

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OPTİMUM BOYUTLANDIRILMIŞ GÖVDE YÜKSEKLİĞİ ARTIRILMIŞ
ÇELİK KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Serkan TAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2017

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OPTİMUM BOYUTLANDIRILMIŞ GÖVDE YÜKSEKLİĞİ ARTIRILMIŞ
ÇELİK KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Serkan TAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
tarafından NAP-284 nolu proje ile desteklenmiştir.)**

2017

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OPTİMUM BOYUTLANDIRILMIŞ GÖVDE YÜKSEKLİĞİ ARTIRILMIŞ
ÇELİK KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Serkan TAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 17 / 07 / 2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Ferhat Erdal (Danışman)



Doç. Dr. Erkan DOĞAN



Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK



ÖZET

OPTİMUM BOYUTLANDIRILMIŞ GÖVDE YÜKSEKLİĞİ ARTIRILMIŞ ÇELİK KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Serkan TAŞ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ferhat ERDAL
Haziran 2017, 138 sayfa

Gövde yüksekliği artırılmış çelik kirişler I-kesit profillerin gövdeleri boyunca değişik formlarda kesilmesiyle elde edilen iki parçanın kaydırılarak uç bölgelerinden birbirine tekrar kaynaklanmasıyla oluşturulur. Bu işlemle elde edilen gövdesi yükseltilmiş kirişin atalet momenti, aynı ağırlığa sahip normal I-kesit profilin atalet momentine oranla artırılmış olur. Gövde yüksekliği artırılmış çelik kirişlerin gövdelerinde elde edilen boşlukların şekilleri petek ve dairesel olabilmektedir. Literatürde petek türü kirişler ve dairesel gövde yüksekliği artırılmış kirişler üzerine çok az araştırma mevcuttur. Farklı boşluk şekillerine sahip gövde derinlikleri artırılmış bu kirişlerin dış yükler altında performans ve davranışlarını karşılaştıran bir çalışma ise mevcut değildir. Bu tez kapsamında literatürde mevcut olan petek ve dairesel boşluklu kirişlere ek olarak yeni bir fikir olan sinüs eğrisi şeklindeki boşlukların elde edileceği biçimde kesilmiş kirişler de göz önüne alınmış ve üç farklı kiriş modelinin yük altındaki davranışları ve taşıma kapasiteleri kıyaslanmıştır. Yapı laboratuvarında yük taşıma kapasiteleri hesaplanan bu kirişler optimizasyon teknikleri kullanılarak minimum ağırlığa sahip olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Bunun için kirişlerde kullanılmış olan IPE kodlu profillerin satır numaraları, boşlukların geometrik boyutları ve kirişlerdeki boşlukların sayısı değişken olarak alınmış ve bu parametrelerin davranış ve geometrik sınırlayıcılar altında kiriş ağırlığını minimum yapacak değerleri elde edilmiştir. Formülasyonları oluşturulmuş optimizasyon problemlerinin çözümü harmoni arama ve parçacık kümesi yöntemlerinin adaptasyonu ile elde edilmeye çalışılmış ve bu şekilde aynı zamanda stokastik yöntemlerin yapıya uyarlamaları gerçekleştirilerek iki yöntemin minimum ağırlığı bulması sürecinde sergilediği performanslar kıyaslanmıştır. Gövde yüksekliği artırılmış çelik kirişlerin tasarım kriterleri için AISC-ASD ve BS-5950 şartnamelerinde öngörülen kıstaslar esas alınmıştır. Çalışmanın deneysel sürecinde; ilk kısımda optimizasyonu yapılan gövde derinliği artırılmış kirişlerin yük altındaki dayanımları hidrolik güç üniteli basınç silindrine sahip yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir. Tez çalışmasının son kısmında ise; kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılarak deneysel çalışmadan elde edilen verilerle kıyaslaması yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELE: Çelik Yapılar, Gövde Yüksekliği Artırılmış Kirişler, Yük Taşıma Kapasitesi, Yapı Optimizasyonu, Harmoni Arama Yöntemi, Partikül Küme Yöntemi

JÜRİ: Yrd. Doç. Dr. Ferhat ERDAL (Danışman)
Doç. Dr. Erkan DOĞAN
Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

ABSTRACT

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF ULTIMATE LOAD CARRYING CAPACITY OF OPTIMALLY DESIGNED WEB-EXPANDED STEEL BEAMS

Serkan TAŞ

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

June 2017, 138 pages

Steel I-beam sections can be modified to intensify their strength by creating a web-expanded section from a root beam. This is achieved by cutting the web of the root beam in a certain pattern with different geometries and then re-welding two parts to each other. As a result of this process the overall beam depth increases which in return causes increase in the capacity of the section. Therefore, it can be possible to cross long spans with less material. There are two common types of open web beams: beams with hexagonal openings, also called as castellated beams and beams with circular openings referred to as cellular beams. In comparison with castellated beams; there are limited theoretical and experimental research performed on cellular beams. In the literature, there is no detailed study, in which the performance and behavior of web-expanded beams with different holes which are subjected to the external loadings are carried out. The objective of the current master study is to present ultimate load carrying capacity and finite element analysis of optimally designed steel castellated beams, cellular beams and angelina beams (beams with sinusoidal web openings) under loading conditions. In the first part of the study, the design problem of web-expanded beams is formulated as optimum design problem. The minimum weight is taken as the design objective while the design constraints are implemented from AISC-ASD and BS-5950. The formulation of the design problem considering the limitations of the above mentioned turns out to be a discrete programming problem. Harmony search and particle swarm optimization methods are used for obtaining the solution of the design problem. The design algorithms based on these two techniques select the optimum IPE section to be used in the production of a web-expanded beam subjected to a general loading, the optimum geometric dimensions of different holes and the optimum number of holes in the mentioned beams. In the second part of the study, eighteen steel web-expanded beams are tested in a self-reacting frame to determine and compare the ultimate load carrying capacities of these beams. Finally, three-dimensional nonlinear finite element models of optimally designed cellular beams are also developed to validate experimental results and to perform elastic buckling analysis.

KEYWORDS: Steel Structures, Web-Expanded Beams, Load Carrying Capacity, Structural Optimization, Harmony Search Method, Particle Swarm Method

COMMITTEE: Assist. Prof. Dr. Ferhat ERDAL (Supervisor)
Assoc. Prof. Dr. Erkan DOĞAN
Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında, literatürde mevcut olan petek ve dairesel boşluklu kirişlere ek olarak yeni bir fikir olan sinüs eğrisi şeklindeki boşlukların elde edileceği biçimde kesilmiş kirişler de göz önüne alınmış ve üç farklı kiriş modelinin yük altındaki davranışları ve taşıma kapasiteleri kıyaslanmıştır. Bu kirişlerin optimizasyon problemlerinin çözümü harmoni arama ve parçacık kümesi yöntemlerinin adaptasyonu ile elde edilmeye çalışılarak ve aynı zamanda stokastik yöntemlerinin yapıya uyarlamaları gerçekleştirilerek iki yöntemin minimum ağırlığı bulması sürecinde sergilediği performanslar kıyaslanmıştır. Yük taşıma kapasiteleri hesaplanması amacıyla kirişler minimum ağırlığa sahip olacak şekilde boyutlandırılmıştır.

Kirişlerde kullanılacak olan IPE kodlu profillerin satır numaraları, boşlukların geometrik boyutları ve kirişlerdeki boşlukların sayısı değişken olarak alınmış ve bu parametrelerin davranış ve geometrik sınırlayıcılar altında kiriş ağırlığını minimum yapacak değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın deneysel sürecinde ise; Akdeniz Üniversitesi Yapı Laboratuvarında, optimizasyonu yapılan gövde yüksekliği artırılmış kirişler yük altındaki dayanımları yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir. NAP-284 kodlu bilimsel araştırma projesi ile farklı geometrik boşluklara sahip gövde yüksekliği artırılmış çelik I-kesitli kirişlerin en ekonomik olarak tasarlanabilmeleri, bu kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve bunun sonucu olarak da ülkemizdeki mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır.

Bu tezin hazırlanmasında her konuda bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, çok değerli hocam, danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ferhat ERDAL'a sonsuz saygılarımı sunar ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez çalışmamın ilerlemesinde büyük katkılarından dolayı değerli dostum Osman Tunca'ya çok teşekkür ederim.

