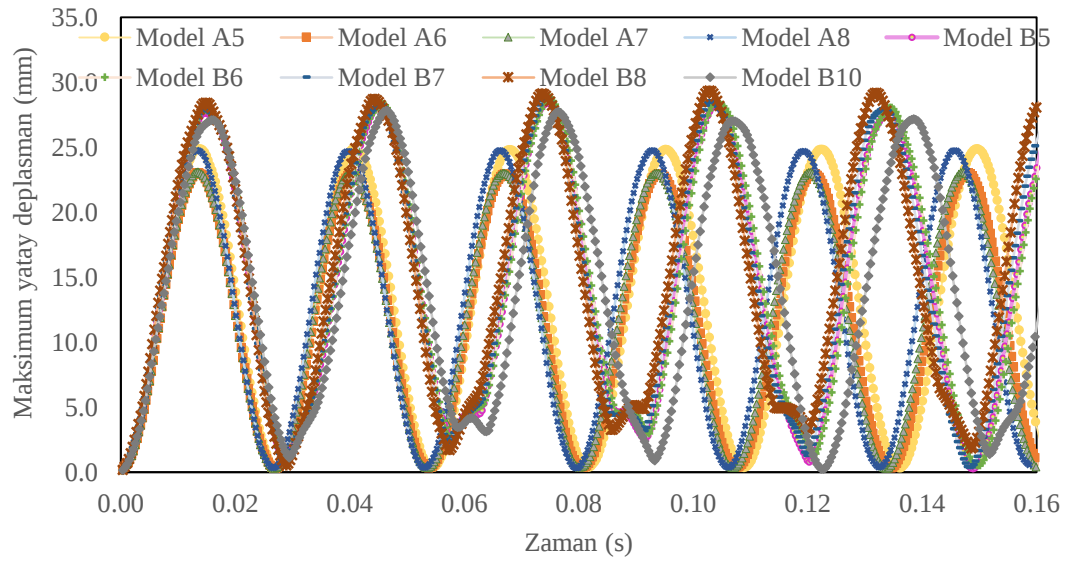
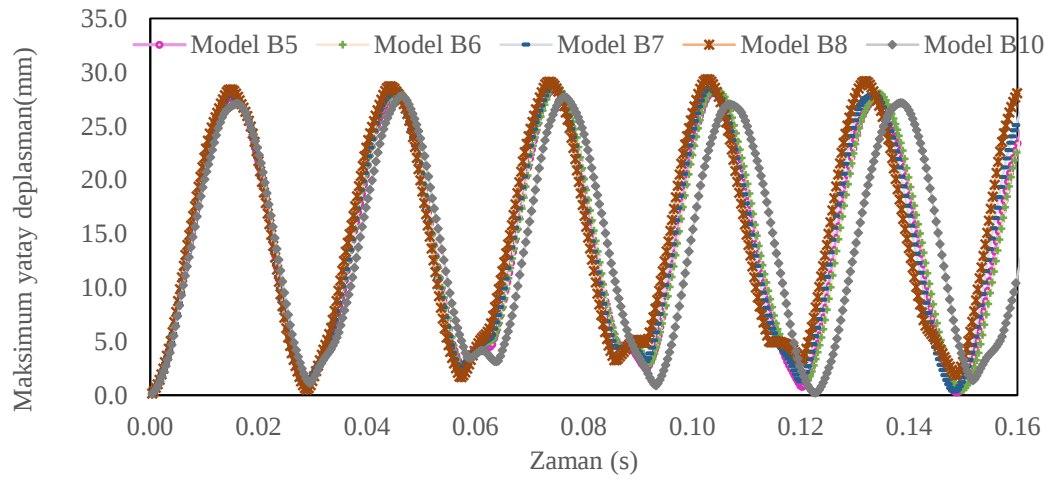
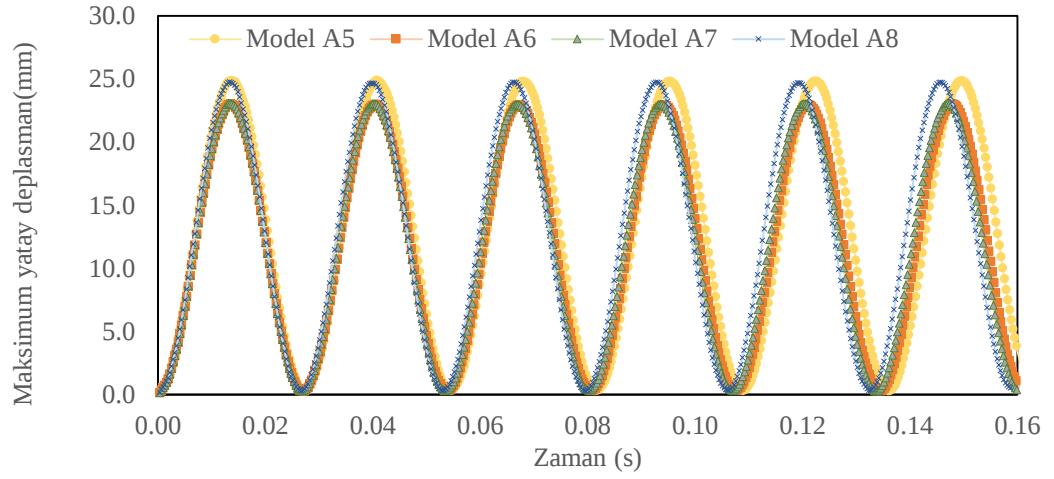
Yatay ve düşey dinamik yüklemeler uygulanmıştır. Çerçevenin yatay deplasmanı için serbest titreşimin yatay periyotları (Model A için Mod 5 ve Model B için Mod 4), düşey deplasmanı için ise düşey periyotları hesaplanmıştır (her iki model için Mod 9).