Tez kapsamında vermiş oldukları önerilerden dolayı Doç. Dr. Ramazan Özçelik ve Doç. Dr. Erkan Doğan'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her konuda benden desteklerini esirgemeyen, Sevgili annem Ayhan TAŞ'a babam Dursun TAŞ'a canım kardeşlerim Serdar TAŞ ve Serhat TAŞ'a koşulsuz sevgileri, bugünlere gelmemdeki emekleri ve her daim yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI	3
2.1. GYA Kirişlerin Avantajları	3
2.2. GYA Kirişlerin Kullanım Alanları	5
2.3. GYA Kirişlerin Göçme Durumları	6
2.3.1. İkincil eğilme (Secunder-Vierendeel Bending)	6
2.3.2. Gövde burkulması (web-post buckling).....	6
2.3.3. Yanal burkulma (lateral buckling)	7
2.3.4. Kaynak bölgesinden kopma (Rupture of the welded joint)	7
2.3.5. Basit eğilme (flexure bending).....	8
2.4. Literatür Araştırması.....	8
3. MATERYAL VE METOT.....	11
3.1. Kirişlerin Optimizasyonunda Kullanılan Yöntemler	11
3.1.1. Harmoni arama yöntemi.....	12
3.1.2. Partikül küme yöntemi	14
3.2. Kirişlerin Optimizasyon Probleminin Matematiksel Modeli.....	15
3.2.1. Sinüsoidal boşluklu kirişler.....	15
3.2.2. Dairesel boşluklu kirişler	17
3.2.3. Petek boşluklu kirişler.....	18
3.3. Davranış Sınırlayıcıları	20
3.3.1. İkincil eğilme (Vierendeel bending) kapasitesi:	20
3.3.2. Kesme kuvveti kapasitesi	21
3.3.3. Kaynak bölgesinde kopma	22
3.3.4. Gövde burkulması	23

3.4. Tasarım Örneği	24
3.5. Kirişlerin Deney Öncesi Hazırlıkları	29
3.5.1. GYA kirişlerin elde edilmesi	29
3.5.2. Kirişlerin test edilmesi	30
3.6. Kirişlerin Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi	33
3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi.....	35
3.7.1. Mesh tipinin belirlenmesi.....	36
3.7.2. Mesh boyutlarının belirlenmesi.....	38
3.7.3. Sınır şartları (mesnetler ve yükler).....	39
4. BULGULAR	44
4.1. IPE 200 Testleri (tekil yükleme).....	44
4.1.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_200 kirişleri.....	45
4.1.1.1. IPE_SB_200_Test_1	46
4.1.1.2. IPE_SB_200_Test_2	47
4.1.2. Petek boşluklu IPE_200 kirişleri.....	49
4.1.2.1. IPE_PB_200_Test_1	50
4.1.2.2. IPE_PB_200_Test_2	51
4.1.3. Dairesel boşluklu IPE_200 kirişleri	53
4.1.3.1. IPE_DB_200_Test_1	54
4.1.3.2. IPE_DB_200_Test_2	55
4.1.4. Orijinal IPE200 kirişi	57
4.1.5. IPE_200 kirişlerinin karşılaştırılması.....	58
4.2. IPE 240 Testleri (yayıllı yükleme).....	60
4.2.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_240 kirişleri.....	61
4.2.1.1. IPE_SB_240_Test_1	62
4.2.1.2. IPE_SB_240_Test_2	63
4.2.2. Petek boşluklu IPE_240 kirişleri.....	65
4.2.2.1. IPE_PB_240_Test_1	66
4.2.2.2. IPE_PB_240_Test_2	67
4.2.3. Dairesel boşluklu IPE_240 kirişleri	69
4.2.3.1. IPE_DB_240_Test_1	70
4.2.3.2. IPE_DB_240_Test_2	71
4.2.4. Orijinal IPE240 kirişi	73
4.2.5. IPE_240 kirişlerinin karşılaştırılması.....	74

4.3. IPE 300 Testleri (iki noktadan yükleme).....	76
4.3.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_300 kirişleri.....	77
4.3.1.1. IPE_SB_300_Test_1	78
4.3.1.2. IPE_SB_300_Test_2	79
4.3.2. Petek boşluklu IPE_300 kirişleri.....	81
4.3.2.1. IPE_PB_300_Test_1	82
4.3.2.2. IPE_PB_300_Test_2	83
4.3.3. Dairesel boşluklu IPE_300 kirişleri	85
4.3.3.1. IPE_DB_300_Test_1	86
4.3.3.2. IPE_DB_300_Test_2	87
4.3.4. Orijinal IPE300 kirişi	89
4.3.5. IPE_300 kirişlerinin karşılaştırılması.....	90
4.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi.....	92
4.4.1. IPE 200 profilleri SEA (tekil yükleme)	93
4.4.1.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_200 kirişi.....	93
4.4.1.2. Petek boşluklu IPE_200 kirişi.....	97
4.4.1.3. Dairesel boşluklu IPE_200 kirişi	101
4.4.1.4. IPE_200 kirişlerinin karşılaştırılması.....	105
4.4.2. IPE 240 profilleri SEA (yayılı yükleme)	106
4.4.2.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_240 kirişi.....	106
4.4.2.2. Petek boşluklu IPE_240 kirişi.....	110
4.4.2.3. Dairesel boşluklu IPE_240 kirişi	114
4.4.2.4. IPE_240 kirişlerinin karşılaştırılması.....	118
4.4.3. IPE 300 profilleri SEA (iki noktadan yükleme).....	119
4.4.3.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_300 kirişi.....	119
4.4.3.2. Petek boşluklu IPE_300 kirişi.....	123
4.4.3.3. Dairesel boşluklu IPE_300 kirişi	127
4.4.3.4. IPE_300 kirişlerinin karşılaştırılması.....	131
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	132
6. KAYNAKLAR.....	135
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Alan
I	Atalet Momenti
σ	Gerilme
σ_y	Akma Gerilmesi
E	Elastisite Modülü
P_y	Akma Kapasitesi

Kısaltmalar

GYA	Gövde Yüksekliği Artırılmış
SB	Sinüsoidal Boşluklu
PB	Petek Boşluklu
DB	Dairesel Boşluklu
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
HA	Harmoni Arama
PK	Partikül Küme

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Dairesel, petek ve sinüsoidal gövde yüksekliği artırılmış çelik kiriş.....	3
Şekil 2.2. Kat yüksekliği farkı için standart kiriş ile GYA kirişin gösterimi.....	3
Şekil 2.3. Standart kirişin ilk boyu ile kesim ve kaynaklama sonundaki boy değişimi	4
Şekil 2.4. Standart kiriş ile aynı atalet moment değerine sahip GYA kiriş	4
Şekil 2.5. a) Capitol Otoparkı, Douglas	5
b) Stamford Bridge Stadyumu, Londra	5
c) ASTA alışveriş merkezi, Tramworth	5
d) Eastlake ofis binası, Seattle	5
Şekil 2.6. İkincil eğilme (Durif vd 2013).....	6
Şekil 2.7. Gövde burkulması (Neto vd 2015)	6
Şekil 2.8. Yanal burkulma (Showkati vd 2012).....	7
Şekil 2.9. Kaynak bölgesinden kopma (Hussain ve Speirs 1971).....	7
Şekil 2.10. Basit eğilme (Halleux 1967)	8
Şekil 3.1. Sinüsoidal boşluklu kirişin geometri ve notasyonları.....	16
Şekil 3.2. Dairesel boşluklu çelik kirişin geometri ve notasyonları.....	17
Şekil 3.3. Petek boşluklu çelik kirişin geometri ve notasyonları	19
Şekil 3.4. İkincil eğilmeden dolayı oluşacak kritik kesitin belirlenmesi	20
Şekil 3.5. Kirişin üst gövdesinde oluşan yanıl kesme (Erdal vd 2011).....	22
Şekil 3.6. Kiriş gövdesinde kaynak işlemi	22
Şekil 3.7. Kirişlerin gövde bölgesinde oluşan kritik kesitler	23
Şekil 3.8. Sinüsoidal boşluklu çelik kiriş	24
Şekil 3.9. Sinüsoidal boşluklu çelik kiriş	25
Şekil 3.10. IPE 200 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_200) detayı	26
Şekil 3.11. IPE 200 dairesele boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_200) detayı	26
Şekil 3.12. IPE 200 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_200) detayı.....	26

Şekil 3.13. IPE 240 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_240) detayı	27
Şekil 3.14. IPE 240 dairesel boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_240) detayı	27
Şekil 3.15. IPE 240 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_240) detayı	27
Şekil 3.16. IPE 300 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_300) detayı	28
Şekil 3.17. IPE 300 dairesel boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_300) detayı	28
Şekil 3.18. IPE 300 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_300) detayı	28
Şekil 3.19. a) Kirişlerin CNC ile gövdesinden kesilmesi.....	29
b) Alt ve üst başlıkların kaydırılarak birleştirilmesi	29
c) Alt ve üst başlıkların sabitlenerek kaynak yapılması.....	29
d) Artan parçaların kesilmesi	29
Şekil 3.20. a) Yük hücresi	31
b) Sabit mesnet sistemi	31
c) Hareketli mesnet sistemi	31
Şekil 3.21. Deplasman ölçerler ve konumları	31
Şekil 3.22. Tekil yükleme test düzeneği	32
Şekil 3.23. IPE_200_240_300 profillerden alınan numunelerin boyutları	33
Şekil 3.24. GYA kirişlerden alınan numune örnekleri.....	33
Şekil 3.25. Çekme testi makinesi	33
Şekil 3.26. Kuponların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.....	34
Şekil 3.27. GYA kirişlerin katı modelinin oluşturulması ve SEA	35
Şekil 3.28. IPE_SB_200 kirişi için girilen malzeme değerleri	36
Şekil 3.29. Tetrahedrons metodu ile gösterim	37
Şekil 3.30. Hex-Dominant metodu ile gösterim	37
Şekil 3.31. Automatic metodu ile gösterim.....	37
Şekil 3.32. Farklı mesh boyutları için gerilme değerleri.....	38
Şekil 3.33. Tetrahedrons mesh tipi (maksimum 25 mm).....	38
Şekil 3.34. Tekil, yayılı ve iki noktadan yükleme durumları.....	39