3.2.2.1.1. Yatay yer değiştirme

Bu bölümde toplamda dokuz farklı çerçeve modelinin yatay deplasmanı incelenmiştir. Model A'nın petek kolonlu ve kirişli çerçevelerinde, kirişin dört farklı gövde boşluk tipi (dairesel, kare, altıgen ve sekizgen) durumunda zorlanmış titreşimin yatay deplasmanına etkisi değerlendirilmiştir. Model B'nin petek kolonlu ve kirişli çerçevelerinde ise, kirişin boşluksuz ve dört farklı boşluk tipi (dairesel, kare, altıgen ve sekizgen) durumunda zorlanmış titreşimin yatay deplasmanına etkisi incelenmiştir.

Yükleme, çerçeveye yanal olarak 5 tonluk dinamik tekil yük şeklinde uygulanmıştır.

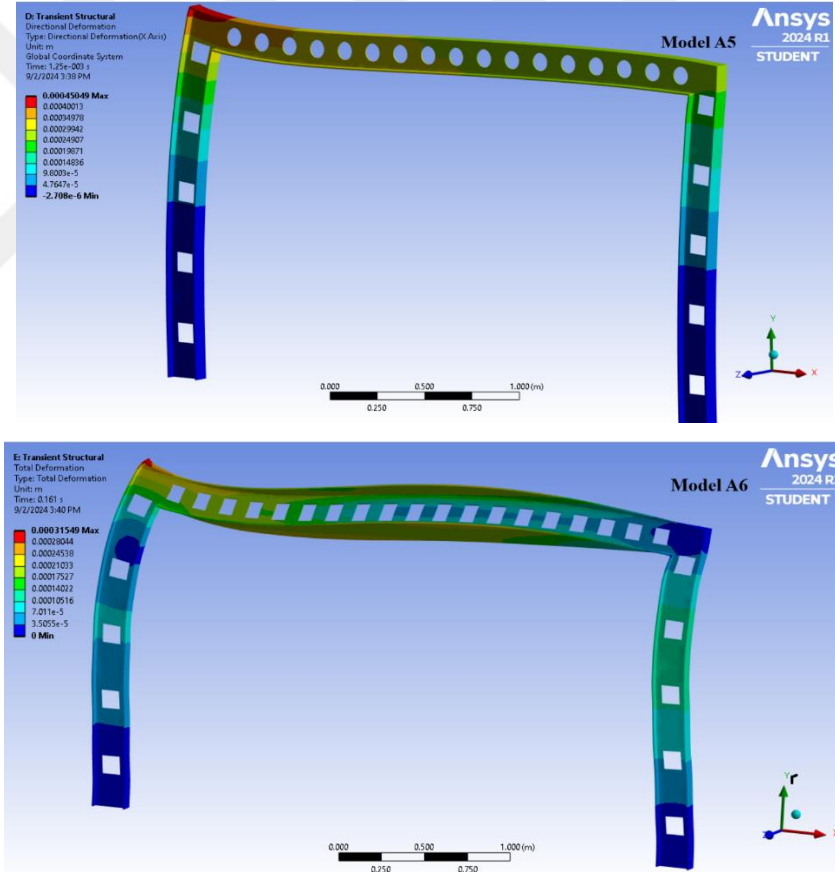
Analiz sonuçlarından elde edilen en büyük yatay yer değiştirme değerlerinin zamanla değişimi şekil 52'de grafik formunda sunulmuştur.



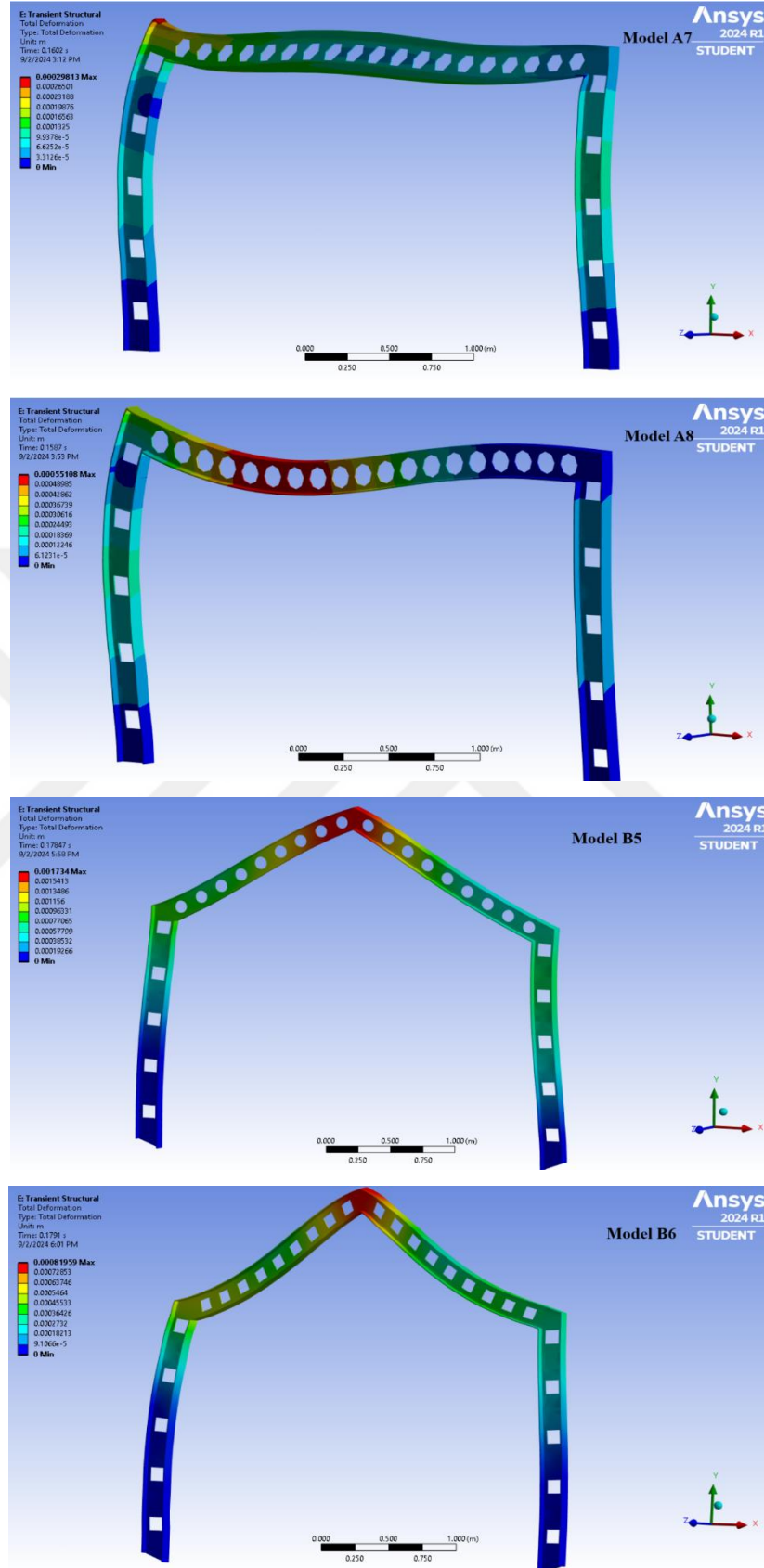
Şekil 52. Model A ve B çerçevelerine dinamik yük altında zamanla en büyük yatay yer değiştirmelerin grafiği.

Şekil 52 grafiğinden elde edilen sonuçlara göre, Model A'nın analiz edilen modelleri arasında zorlanmış titreşimin en büyük yatay yer değiştirme değerleri Model A.5 ve A.8'de, Model B'nin ise en büyük yatay yer değiştirme değeri B.8'de tespit edilmiştir. Petek çerçevelerin petek kolonuna ve sekizgen gövde boşluklu kirişin tipine sahip olması durumunda en büyük yer değiştirme değerlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. İki farklı çerçeve modeli karşılaştırıldığında, Model B'nin sonuçlarının Model A'ya göre daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

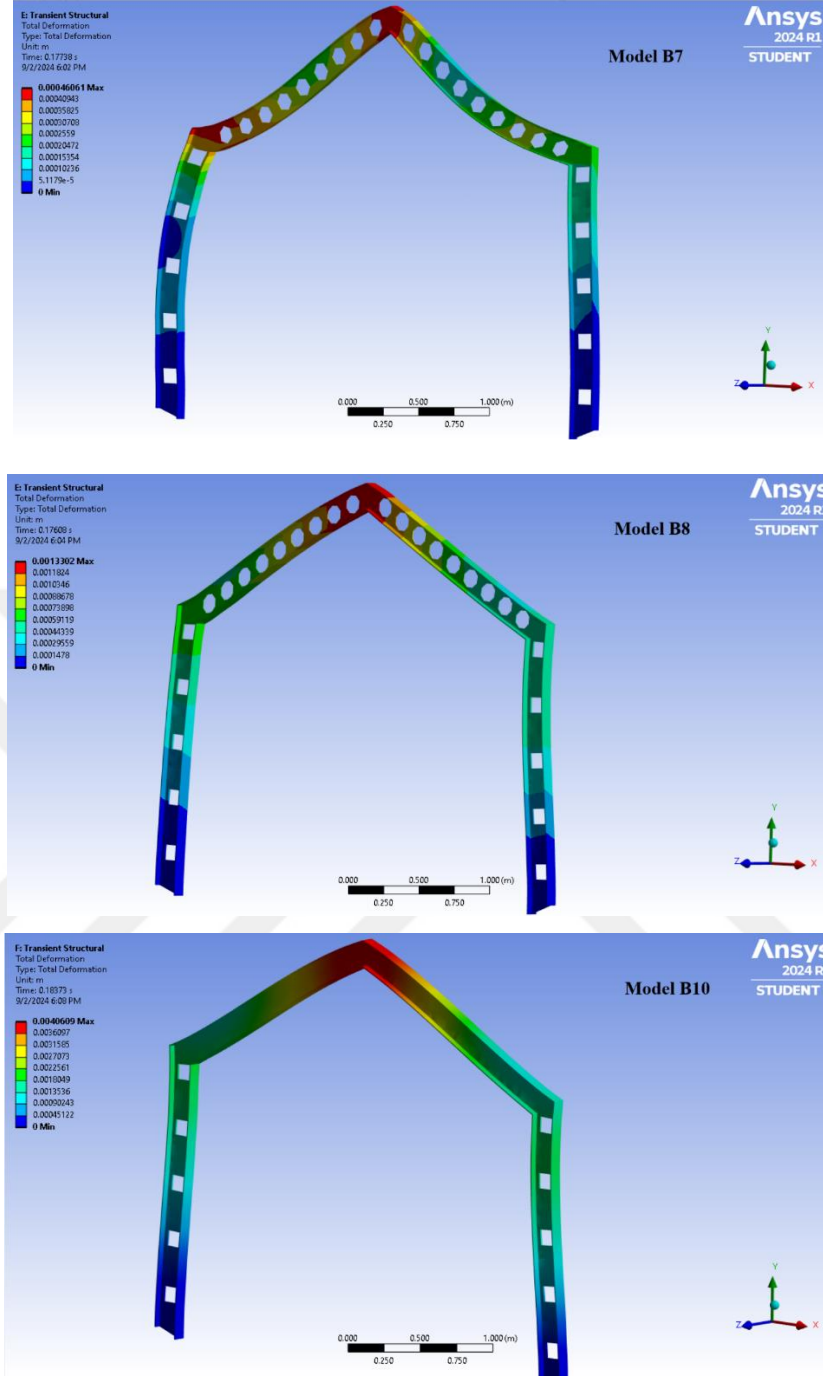
Şekil (53-55)'de çerçevelerin zorlanmış titreşim analizinden dinamik yatay yüklü durumunda elde edilen çerçeve şekilleri sunulmuştur.



Şekil 53. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki yatay yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları.



Şekil 54. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki yatay yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları.



Şekil 55. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki yatay yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları.