Şekil 3.35. Yüklemenin adım adım verilmesi.....	40
Şekil 3.36. Lineer ve lineer olmayan analiz kıyaslanması	40
Şekil 3.37. Hareketli mesnet	41
Şekil 3.38. Hareketli mesnet; a) SEA mesnet serbestlikleri.....	41
b) Deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırma.....	41
Şekil 3.39. Sabit mesnet	42
Şekil 3.40. Sabit mesnet; a) SEA mesnet serbestlikleri	42
b) Deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırma.....	42
Şekil 3.41. Analiz ayarları.....	43
Şekil 4.1. Sinüsoidal boşluklu kiriş testi; tekil yükleme durumu.....	45
Şekil 4.3. IPE_SB_200_Test_1; tekil yükleme altında yanıl burkulma durumu	46
Şekil 4.4. IPE_SB_200_Test_1; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiğı.....	46
Şekil 4.5. IPE_SB_200_Test_2; tekil yükleme altında yanıl burkulma durumu	47
Şekil 4.6. IPE_SB_200_Test_2; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiğı.....	47
Şekil 4.7. IPE_SB_200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikleri.....	48
Şekil 4.8. IPE_SB_200 kirişleri deney fotoğraflar.....	48
Şekil 4.9. Petek boşluklu kiriş testi; tekil yükleme durumu.....	49
Şekil 4.11. IPE_PB_200_Test_1; yanıl burkulma ve yerel burkulma.....	50
Şekil 4.12. IPE_PB_200_Test_1; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiğı.....	50
Şekil 4.13. IPE_PB_200_Test_2; yanıl burkulma ve yerel burkulma durumu	51
Şekil 4.14. IPE_PB_200_Test_2; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiğı.....	51
Şekil 4.15. IPE_PB_200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikleri.....	52
Şekil 4.16. IPE_PB_200 kirişleri deney fotoğrafları.....	52
Şekil 4.17. Dairesel boşluklu kiriş testi; tekil yükleme durumu	53
Şekil 4.18. IPE_200 dairesele boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_200) detayı	53

Şekil 4.19. IPE_DB_200_Test_1; tekil yükleme altında göçme durumu	54
Şekil 4.20. IPE_DB_200_Test_1; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiği	54
Şekil 4.21. IPE_DB_200_Test_2; a) Yanal burkulma	55
b) Yerel burkulma	55
Şekil 4.22. IPE_DB_200_Test_2; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiği	55
Şekil 4.23. IPE_DB_200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikleri	56
Şekil 4.24. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğrafları	56
Şekil 4.25. Orijinal IPE200 kirişi testi; tekil yükleme durumu	57
Şekil 4.26. IPE200; tekil yükleme altında göçme durumu	57
Şekil 4.27. IPE200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikleri	57
Şekil 4.28. IPE_SB_PB_DB_200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikler	58
Şekil 4.29. IPE_SB_PB_DB_200 kirişlerinin normalize edilmesi	59
Şekil 4.30. IPE_SB_240 sinüsoidal boşluklu kiriş deneyi; yayılı yükleme durumu	61
Şekil 4.31. IPE_240 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_240) detayı	61
Şekil 4.32. IPE_SB_240_Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumu	62
Şekil 4.33. IPE_SB_240_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	62
Şekil 4.34. IPE_SB_240_Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumu	63
Şekil 4.35. IPE_SB_240_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	63
Şekil 4.36. IPE_SB_240 yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri	64
Şekil 4.37. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğrafları	64
Şekil 4.38. IPE_PB_240; petek boşluklu kiriş deneyi; yayılı yükleme durumu	65
Şekil 4.39. IPE 240 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_240) detayı	65
Şekil 4.40. IPE_PB_240_Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumu	66
Şekil 4.41. IPE_PB_240_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	66
Şekil 4.42. IPE_PB_240_Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumu	67

Şekil 4.43. IPE_PB_240_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği.....	67
Şekil 4.44. IPE_PB_240 yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri	68
Şekil 4.45. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğraflar.....	68
Şekil 4.46. IPE_DB_240 dairesel boşluklu kiriş deneyi; yayılı yükleme durumu	69
Şekil 4.47. IPE_240 dairesel boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_240) detayı	69
Şekil 4.48. IPE_DB_240_Test_1; yayılı yük altında göçme durumu.....	70
Şekil 4.49. IPE_DB_240_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	70
Şekil 4.50. IPE_DB_240_Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumu	71
Şekil 4.51. IPE_DB_240_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	71
Şekil 4.52. IPE_DB_240; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafikleri.....	72
Şekil 4.53. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğraflar.....	72
Şekil 4.54. a) IPE240 yayılı yükleme test düzeneği	73
b) Yanal Burkulma.....	73
Şekil 4.55. IPE240; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği.....	73
Şekil 4.56. IPE_SB_PB_DB_240 yayılı yükleme altında yük-deplasman grafikler	74
Şekil 4.57. IPE_SB_PB_DB_240 yayılı yükleme altında performansları.....	75
Şekil 4.58. IPE_SB_300; sinüsoidal boşluklu kiriş deneyi; iki noktadan yükleme	77
Şekil 4.60. IPE_SB_300_Test_1; iki noktadan yükleme altında göçme durumu	78
Şekil 4.61. IPE_SB_300_Test_1; yük-deplasman grafiği	78
Şekil 4.62. IPE_SB_300_Test_2; iki noktadan yükleme altında göçme durumu.....	79
Şekil 4.63. IPE_SB_300_Test_2; yük-deplasman grafiği	79
Şekil 4.64. IPE_SB_300; yük-deplasman grafikleri	80
Şekil 4.65. IPE_SB_300 kirişi deney fotoğraflar.....	80
Şekil 4.66. IPE_PB_300; petek boşluklu kiriş deneyi; iki noktadan yükleme.....	81
Şekil 4.67. IPE_300 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_300) detayı.....	81

Şekil 4.68. IPE_PB_300; iki noktadan yükleme altında göçme durumu	82
Şekil 4.69. IPE_PB_300_Test_1; yük-deplasman grafiği	82
Şekil 4.70. IPE_PB_300; iki noktadan yükleme altında göçme durumu	83
Şekil 4.71. IPE_PB_300_Test_2; yük-deplasman grafiği	83
Şekil 4.72. IPE_PB_300; iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri	84
Şekil 4.73. IPE_SB_300 kirişi deney fotoğraflar	84
Şekil 4.74. IPE_DB_300; dairesel boşluklu kiriş deneyi; iki noktadan yükleme	85
Şekil 4.75. IPE 300 dairesel boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_300) detayı	85
Şekil 4.76. IPE_DB_300_Test_1; iki noktadan yükleme altında göçme durumu	86
Şekil 4.77. IPE_DB_300_Test_1; yük-deplasman grafiği	86
Şekil 4.78. IPE_DB_300_Test_2; iki noktadan yükleme altında göçme durumu	87
Şekil 4.79. IPE_DB_300_Test_2; yük-deplasman grafiği	87
Şekil 4.80. IPE_DB_300; iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri	88
Şekil 4.81. IPE_DB_300 kirişi deney fotoğraflar	88
Şekil 4.82. IPE300 iki noktadan yükleme altında göçme durumu	89
Şekil 4.83. IPE300; iki noktadan yükleme altında yük-deplasman grafiği	89
Şekil 4.84. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri yük-deplasman grafikleri	90
Şekil 4.85. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri normalize edilmesi	91
Şekil 4.86. Sinüsoidal boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; tekil yükleme durumu ...	93
Şekil 4.87. Sinüsoidal boşluklu IPE_200 kirişinin ağırlara ayrılması	93
Şekil 4.88. IPE_SB_200 kirişi SEA orta bölgesi gerilme dağılımı	94
Şekil 4.89. IPE_SB_200 kirişi SEA gerilme dağılımı	94
Şekil 4.90. IPE_SB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında deplasmanlar	95
Şekil 4.91. IPE_SB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri	95

Şekil 4.92. IPE_SB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler.....	95
Şekil 4.93. IPE_SB_200 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	96
Şekil 4.94. IPE_SB_200 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması.....	96
Şekil 4.95. Petek boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; tekil yükleme durumu	97
Şekil 4.96. Petek boşluklu IPE_200 kirişinin ağırlara ayrılması	97
Şekil 4.97. IPE_PB_200 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	98
Şekil 4.98. IPE_PB_200 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	98
Şekil 4.99. IPE_PB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman.....	99
Şekil 4.100. IPE_PB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri.....	99
Şekil 4.101. IPE_PB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler.....	99
Şekil 4.102. IPE_PB_200 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	100
Şekil 4.103. IPE_PB_200 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması ...	100
Şekil 4.104. Dairesel boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; tekil yükleme durumu....	101
Şekil 4.105. Dairesel boşluklu IPE_200 kirişinin ağırlara ayrılması	101
Şekil 4.106. IPE_DB_200 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı.....	102
Şekil 4.107. IPE_DB_200 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	102
Şekil 4.108. IPE_DB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman ..	103
Şekil 4.109. IPE_DB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri	103
Şekil 4.110. IPE_DB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler	103
Şekil 4.111. IPE_DB_200 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	104
Şekil 4.112. IPE_DB_200 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması...	104
Şekil 4.113. Sinüsoidal boşluklu kiriş SEA; yayılı yükleme durumu.....	106
Şekil 4.114. Sinüsoidal boşluklu IPE_240 kirişinin ağırlara ayrılması.....	106
Şekil 4.115. IPE_SB_240 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	107

Şekil 4.116. IPE_SB_240 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	107
Şekil 4.117. IPE_SB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman.	108
Şekil 4.118. IPE_SB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmeleri.....	108
Şekil 4.119. IPE_SB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında normal gerilmeler.....	108
Şekil 4.120. IPE_SB_240 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	109
Şekil 4.121. IPE_SB_240 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması ...	109
Şekil 4.122. Petek boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; yayılı yükleme durumu	110
Şekil 4.123. Petek boşluklu IPE_240 kirişinin ağırlara ayrılması.....	110
Şekil 4.124. IPE_PB_240 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	111
Şekil 4.125. IPE_PB_240 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	111
Şekil 4.126. IPE_PB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman.	112
Şekil 4.127. IPE_PB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmeleri.....	112
Şekil 4.128. IPE_PB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında normal gerilmeler.....	112
Şekil 4.129. IPE_PB_240 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	113
Şekil 4.130. IPE_PB_240 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması ...	113
Şekil 4.131. Dairesel boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; yayılı yükleme durumu.	114
Şekil 4.132. Dairesel boşluklu IPE_240 kirişinin ağırlara ayrılması	114
Şekil 4.133. IPE_DB_240 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı.....	115
Şekil 4.134. IPE_DB_240 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	115
Şekil 4.135. IPE_DB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman	116
Şekil 4.136. IPE_DB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmeleri	116
Şekil 4.137. IPE_DB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında normal gerilmeler	116
Şekil 4.138. IPE_DB_240 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	117
Şekil 4.139. IPE_DB_240 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması...	117