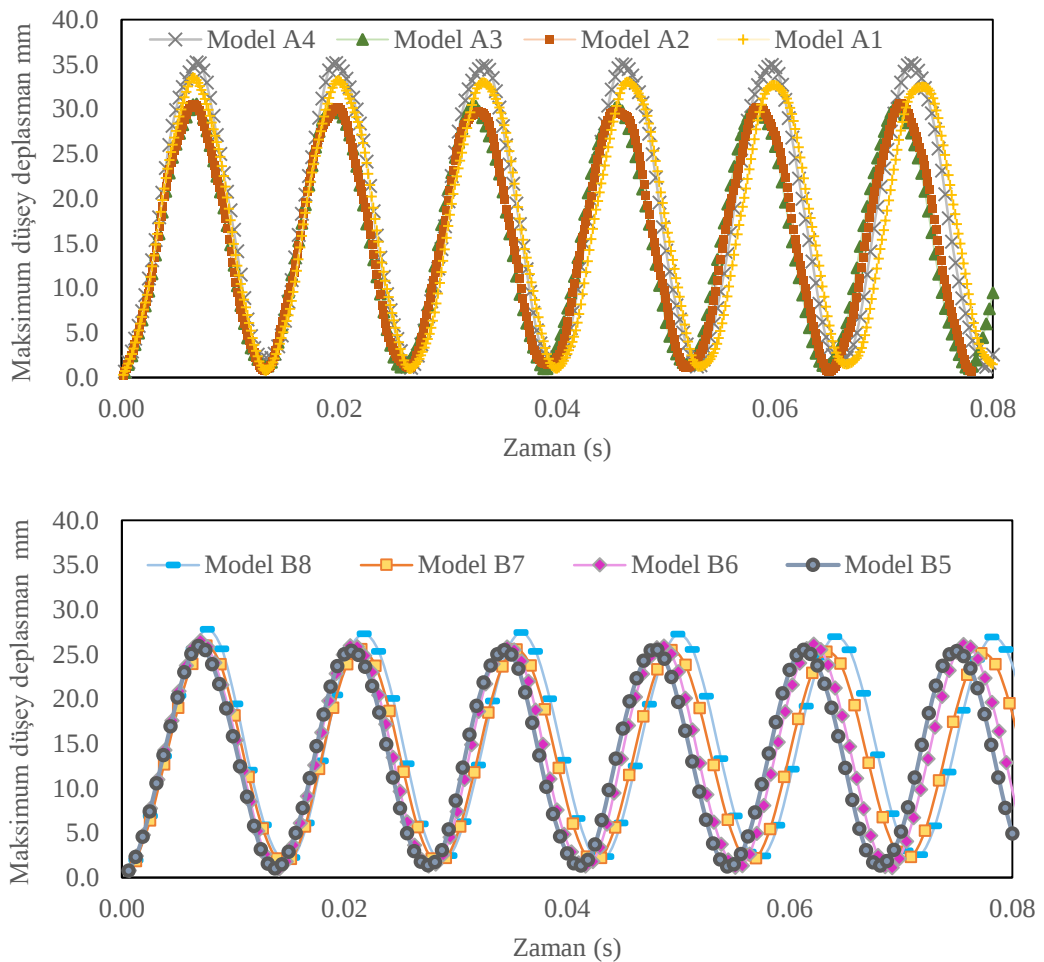
3.2.2.1.2. Düşey yer değiştirme

Bu bölümde, toplamda sekiz farklı çerçeve modelinde kirişin ortasına uygulanan düşey tekil yükün etkisiyle oluşan düşey deplasmanını incelenmiştir.

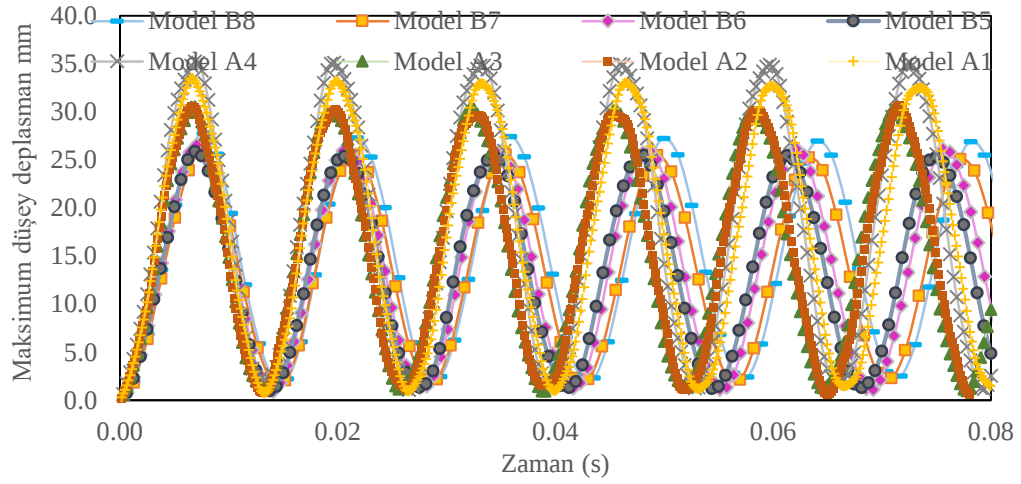
Model A'nın boşluksuz kolon çerçevelerinde ve kirişlerinin dört farklı gövde boşluk tipi (dairesel, kare, altıgen ve sekizgen) durumunda zorlanmış titreşimin düşey deplasman üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Model B'nin petek kolonlu ve kirişli çerçevelerinde ise kirişin dört farklı boşluk tipi (dairesel, kare, altıgen ve sekizgen) durumunda zorlanmış titreşimin düşey deplasman üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Yükleme, 10 tonluk tekil dinamik yük olarak kirişin ortasına uygulanmıştır.

Analiz sonuçlarından elde edilen en büyük düşey yer değiştirme değerlerinin zamana bağlı değişimi şekil (56 -57)'de grafik formunda sunulmuştur.