Şekil 4.140. Sinüsoidal boşluklu kiriş SEA; iki noktadan yükleme durumu	119
Şekil 4.141. Sinüsoidal boşluklu IPE_300 kirişinin ağırlara ayrılması.....	119
Şekil 4.142. IPE_SB_300 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	120
Şekil 4.143. IPE_SB_300 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	120
Şekil 4.144. IPE_SB_300 kirişi maksimum deplasman	121
Şekil 4.145. IPE_SB_300 kirişi üzerindeki kesme gerilmeleri.....	121
Şekil 4.146. IPE_SB_300 kirişi üzerindeki normal gerilmeler.....	121
Şekil 4.147. IPE_SB_300 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	122
Şekil 4.148. IPE_SB_300 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması ...	122
Şekil 4.149. Petek boşluklu kiriş SEA; iki noktadan yükleme durumu	123
Şekil 4.150. Petek boşluklu IPE_300 kirişinin ağırlara ayrılması.....	123
Şekil 4.151. IPE_PB_300 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	124
Şekil 4.152. IPE_PB_300 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	124
Şekil 4.153. IPE_PB_300 kirişi maksimum deplasman	125
Şekil 4.154. IPE_PB_300 kirişi üzerindeki kesme gerilmeleri.....	125
Şekil 4.155. IPE_PB_300 kirişi üzerindeki normal gerilmeler.....	125
Şekil 4.156. IPE_PB_300 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	126
Şekil 4.157. IPE_PB_300 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması ...	126
Şekil 4.158. Dairesel boşluklu kiriş SEA; iki noktadan yükleme durumu.....	127
Şekil 4.159. Dairesel boşluklu IPE_300 kirişinin ağırlara ayrılması	127
Şekil 4.160. IPE_DB_300 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı.....	128
Şekil 4.161. IPE_DB_300 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	128
Şekil 4.162. IPE_DB_300 kirişi maksimum deplasman.....	129
Şekil 4.163. IPE_DB_300 kirişi üzerindeki kesme gerilmeleri.	129

Şekil 4.164. IPE_DB_300 kirişi üzerindeki normal gerilmeler	129
Şekil 4.165. IPE_DB_300 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri.....	130
Şekil 4.166. IPE_DB_300 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması...	130
Şekil 5.1. IPE_200_240_300 kirişlerinin normalize edilmesi	134



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kaynak kalınlığı parametreleri	23
Çizelge 3.2. IPE_SB_300 kirişi için bulunan sonuçların kıyaslanması	25
Çizelge 3.3. Kirişlerin adlandırılması ve uygulanan yükleme tipleri.....	30
Çizelge 3.4. Profilin mukavemet özellikleri	34
Çizelge 3.5. Profilin mukavemet özellikleri	35
Çizelge 3.6. Mesh tipleri için düğüm ve parça sayısı	36
Çizelge 4.1. IPE_SB_PB_DB_200 kirişleri test sayıları	44
Çizelge 4.2. IPE_SB_PB_DB_200 kirişleri geometrik ölçüleri	44
Çizelge 4.3. IPE_SB_PB_DB_200 kirişleri test sonuçları	59
Çizelge 4.4. IPE_SB_PB_DB_240 kirişleri test sayıları	60
Çizelge 4.5. IPE_SB_PB_DB_240 kirişleri geometrik ölçüleri	60
Çizelge 4.6. IPE_SB_PB_DB_240 kirişleri test sonuçları	75
Çizelge 4.7. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri test sayıları	76
Çizelge 4.8. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri geometrik ölçüleri	76
Çizelge 4.9. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri test sonuçları	91
Çizelge 4.10. Sonlu elemanlar analizi girdileri	92
Çizelge 4.11. IPE_200 kirişleri sonlu elemanlar analizi sonuçları	105
Çizelge 4.12. IPE_200 kirişleri deneysel ve SEA verileri karşılaştırılması.....	105
Çizelge 4.13. IPE_240 kirişleri sonlu elemanlar analizi sonuçları	118
Çizelge 4.14. IPE_240 kirişleri deneysel ve SEA verileri karşılaştırılması.....	118
Çizelge 4.15. IPE_300 kirişleri sonlu elemanlar analizi sonuçları	131
Çizelge 4.16. IPE_300 kirişleri deneysel ve SEA verileri karşılaştırılması.....	131
Çizelge 5.1. IPE_SB_PB_DB_200_240_300 kirişleri test sonuçları genel özeti	133
Çizelge 5.2. IPE_SB_PB_DB_200_240_300 kirişleri SEA sonuçları genel özeti.....	133

1. GİRİŞ

Çelik taşıyıcı sistemlerin betonarme yapılara kıyasla belirli üstün nitelikleri bulunmaktadır. Yüksek mukavemete sahip olmaları ve tasarımlarının hafifliği sebebiyle deprem yüklerine asgari düzeyde maruz kalmaları bu niteliklerin başında gelir. Çeliğin malzeme özelliği olarak çekme ve basınç dayanımlarının birbirine eşit olması, çekme mukavemeti düşük yapı malzemeleriyle yapılması mümkün olmayan sistemlere yapılabilirlik kazandırması açısından iyi bir çözüm yolu olarak düşünülebilir. Çelik taşıyıcı sistemli binalar, mühendislik uygulamaları yönünden gelişmiş ülkelerin yapı sektöründe oldukça fazla yer bulmalarına karşın ülkemizde yüksek maliyetleri nedeniyle betonarme sistemli binalara oranla çok daha az sayıda uygulanma şansı bulmuşlardır. Şüphesiz, çelik yapıların daha ekonomik olarak boyutlandırılıp inşa edilebilmesi, sismik performansları oldukça yüksek olan bu yapıların ülkemiz gibi aktif deprem riski taşıyan bölgelerde yaygınlaşmasına katkı sağlayacak ve böylece deprem sonucu oluşacak hasarlar minimum seviyeye indirilecektir.

Büyük açıklıkların olduğu sistemlerde, betonarme yapı malzemeleri ile geçilemeyen mesafeler çelik taşıyıcı sistemlerle rahatlıkla geçilebilmektedir. Gövde açıklıklı çelik kirişler bu sistemlere örnek olarak gösterilebilirler. Gelişmiş tasarımları kendilerine dayanım, derinlik, boyut ve boşlukların yerleri için diğer kirişlere oranla daha fazla esneklik sağlamaktadır. Bu kirişlerin üretiminin asıl amacı; mevcut kirişin derinliğini, atalet momentini ve kesit katsayısını arttırmaktır. Artan atalet momenti ve kesit katsayısı kirişin dayanımının ve rijitliğinin yükselmesini sağlar. Bu kirişler ağırlık ve maliyet tasarrufu sağlamaları nedeniyle alışveriş merkezleri, spor salonları, ofis binaları ve otoparklar gibi ara kolonların istenmediği büyük açıklı alanların kapatılmasında uygun çözüm sağlamaktadırlar.

Yapı optimizasyonu ülkemizdeki mühendislik uygulamalarında hemen hemen hiç kullanılmamaktadır. Halbuki, yapı optimizasyonu ile, elemanları hazır profil listelerinden seçilen çelik yapıların en düşük ağırlıkla tasarlanması, dolayısıyla en düşük maliyetle inşa edilmesi mümkündür. (Kochenberger ve Glover 2003, Dreo vd 2006). literatürde mevcut olan petek ve dairesel boşluklu kirişlere ek olarak yeni bir fikir olan sinüs eğrisi şeklindeki boşluklu çelik kirişlerin yapı optimizasyonu yöntemleri ile en ekonomik olarak tasarlanabilmeleri, bu kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve bunun sonucu olarak da ülkemizdeki mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarının yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda gövde yüksekliği artırılmış çelik kirişlerin optimum boyutlandırma problemleri formüle edilerek elde edilen ayırık değişkenli optimizasyon probleminin çözümü, geliştirilmiş olan harmoni arama ve parçacık sürü meta bulgusal optimizasyon teknikleri kullanılarak elde edilmiştir (Lee ve Geem 2004, Perez ve Behdinan 2007). Bu kirişlerin optimum tasarımları kapsamında, IPE profil kesitleri, kiriş geometrisi ve boşluklar arası mesafe ile ilgili detaylar tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Bu sistemlerin tasarım kriterleri için BS (British Standart) şartnamesinde öngörülen hükümler esas alınmıştır (BS-5950, 1990).

Çalışmanın ikinci aşaması olan deneysel süreçte; ilk kısımda optimizasyonu yapılan çelik IPE kesit gövde açıklıklı kirişlerin tekil, yayılı ve iki noktadan yükleme altındaki dayanımları hidrolik güç üniteli basınç silindrine sahip yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir.

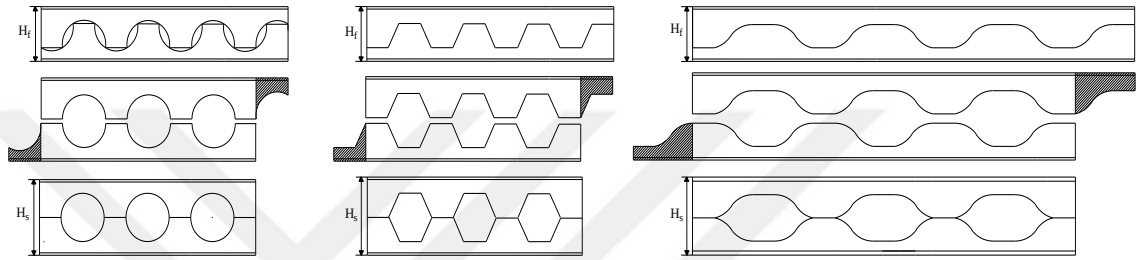
Gövde açıklıklı kirişler tekil, iki noktadan ve yayılı yüke maruz kaldıklarında I-kesitli profilin gövde kısmının kesmedeki zayıflığı verimliliklerini azaltır. Bu tez kapsamında boşluk çevrelerine yerel burkulma ve moment-kesme aktarımı değerlendirmelerine bağlı olarak optimizasyonu yapılan gövde yüksekliği artırılmış çelik kirişlerin boşluk geometrilerinin yük taşıma kapasitelerine etkisi incelenmiştir.



2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

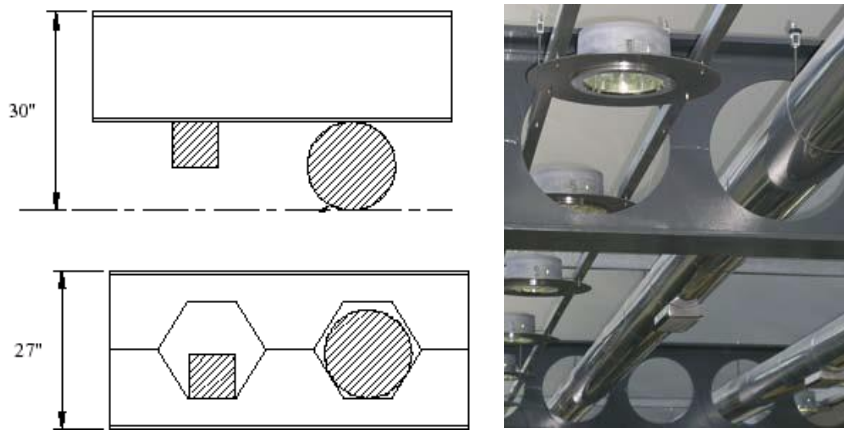
2.1. GYA Kirişlerin Avantajları

Gövde yüksekliği artırılmış kirişler; çelik I-kesit profilin gövdesi boyunca geometrisine bağlı olarak yarım daire (Knowless 1985), zigzag (Ward 1990) veya sinüs eğrisi (Doughery 1993, Lawson 1985) şeklinde CNC (Bilgisayar Nümerik Kontrolü) yöntemi ile kesilip elde edilen alt ve üst parçalarının kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda oluşurlar. Şekil 2.1’de gösterilen bu işlemler sonucunda kirişin yüksekliği, kesit katsayısı ve atalet momenti artarken kirişin ağırlığı ilk duruma oranla azalır.



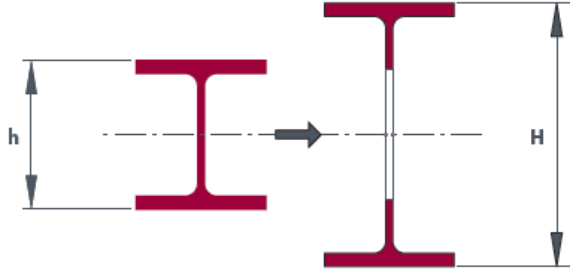
Şekil 2.1. Dairesel, petek ve sinüsoidal gövde yüksekliği artırılmış çelik kiriş

Yapılarda kat yükseklik sınırlayıcıları önemli sorunlardan birini oluşturmaktadır. Kesim ve yeniden kaynaklanma sonrası daha yüksek ve daha hafif olan GYA kirişlerin gövde bölgesinde oluşan boşluklardan elektrik, su ve mekanik tesisat boruları rahatça geçebileceğinden dolayı Şekil 2.2’de gösterildiği gibi yapıda kat yüksekliğinden kazanç olur.



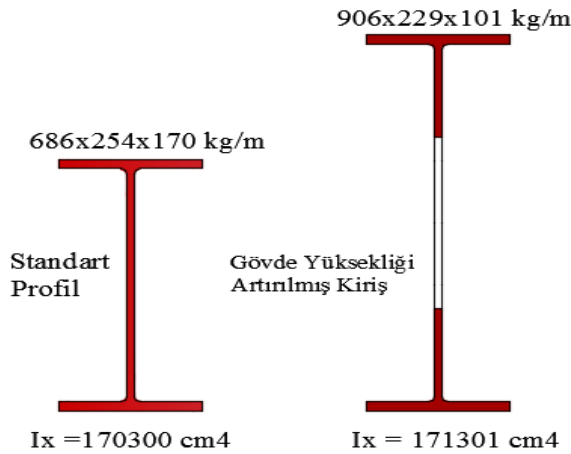
Şekil 2.2. Kat yüksekliği farkı için standart kiriş ile GYA kirişin gösterimi

Petek kirişlerin gövdesi boyunca geometrisine bağlı olarak kesilip elde edilen alt ve üst parçalarının kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda Şekil 2.3’de gösterildiği üzere kirişin yüksekliği buna bağlı olarak da kesit katsayısı ve atalet momenti artar.



Şekil 2.3. Standart kirişin ilk boyu ile kesim ve kaynaklama sonundaki boy değişimi

Bunların dışında; şantiyedeki yüksek maliyetli güçlendirme işlemlerine gerek kalmadan hafif ve orta büyüklükteki tekil yükleri taşıyabilmeleri, benzer amaçlı kiriş kesitlere oranla daha az yatay bağlantı gerektirmeleri ve kiriş boyutlarındaki değişim duvar yükseklikleri ile yapı maliyetinin azalması önemli bir etken olması GYA kirişlerin diğer avantajlarıdır. Bu kirişlerin en önemli avantajlarından birisi de ağırlık azaltılmasıdır. Şekil 2.4’te 686x254x170 UB standart I profil ile 906x229x101 UB GYA kiriş profilin atalet momentleri yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen GYA kiriş %40 oranında daha hafiftir.



Şekil 2.4. Standart kiriş ile aynı atalet moment değerine sahip GYA kiriş

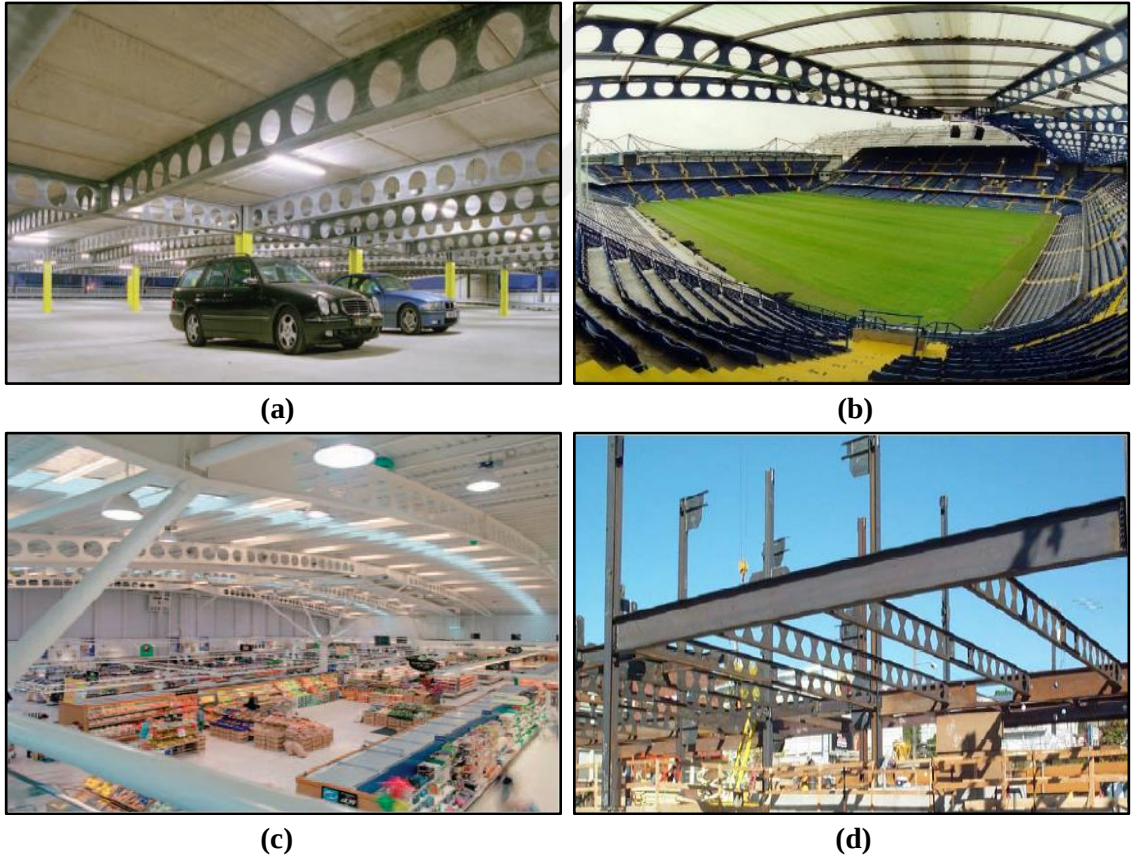
Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin avantajları ve kullanımında dikkat edilmesi gerekli hususlar şöyle sıralanabilir (Rozakdemir 2010).

- Düşey eğilme rijitliğini artırır.
- Normal kesitli kirişlere göre aynı ağırlıkta olmasına rağmen kesit ataletleri daha büyüktür.
- Kısa açıklıklardan uzun açıklıklara kadar birçok kullanım alanı vardır.