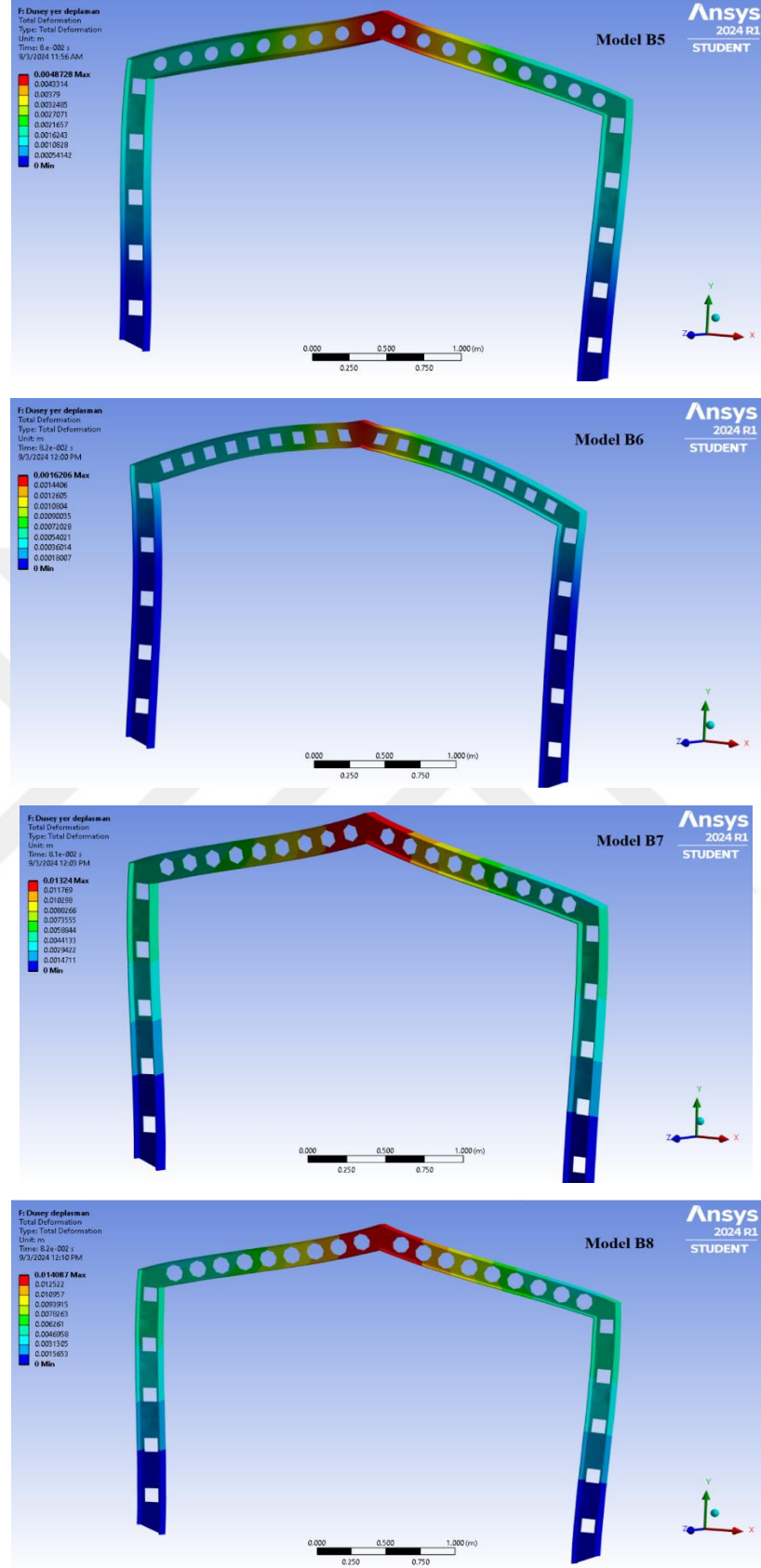
Şekil 56. Model A ve B çerçevelerine dinamik yük altında zamanla en büyük düşey yer değiştirmelerin grafiği



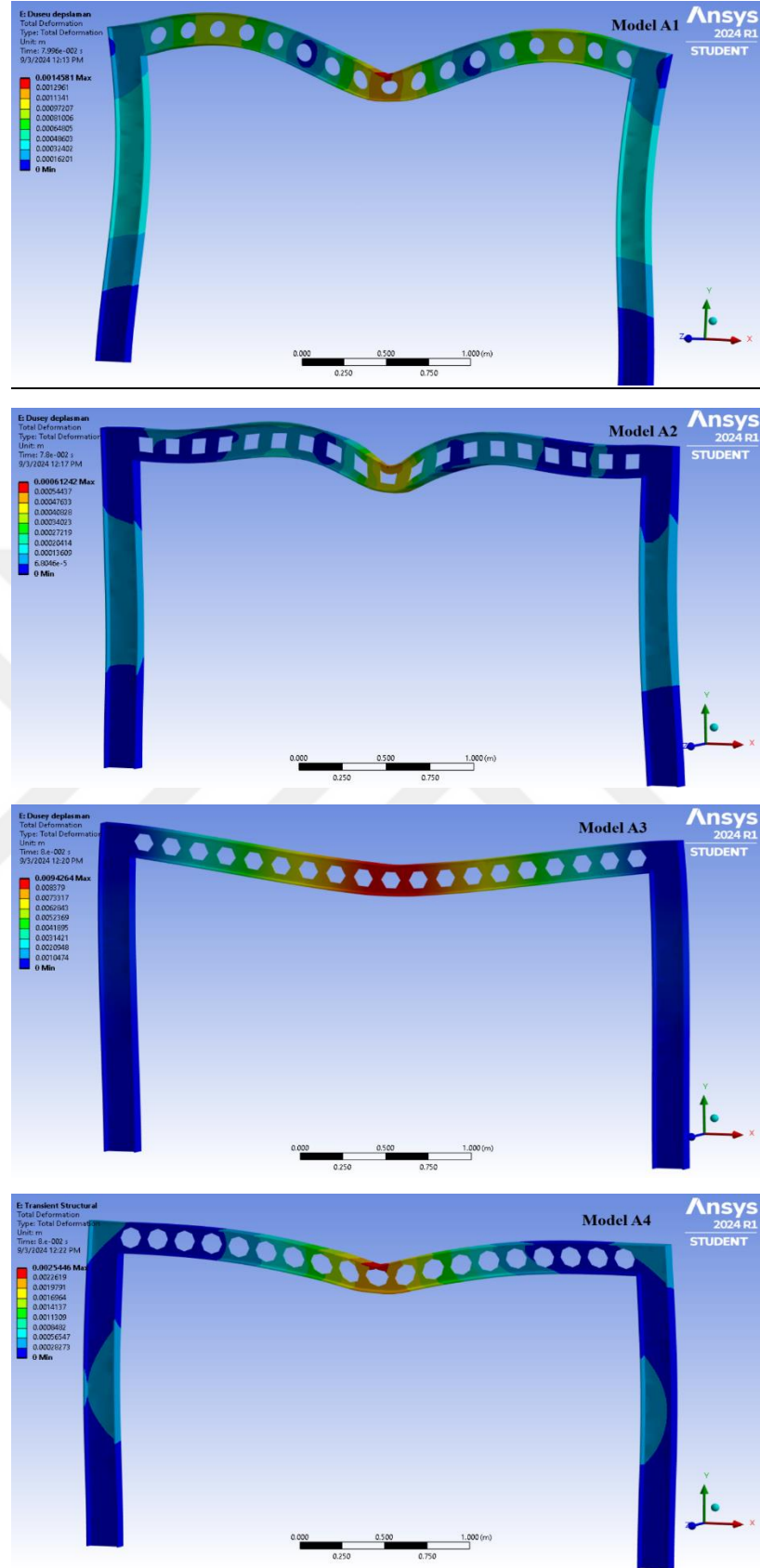
Şekil 57. Model A ve B çerçevelerine dinamik yük altında zamanla en büyük düşey yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılma grafiği –ANSYS sonuçları.

Şekil (56 - 57)grafiğinden elde edilen sonuçlara göre, Model A'nın zorlanmış titreşimin dinamik düşey yükü durumunda en büyük düşey yer değiştirme değerleri boşluksuz kolon ve sekizgen gövde boşluklu kirişin durumunda, Model B'nin ise en büyük düşey yer değiştirme değeri boşluklu kolon ve sekizgen gövde boşluklu kirişin durumunda tespit edilmiştir. İki farklı çerçeve modeli karşılaştırıldığında, Model A'nın sonuçlarının Model B'ye göre daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil (58 - 59)'da çerçevelerin zorlanmış titreşim analizi sonucunda dinamik düşey yük uygulandığında elde edilen çerçeve şekilleri sunulmuştur.



Şekil 58. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki düşey yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları.

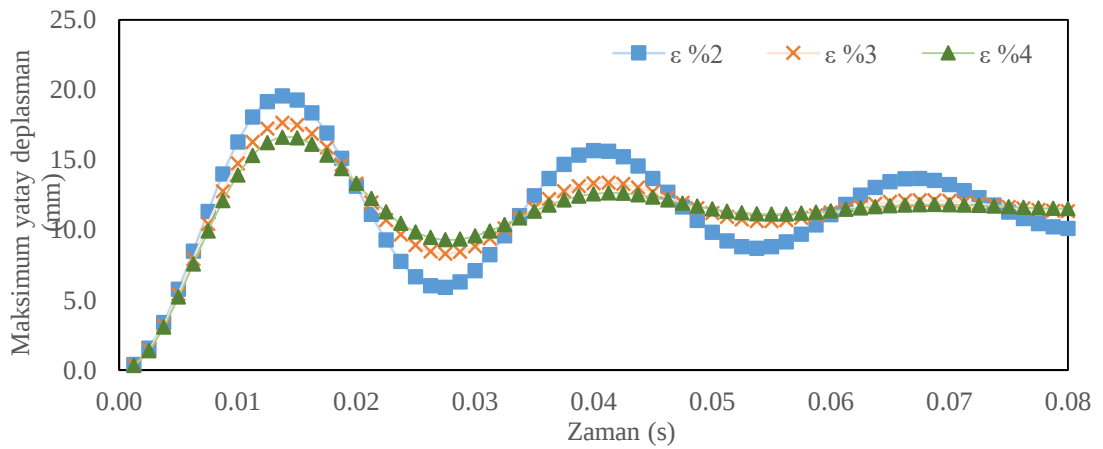


Şekil 59. Çerçeve modellerinin zorlanmış titreşimdeki düşey yer değiştirme sonuçları –ANSYS sonuçları.

3.2.2.2. Sönümlü zorlanmış titreşim

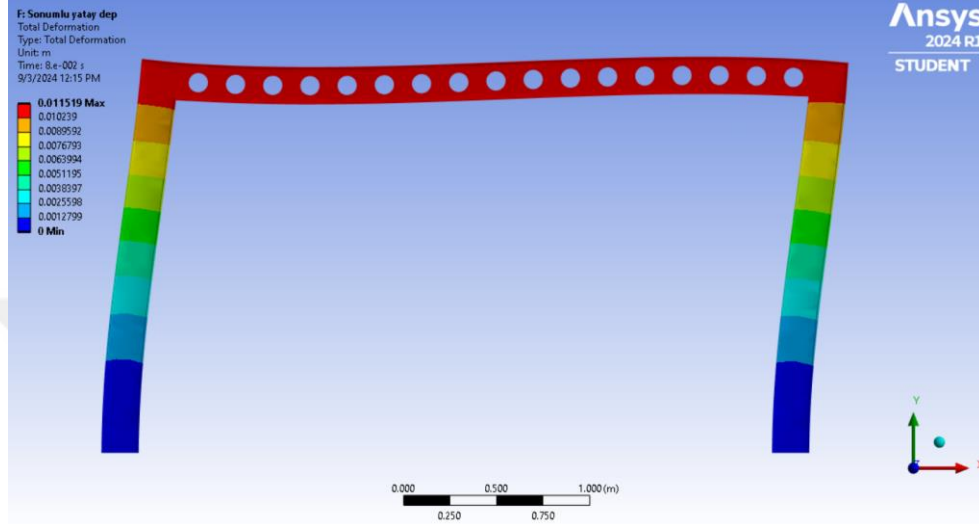
Bu bölümde, aynı çerçevenin adım tipi yükleme durum için zorlanmış titreşim analizi sönüm etkisi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Sönüm oranı eklenmesiyle çerçevenin titreşim enerjisinin zamanla azalması sağlanmıştır. Bu çalışma, çerçevenin adım yükleme altında zamana bağlı davranışını ve titreşimlerinin azalmasını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Analiz, üç periyot için çözümü ele alınmıştır. Çalışmada, %2,%3 ve %4 olmak üzere üç farklı yapısal sönüm oranının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 60'ta en büyük yer değiştirme değeri ile yapısal sönüm oranı grafik olarak sunulmuştur. ANSYS programında sönümlü analizi için sönüm katsayısı eklenmiştir. Sönüm katsayısı, $(2 \cdot \text{yapısal sönüm oranı}) / \text{açısal frekans}$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu analizde, Model A çerçevesinin kolonlarının boşluksuz ve kirişi dairesel gövde boşluklu olduğu durum dikkate alınmıştır. Çerçeveye yanal olarak 5 tonluk dinamik yük uygulanmıştır. Çerçevenin analiz sonuçları şekil 61'de gösterilmiştir.