- Çok katlı yapılarda kiriş gövdelerindeki boşluklar boru geçişine izin verdiği için tesisat işleri kolaylaşır.
- Beton tabliyesi dahil toplam döşeme derinliği azaltılmış olur.
- Zarif görünümü sayesinde kirişlerin görünmesinin kaçınılmaz olduğu durumlarda tercih edilebilirler.
- Gövdedeki geniş boşluklar sebebiyle dolu gövdeli kirişlere göre farklı yapısal davranışları vardır.
- Noktasal yüklerin belirgin olduğu koşullarda kullanımına dikkat edilmelidir.
- Boşlukların köşelerinde oluşan gerilme birikimleri dinamik yüklerin bulunduğu yerlerde kullanımına dikkat etmek gereklidir. Bu durumda dairesel boşluklu kiriş kullanımı değerlendirilebilir.

2.2. GYA Kirişlerin Kullanım Alanları

GYA kirişler özellikle büyük açıklıklarda kesit küçültülmesi ve etkileyici mimari görünümü sayesinde otopark, spor salonu, alışveriş merkezi, ofis binası gibi ara kolonların istenmediği yapılarda kullanılırlar (Şekil 2.5).

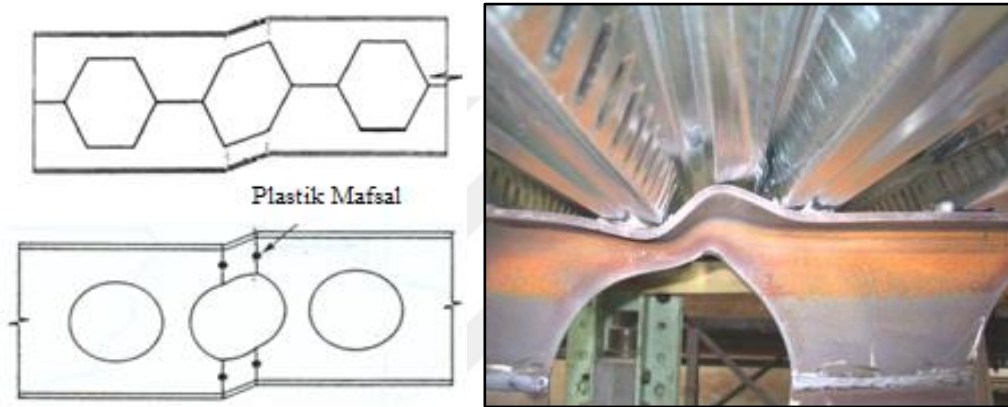


Şekil 2.5. a) Capitol Otoparkı, Douglas
 b) Stamford Bridge Stadyumu, Londra
 c) ASTA alışveriş merkezi, Tramworth
 d) Eastlake ofis binası, Seattle

2.3. GYA Kirişlerin Göçme Durumları

2.3.1. İkincil eğilme (Secunder-Vierendeel Bending)

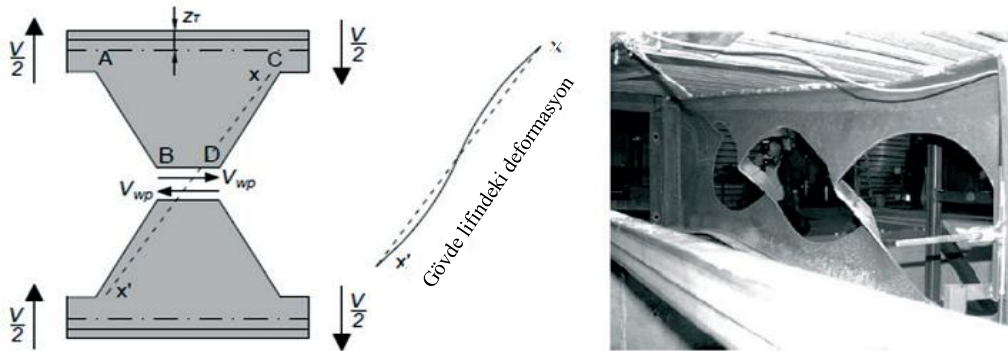
Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerde eğilme altındaki kirişin alt ve üst parçalarının esneklik kapasitesinin tahkik edilmesi gerekir. Gövde yüksekliği artırılmış kiriş kesmeye maruz kaldığı zaman, kiriş boşluğunun alt ve üst kısmındaki T-kesitleri birincil ve ikincil momentlerin yanı sıra uygulanan kesmeyi de taşımaktadır. Birincil moment kiriş kesiti üzerindeki klasik eğilme momentidir. Kesme kuvvetlerinin her bir boşluk boyunca aktarılması ise ikincil eğilme (vierendeel bending) momentine neden olur. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere vierendeel momentinden oluşacak bu kusur en yüksek kesme kuvvetinin olduğu boşlukta meydana gelir (Ward 1990).



Şekil 2.6. İkincil eğilme (Durif vd 2013)

2.3.2. Gövde burkulması (web-post buckling)

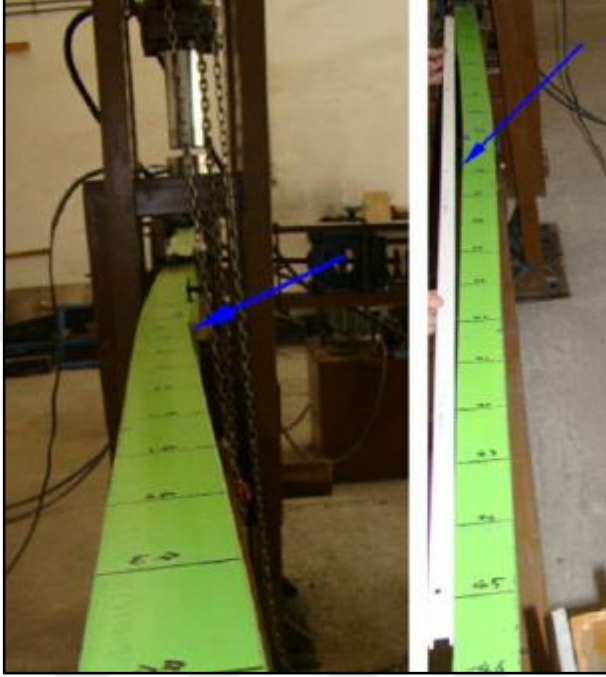
Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerde gövde yüksekliğinin artması kirişte stabilite kaybı riskini de beraberinde getirir. Narin gövde kesitinde global momente bağlı olarak oluşan aksenal kuvvet, global kesme kuvvetinden dolayı oluşan kesme kuvveti ve ikincil (vierendeel) momentin eş zamanlı olarak birlikte çalıştığı karmaşık ve önemli bir göçme modudur (Tsavdaridis ve D'Mello 2011).



Şekil 2.7. Gövde burkulması (Neto vd 2015)

2.3.3. Yanal burkulma (lateral buckling)

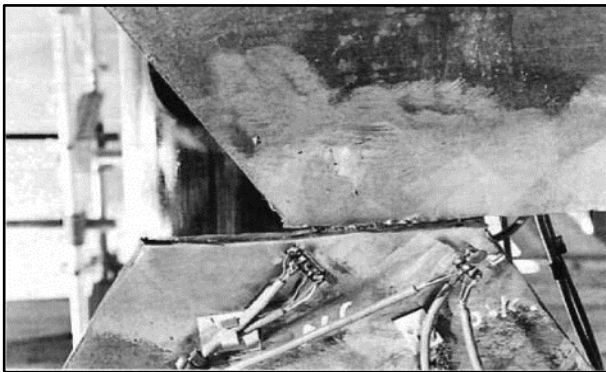
Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin derinliğindeki artış güçlü eksendeki atalet momentini artırmasına karşın zayıf ekseninde değişmemektedir. Bu durum Şekil 2.8’de görüldüğü üzere global momentin etkisiyle kiriş üst başlığındaki normal basınç kuvvetleri altında zayıf eksen etrafında yanal olarak burkulmasına sebebiyet verebilmektedir.



Şekil 2.8. Yanal burkulma (Showkati vd 2012)

2.3.4. Kaynak bölgesinden kopma (Rupture of the welded joint)

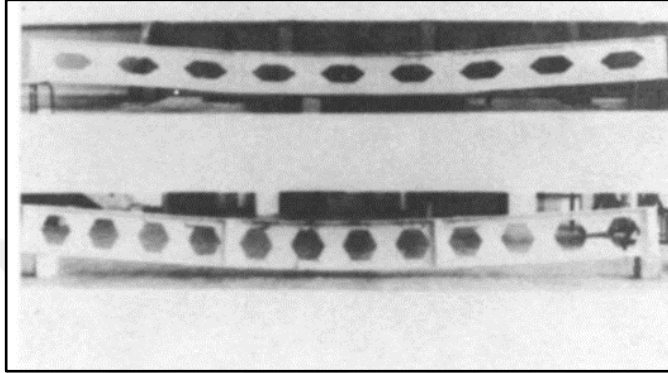
Bu göçme modu kaynaklı bölgenin uzunluğuna kaynağın kalınlığına ve mukavemet özelliklerine bağlıdır. Hussain ve Speirs (1971) kısa kaynak boyuna sahip altı gövde boşluklu kirişin testinden sonra bu modu tespit etmiştir. Bu testler neticesinde yatay kayma gerilmeleri kaynak kapasitesini aştığında kaynak bölgesinde kopma meydana geldiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.9. Kaynak bölgesinden kopma (Hussain ve Speirs 1971)

2.3.5. Basit eğilme (flexure bending)

Saf eğilme durumudur. Kesitin kompakt olması durumunda gövde yüksekliği artırılmış kiriş T-kesitlerin alt ve üst parçaların çekme ve basınç gerilmeleri altında tam olarak plastikleşene kadar herhangi burkulma davranışı gözlenmez. Toprac ve Cooke (1959) yapmış oldukları çalışmada bu göçme modunun gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin T-kesitlerin alt ve üstündeki parçalarda meydana gelen akma orijinal dolu kesitlerdeki saf eğilme durumuna benzer olduğunu vurgulamıştır.