Şekil 60. Model A1'in en büyük yer değiştirme değerlerinin farklı yapısal sönüm oranlarıyla karşılaştırma grafiği.

Şekil 60'tan, maksimum yatay yer değiştirme değerlerinin yapısal sönüm oranından etkilendiği gözlemlenmiştir . Yapısal sönüm oranı azaldıkça , yatay yer değiştirme değerlerinin zamana bağlı değişiminin azaldığı ve maksimum deplasman değerinin küçüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 61. Model A1 zorlanmış titreşimin sönümlü durum analiz sonuçlarından elde edilen en büyük yer değiştirmesi -ANSYS sonuçları.

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında petek kolon ve petek kirişten oluşan petek çerçeve sistemlerinin ANSYS 2024 R1 Workbench paket programı kullanılarak teorik analizi gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizde, petek çerçevelerin iki farklı model tipi dikkate alınmıştır: kolonları boşluksuz ve kare gövde boşluklu, kirişleri ise boşluksuz ve dört farklı gövde boşluklu (dairesel, kare, altıgen ve sekizgen) modelleridir. Toplam 19 adet farklı çerçeve modelinin statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Farklı yükleme durumlarının çerçeve modeli ve çubuk elemanların gövde boşluk tiplerine göre analiz sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Çerçevenin mesnet koşulları iki kolon ucunun ankastre mesnet olacak şekilde tanımlanmış, en kesiti IPE200 profili tercih edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Statik analizi

- Statik analizinde dört farklı yükleme durumu uygulanmıştır. Tüm yükleme durumlarında, model A ve B çerçevelerinin en büyük yer değiştirme değerleri kolonu kare ve kirişi sekizgen gövde boşluklu çerçevelerde tespit edilmiştir.
- Toplam yer değiştirmeler değerlerinin, aynı çerçevede boşluklu kolon kullanmasıyla arttığı analiz sonuçlarından gözlemlenmiştir.
- Petek kirişin dairesel boşluklu olduğu durumlarda en az yer değiştirme meydana gelmiştir.
- Yer değiştirme sonuçları değerlendirildiğinde, yanal tekil yükleme haricindeki tüm yükleme durumlarında model A tipi çerçevenin daha büyük sonuç değerlerine sahip olduğu bulunmuştur.
- Çerçevelerin asal gerilmeleri (maksimum,ortalama,minimum) , Von-mises ve maksimum kayma gerilmeleri statik analizde elde edilmiştir.
- Asal gerilme sonuçlarına göre, model B çerçevesinde daha az gerilme mutlak değeri olduğu tespit edilmiştir.

- Üç farklı gerilme tipinde, boşluklu kolon kullanılan modellerde gerilme değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- Von-mises ve maksimum kayma gerilmesi, tüm yükleme durumlarında, yanal tekil yükleme hariç olmak üzere, model B çerçeve tipinde daha küçük değerler göstermiştir.
- Beklendiği üzere, Von-mises ve maksimum kayma gerilmesi sekizgen ve altıgen gövde boşluklu kirişlerden oluşan çerçevelerde en yüksek ,dairesel ve kare boşluklarda ise daha düşük değerlerde oluşmuştur.
- Petek kirişin kenarındaki boşluk kolondan uzaklaştıkça maksimum kayma değeri azalmaktadır.
- Analiz sonuçlarına göre, maksimum kayma ve Von-mises gerilmelerinin en çok kolon-kiriş birleşim bölgesinde, asal gerilmenin ise boşluk çevresinde meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Dinamik analizi

- Serbest titreşim analizinde toplam 10 modun toplam yer değiştirme değerleri incelenmiştir.
- Çerçeve tipi değiştiğinde, serbest frekans değerlerinin de değiştiği tespit edilmiştir.
- Kirişlerin gövde boşluk tipleri değiştiğinde serbest titreşim frekans değerlerinde çok az miktarda değişim görülmüştür.
- Kolonun boşluklu ya da boşluksuz olmasının serbest frekans değerine hiçbir etkisi olmadığı belirlenmiştir.
- Zorlanmış titreşim analizi, sönümsüz ve sönümlü olarak adım tipi yükleme için gerçekleştirilmiştir.
- Sönümsüz analizinde 6 periyot için çözüm alınmış ve yatay ile düşey dinamik yüklemeler uygulanmıştır.

- Sönümsüz analizde, model B'nin yer değiştirme değerleri dinamik yatay yük etkisi altındayken model A'ya göre daha yüksek olduğu bulunmuştur.
- Her iki modelde de maksimum düşey yer değiştirme, çerçevenin kiriş ortasında meydana gelmiştir.
- Petek çerçevenin kiriş gövde boşluk tipleri arasında en büyük zorlanmış titreşim sonuçları sekizgen gövde boşluklu durumda elde edilmiştir.
- Sönümlü titreşim analizinde tek yalnızca dairesel gövde boşluklu kirişten oluşan petek çerçeve tipi incelenmiştir.
- Adım yükleme sönümlü titreşimi 3 periyot için analiz yapılmıştır.
- Sönümlü titreşim analiz sonuçlarının, çerçevenin açısız frekansı ve sönüm oranı ile etkilendiği tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

- Ajim, S., Priyanka, D. R., Nikita, S. R., Punam, T. L., Komal, S. S., ve Kalyani, P. B. (2017). Structural Analysis and Design of Different types of Castellated Beam. *International Research Journal of Engineering and Technology*.
- Ansari, N. A., ve Dr. R. S. Talikoti . (2019). Analysis and Design of Castellated Beam using ANSYS. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7(6), 2348–2352. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.6396>
- Aswad, N. H., Parung, H., Irmawaty, R., ve Amiruddin, A. A. (2017). The Effects of Reduced Beam Section on Castellated Beam. *MATEC Web of Conferences*, 138. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713802018>
- Chandrakant Dhage, A., Pimpale, K. B., ve Danole, A. S. (2021). Study of Castellated Beam Stiffened by Diagonal Andring Stiffners. *International Journal of Engineering Research & Technology* , 2278-0181.
- Doori, S., ve 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), 38–49. <https://doi.org/10.46740/alku.883187>
- Elaiwi, S. S., Kim, B., ve Li, L. (2019). Linear and Nonlinear Buckling Analysis of Castellated Beams. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 83–93. <https://doi.org/10.18178/ijscer.8.2.83-93>
- Erdal, F., ve Saka, M. P. (2013). Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research* (Vol. 80, pp. 355–368). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.007>
- Ertürkmen, D., ve Noori, A. R. (2023). Farklı geometrik boşluklu eğri eksenli petek kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile serbest titreşim analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.13(4),1019-1032. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1262258>
- Firoz, M., Sunil, K., ve Kapadia, B. (2016). Effect of Expansion Ratio on Deflection of Castellated Beam .*International Journal For Technological Research In Engineering* (Vol. 3, Issue 8).
- Frans, R. (2017). Behavior of Optimized Castellated Beam Under Cyclic-Quasi Static Loading. *International Journal of Engineering*, 4, 17-22. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54918099>
- Gomes, A. F. F., Mesquita, L. C., Rodrigues, E. F. C., Arroyo, F. N., Aquino, V. B. M., Santos, H. F., Panzera, T. H., Lahr, F. A. R., Chahud, E., Branco, L. A. M. N., and Christoforo, A. L. (2023). Influence of Opening Type in Axially Compressed Castellated Columns. *Buildings, MDPI*,13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071851>

- Jia, L. G., Bi, R., Lang, Y. X., ve Li, X. F. (2020). Experimental study and theoretical analysis on seismic performance of castellated beam with hexagonal holes. *Advanced Steel Construction*, 16(3), 233–246. <https://doi.org/10.18057/IJASC.2020.16.3.5>
- M.R.Wakchaure, ve A.V. Sagade (2012). Finite Element Analysis of Castellated Steel Beam. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, Volume 2, Issue 1, July 2012.
- Maulana, T. I., Soebandono, B., Jagad, B. S., ve Prayuda, H. (2018). Stress and deformation analysis of tapered cantilever castellated beam using numerical method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 352(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/352/1/012029>
- Mezher, N. A. M., Noori, A. R., ve Ertürkmen, D. (2023). Influence of the Web Opening Shapes on the Bending and Free Vibration Responses of Castellated Steel Beams. *International Journal of Engineering Technologies IJET*, 8(2), 83–100. <https://doi.org/10.19072/ijet.1273137>
- Nawar, M. T., Arafa, I. T., Elhosseiny, O. M., ve El-Zohairy, A. (2021). Full static resistance of castellated steel beams with hexagonal web openings for blast response predictions. *Engineering Structures*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112844>
- Noori, A. R., Aslan, T. A., ve Temel, B. (2021) . Dynamic Analysis of Functionally Graded Porous Beams Using Complementary Functions Method in the Laplace Domain. *Composite Structures*, Volume 256, 15 January 2021, 113094.
- Patel, B. A., ve Ramani, S. D. (2016). Comparison of analytical critical buckling load for castellated beam. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2349-5162 .
- Patil, S. A., ve Kumbhar, P. D. (2015). Study of Castellated Beam Using Stiffeners: A Review. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 04 -11, 2319-1163.
- Su, Y., Li, Q., Yang, Y., ve Chen, X. (2011). Research on the mechanical properties of the castellated lightweight steel portal frame. *Advanced Materials Research*, 243–249, 1267–1271. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.1267>
- Sukanya ,M., Balakrishnan, C., ve Devanathan, K., Experimental Investigation of Composite Deck Slab with Castellated Beam. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 10(5), 2019, pp. 55-6 doi. <https://www.doi.org/10.34218/IJARET.10.5.2019.006>
- Sweedan, A. M. I., El-Sawy, K. M., ve Martini, M. I. (2009). Identification of the buckling capacity of axially loaded cellular columns. *Thin-Walled Structures*, 47(4), 442–454. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.08.009>

- Tanady, K., ve Suryoatmono, B. (2024). Numerical Study of Behavior of Castellated Beam under Cyclic Loading. *Civil Engineering and Architecture*, 12(1), 185–202. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120116>
- Tsavdaridis, K. D., ve Galiatsatos, G. (2015). Assessment of cellular beams with transverse stiffeners and closely spaced web openings. *Thin-Walled Structures*, 94, 636–650. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.05.005>
- Vhora, N. (2021). Performance of Simply Supported Castellated Beam Beneath Gravity Loading, *International Journal For Technological Research In Engineering*, 8/23, 2347 – 4718.
- Wafi, H., Al-, A., Muslim, T., ve Al-Kannoon, A.A. (2018). Improving Behavior of Castellated Beam by Adding Spacer Plat and Steel Rings. *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences* , 16 / 2 .
- Wakchaure, M. R.,Sagade,A.V., ve Auti,V.A. (2012). Parametric study of castellated beam with varying depth of web opening. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(8).
- Yustisia, V. W., Suswanto, B., Irawan, D., ve 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>
- Zewudie, B. B. (2022). Nonlinear Finite Element Analysis and Comparison of In-Plane Strength of Circular and Parabolic Arched I-Section Cellular Steel Beam. *Advances in Civil Engineering*, 487916.