Şekil 2.10. Basit eğilme (Halleux 1967)

2.4. Literatür Araştırması

Gövde yüksekliği artırılmış kirişler ilk olarak altıgen boşluklu (petek) kiriş uygulamaları ile II. dünya savaşı zamanında çelik yapıların maliyetini azaltma amacıyla yapı mühendisleri tarafından dayanıklılıkları gözlemlendikten sonra dikkate alınmaya başlanmıştır. I-kesitli profilden yapılmış bir kirişte herhangi bir malzeme takviyesine gerek duyulmadan elde edilen rijitlik ve atalet momenti artışı ve bunun yanı sıra kirişin geometrisinde meydana gelen değişikliğin ortaya çıkardığı görsellik tasarımcıların ilgisini çekmiştir. Çelik petek boşluklu kirişlerle ilgili olarak literatürde hatırı sayılır ölçüde çalışma yapılmıştır. Altifillisch' in (1957) tekil yükleme altındaki kirişlerin plastik ve elastik bölgelerdeki davranışlarını, dayanımlarını ve göçme durumlarını inceleyen küçük çaplı araştırması bu alanda yapılan ilk çalışma olarak kaydedilmiştir. Sonraları, Shelbourne (1966) yedi farklı petek kiriş numunesi için bir deney programı tasarlamıştır. Araştırmacı, bu testleriyle değişik yük kombinasyonları altında çelik petek kirişlerde oluşacak moment ve kesme kuvveti etkileşimlerini araştırmayı amaçlamıştır. Takibinde, Husain ve Speirs (1971) farklı yüklemeler altındaki çelik petek kirişlerin kaynak bölgelerinde oluşacak akmalari ve kopmaları incelemek amacıyla testler yapmıştır.

Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin en büyük handikabı olan yanal burkulma, uzun açıklıklarda ve yetersiz yanal destek durumunda kirişin üst başlığında oluşur. Kiriş kesitinin ilk haline oranla daha derin ve narin oluşunun bu göçme durumunun meydana gelmesine katkıda bulunduğu Nethercot ve Kerdal (1982) tarafından tespit edilmiştir. Son olarak, Redwood ve Zaarour (1996) petek boşluklu kirişlerin gövde kısımlarında oluşacak burkulmaları araştırma amacıyla on dört adet çelik I-kesitli petek kiriş üzerinde yükleme testleri yapmıştır. Kirişlerin nihai gövde burkulma yükleri aynı zamanda sonlu elemanlar analizi ile hesaplanıp elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Çelik petek boşluklu kirişler, literatürde geleneksel ve modern yöntemlerle çalışılmış bir yapı tipi olmasına karşın, dairesel boşluklu kirişler üzerine sınırlı sayıda teorik ve deneysel yayın mevcuttur. Bu kirişler ilk olarak Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü (SCI) denetimi altında Bradford üniversitesi laboratuvarlarında Lawson (1988) tarafından, kirişlerin yapısal bütünlüğünü ve tasarım kriterlerini doğrulamak amacıyla tam ölçekli testlerde kullanılmışlardır. Yapılan deneylerde kirişlerin uygulanan yük altında gövde burkulmasından göçtükleri gözlemlenmiştir. Yapılarda kullanılan çelik dairesel boşluklu basit kirişlerin BS (British Standart) 5950 şartnamesine göre tasarımı Ward (1990) tarafından sunulmuştur. Bu kirişlerin parametrik çalışmadan türetilen eğilme, yerel ve gövde dayanımı modları detaylı bir sonlu elemanlar analizi ile desteklenmiştir. Dairesel boşluklu çelik kirişler ile ilgili son zamanlardaki en kapsamlı çalışmayı Hoffman vd (2012) yapmıştır. Bu çalışmalarda ilk olarak dairesel boşluklu kirişlere genel bir bakış yapılmış ve daha sonra da gövde boşlukları çevresindeki gerilme dağılımları incelenmiştir. Ayrıca, bu kirişlerin servis yükleri altındaki doğrusal elastik ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar burkulma analizi sonuçları deney sonuçlarıyla mukayese edilmiş ve bu çalışma esas alınarak kirişlerin AISC–ASD (American Institute of Steel Construction, Allowable Stress Design) şartnamesine girmesi için başvuruda bulunulmuştur. Yukarıda bahsedilen çalışmalarda minimum ağırlık için yapı elemanlarının optimum boyutlandırılması yapılmadan sabit parametreler alınarak nihai yük taşıma kapasiteleri ve göçme durumları incelenmiştir. Erdal vd'nin (2011) yayınlamış oldukları “*Optimum Design of Cellular Beams Using Harmony Search and Particle Swarm Optimizers*” isimli çalışma yapı optimizasyonu literatüründe gövde yüksekliği artırılmış yapıların optimum boyutlandırılması ile ilgili tek çalışma olarak ön plana çıkmaktadır.

Yeni bir tip olan profil kesit şeklinin etkinliği ile maksimum yapısal yarar için asgari malzeme kullanımı garantisi olduğu iddia edilen sinüs eğrisi şeklinde boşluklu kirişlerin diğer gövde boşluklu (petek, dairesel) kirişlerle yük taşıma performanslarının kıyaslanması ilk defa bu tez kapsamında ele alınmıştır. Bu kapsamda stokastik metotlarla gerçekleştirilecek optimum tasarım çalışmalarında kesit profil seçimine ek olarak gövde geometrisi ölçüleri ve açıklık boyunca oluşacak boşluk sayısı değişken tasarım parametreleri olarak ele alınmıştır.

Son dönemlere kadar yapı optimizasyonu da dahil olmak üzere çeşitli mühendislik optimizasyonu uygulamalarında matematiksel programlama ve optimumluk kriteri yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktaydı (Hestenes 1969, Venkayya vd 1973). Ancak bu metotların tasarım değişkenlerini sürekli kabul etmesi esasına dayanan türeve bağlı matematiksel çözüm algoritmaları, gerek metotların büyük yapı sistemlerine uygulanmasını güçleştirmekte ve gerekse önceden belirlenen hazır kesitlere göre boyutlandırma gerektiren mühendislik yapılarının gerçeğe uygun tasarımları için ideal sonuç oluşturamamaktaydı. 1990'lı yılların başında Goldberg (1989) tarafından formülize edilen genetik algoritmalar mühendislik optimizasyonunda karşılaşılan bu sorunların üstesinden gelebilecek bir metot olarak ortaya çıkmıştır. Doğadaki evrimsel kavramların bilgisayar ortamında simülasyonu esasına dayalı olarak işleyen bu bulgusal ve stokastik yöntem, gerek ayrık çözüm üretebilmesi nedeniyle gerekse başlangıç noktasına bakılmaksızın global optimuma yakın çözümler yakalayabilmesi sayesinde tüm disiplinlerde olduğu gibi inşaat mühendisliğinde de ilgiyle karşılanmıştır (Hasancebi ve Erbatur 1988, Pezeshk ve Camp 2002). Genetik algoritmalar yöntemiyle kazanılan bu

başarı araştırmacıları, benzetimli tavlama (Kirkpatrick vd 1983), tabu arama (Glover 1989), karınca koloni (Dorigo ve Stützle 2004) ve evrimsel stratejiler (Coello 2002) gibi diğer stokastik metotları irdelemeye yönlendirmiştir. Buna ilave olarak bu tez kapsamında da yer alan harmoni arama (Lee ve Geem 2004) ve partikül küme (Perez ve Behdinan 2007) metotları son zamanlarda geliştirilen değişik nitelikli stokastik optimizasyon metotları içinde yer almıştır. Genetik algoritmaların yaygın popülaritesine karşın, Erdal ve Saka (2009), Doğan ve Saka (2012) harmoni arama ve partikül küme teknikleri ile gerçekleştirdiği çalışmalarda çözüm hızı ve optimum çözüme yakınsamadaki becerileri açısından genetik algoritmalara kıyasla daha etkin olabileceğini gözlemlemiştir.



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kirişlerin Optimizasyonunda Kullanılan Yöntemler

Stokastik optimizasyon tekniklerinde kaydedilen ilerlemelerin sonucu olarak etkin bir şekilde çalışan yeni optimizasyon teknikleri yapı mühendislerinin kullanımına sunulmuştur. Bu tekniklerin kullanımıyla birlikte yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü matematiksel programlama yöntemleri ile elde edilenlere göre çok daha etkin hale gelmiş, büyük yapı sistemlerine uygulanmalarını kolaylaştırmış ve hazır kesitlere göre boyutlandırma gerektiren mühendislik yapılarının gerçeğe uygun tasarımları için ideal sonuç oluşturdıkları gözlenmiştir. Sürü zekası, erimiş metallerin soğutulma işlemi, en iyinin hayatta kalması gibi doğadaki evrimsel prensiplerin bilgisayar ortamında simüle edilmesi esasına dayalı olarak işleyen bu bulgusal yöntemler, ayrık çözüm üretebilirler ve başlangıç noktasına bakılmaksızın global optimuma yakın çözümler yakalayabilirler. Bu teknikler, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların türevlerine ihtiyaç duymadığı gibi, deterministik kurallar yerine olasılığa dayalı arama yollarını kullanırlar. Tasarım mühendisleri son yıllarda alışılmışın dışında kalan etkili ve güçlü yöntemlerden esinlenerek bir çok optimum boyutlandırma algoritması geliştirmişlerdir. Bu tez kapsamında çelik gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin en ekonomik tasarımları, çözüm hızı ve optimum çözüme yakınsamadaki becerileri açısından yapıya uyarlamalarında başarılı olunan harmoni arama (harmony search) ve partikül küme (particle swarm) yöntemleri olmak üzere iki adet optimizasyon yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Stokastik optimizasyon yöntemleri, geleneksel metotlara göre şu ayrıcalıkları ve üstünlükleri gösterirler:

- Bulgusal metotlar oldukları için algoritmaları doğal olay veya oluşumların gözlenmesi ve optimizasyon ile ilişkilendirilmesi ile kurulmuştur. Örneğin, harmoni arama metodunda; bir müzik grubunu oluşturan enstrümanların akort edilerek aynı ses aralığını yakalamaları olgusu, partikül küme tekniğinde; kuşların veya balıkların yiyecek arama ve düşmanların kaçmasındaki sürü halinde hareket etmesi fenomeninden esinlenilmiştir.
- Stokastik yöntemler, türev gibi arama işlemini yerel optimumda sonlandıracak matematiksel algoritmalarından kaçındıklarından, optimum çözümü yakalama güvenilirlikleri daha yüksektir.
- Tasarım değişkenlerinin sürekli olması zorunluluğu yoktur; ayrık nitelikli tasarım değişkenleri ile çalıştırılabilirler. Özellikle bu husus yapı optimizasyonu açısından daha bir önem arz etmektedir. Örneğin, çelik yapıların tasarımlarında yapı elemanları belirli hazır kesitlerden seçilmelidir, yine betonarme yapı tasarımında donatı çubuğu sayısı tamsayı olmalıdır. Tüm bunlar optimum çözümün pratik uygulanabilirliği açısından vazgeçilmezdir.

Çalışmanın ilk aşamasında bir sonraki sayfada detaylı olarak belirtilen iki farklı stokastik yöntem kullanılarak, GYA çelik kirişler için optimum tasarımlarını yapacak olan bilgisayar yazılım programları geliştirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde harmoni arama ve partikül küme metotlarını kullanarak gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin optimum boyutlandırılmasını içeren bilgisayar yazılımları tamamlamıştır. Bu yazılım *FORTRAN* programlama dili kullanılarak Windows ortamında derlenmiştir.

Programlar hakkında bilgiler ve bu yazılımların analitik ve tasarımsal becerileri aşağıda belirtilmiştir.

- i. BS (British Standart) şartnamesine göre çözüm üretilebilir.
- ii. Optimum tasarım, GYA çelik kirişler için şartnamelerce öngörülen şu tahkikler göz önüne alınarak gerçekleştirilebilir:

- Eğilme ve eksenel gerilme tahkikleri
- Sekonder (vierendeel) eğilme tahkiki
- Kiriş gövde burkulması tahkiki
- Narinlik oranı tahkiki
- Maksimum deplasman tahkiki
- Kesme gerilmesi tahkiki

3.1.1. Harmoni arama yöntemi

Harmoni arama (HA) metodu ilk olarak Geem ve Lee (2004) tarafından oluşturuldu. Yöntem; orkestranın bir müzik parçasını çalmaya başlamadan önce, müzik aletlerinin akortlarının yapılarak orkestrada ortak bir harmoni elde edilmesi kavramı üzerine oturtulmuştur. Orkestranın insanlara keyifle dinlettirdiği bir eserin çalınmasındaki müzik aletlerinin uyumu, optimizasyon işleminin global optimumu bulmasına benzetilmiştir. Yapısal optimizasyon metotlarının çoğu önemli derece bilgi isteyen matematiksel algoritmalarla gereksinim duyarlar ve başlangıç değerlerin seçimi algoritmanın global optimum değere yakınsamasını sağlamak için önemlidir. HA algoritması ise fazla matematiksel algoritmaya ihtiyaç duymaz ve başlangıç değerlerine gerek yoktur. HA metodunda derece artırılarak arama yerine rastgele arama yapılır ve türevsel bilgiye gerek yoktur.

I - Harmoni hafıza matrisinin oluşturulması: İlk olarak başlangıç harmoni hafıza matrisi (H) oluşturulur. Denklem 3.1’de gösterildiği gibi matrisin büyüklüğü harmoni hafızanın büyüklüğü kadardır. H matrisi, genetik algoritmalar ve evrimsel stratejiler yöntemindeki popülasyon ile kavramsal olarak eşdeğerdir. Harmoni hafıza matrisinin büyüklüğü (μ) çözüm vektörlerinin sayısı kadardır. Her bir çözüm (harmonik vektörü, $\mathbf{I}^i$) tasarım değişkenlerinden (N_d) oluşmaktadır ve her harmonik vektörü matrisin ayrı satırında gösterilir. Sonuç olarak, harmoni hafıza matrisi $H = \mu \times N_d$ şeklinde ifade edilir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_2^1 & \dots & I_{N_d}^1 \\ I_1^2 & I_2^2 & \dots & I_{N_d}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1^\mu & I_2^\mu & \dots & I_{N_d}^\mu \end{bmatrix} \begin{matrix} \phi(\mathbf{I}^1) \\ \phi(\mathbf{I}^2) \\ \dots \\ \phi(\mathbf{I}^\mu) \end{matrix} \quad (3.1)$$

II - Harmoni hafıza matrisinin değerlendirilmesi: Harmoni hafıza matrisi çözümleri analiz edildikten sonra onların amaç fonksiyon değerleri birleştirilmiş genel formül içinde hesaplanır. Değerlendirilen çözümler matris içindeki amaç fonksiyon değerlerinin artan dizisine göre sıralanır. Bu sıralama $\phi(I^1) \leq \phi(I^2) \leq \dots \leq \phi(I^\mu)$ şeklindedir.

III - Yeni harmoninin geliştirilmesi: Yeni harmoni matrisi $\mathbf{I}' = [I'_1, I'_2, \dots, I'_{N_d}]$ harmoni hafıza ya da tamamlanmış ayrık set tarafından her bir tasarım değişkeni seçilerek geliştirilir. Harmoni hafıza tarafından bir dizayn değişkeninin seçilme olasılığı algoritmanın önemli bir parametresi olan harmoni hafıza göz önünde bulundurma oranı (*hmcr*) ile kontrol edilir. Bu olasılığı uygulama amacıyla her bir değişken (I_i) için 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı (r_i) oluşturulur. Eğer seçilen rastgele sayı (r_i) harmoni hafıza göz önünde bulundurma oranından (*hmcr*) küçük veya eşit ise değişken H harmoni matrisinin i 'inci sütunu tarafından atanan herhangi bir değer tarafından Denklem 3.2'de gösterildiği gibi seçilir. Eğer r_i sayısı *hmcr* parametresinden büyükse rastgele değer tamamlanmış ayrık set tarafından atanır.

$$I'_i = \begin{cases} I'_i \in \{I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^\mu\} & \text{if } r_i \leq \text{hmcr} \\ I'_i \in \{1, \dots, N_s\} & \text{if } r_i > \text{hmcr} \end{cases} \quad (3.2)$$

Eğer bir dizayn değişkeni harmoni hafıza tarafından kendi değerine ulaştırılırsa, bu değer derece uyumluluğu (pitch-adjusted) olup olmadığı kontrol edilmelidir. Basit bir şekilde derece uyumluluğu değişkenin şimdiki değeri tarafından eklenerek veya çıkarılarak elde edilen değişkenlerin komşu değerlerden birisinin örneklemesidir. Benzer şekilde *hmcr* parametresi de derece uyumluluğu (*par*), Denklem 3.3 olarak bilinen olasılık kavramı ile birlikte çalıştırılır. Eğer *par* tarafından etkinleştirilmemişse tasarım değişkeni farklılaşmaz.

$$I''_i = \begin{cases} I'_i \pm 1 & \text{if } r_i \leq \text{par} \\ I'_i & \text{if } r_i > \text{par} \end{cases} \quad (3.3)$$

IV - Harmoni hafıza matrisinin güncelleştirilmesi: Yeni harmoni vektörünün oluşturulmasından sonra onun amaç fonksiyon değeri hesaplanır. Eğer bu değer harmoni hafıza matrisinin içindeki en kötü değerden daha düşükse, Bulunan yeni değer hafıza matrisinin içine yerleştirilir ve matrisin içindeki en kötü değer matris içinden çıkartılır. Yenilenmiş harmoni hafıza matrisi amaç fonksiyonlarının değerine göre yükselerek sıralanır.

V - Sonlandırma: 3. ve 4. Adımlar algoritma döngünün maksimum sayısına (N_{cyc}) ulaşmaya kadar tekrar edilir.

3.1.2. Partikül küme yöntemi

Partikül Küme (PK) optimizasyon yöntemi hayvanlarda rastlanan böcek kümelenmesi, kuş sürüleri ve balıkların toplu hareketleri gibi sosyal davranışlarını temel alır (Pezeshk ve Camp 2002). Bu davranış bütün sürü hareketini gösteren bilgi ve aynı zamanda her bir bireyin hafızasına dayalı olan sosyal gruplandırmaya dayanır. Prosedür bir amaç fonksiyonu örnek uzayı içerisinde rastgele olarak oluşturulan sürüyü meydana getiren belli miktarda partikülü ihtiva eder. Sürü içerisindeki her partikül optimum tasarım problemi için birer aday çözümdür. Partiküller örnek uzaya doğru uçuş eğilimindedirler ve bir zaman aralığı için her bir adımdaki pozisyonları, mevcut pozisyonları ve hız vektörleri ve kullanılarak güncellenir.

I - Partiküllerin oluşturulması: Bir partikül kümesi küme boyutunu (μ) temsil eden ve önceden belirlenmiş miktarda partikülden oluşur. Her partikül ($\mathbf{P}$) iki adet bileşene sahiptir; bir yer (tasarım) $\mathbf{I}$ vektörü ve bir hız vektörü $\mathbf{v}$ (Denklem 3.4). Yer vektörü $\mathbf{I}$ tasarım değişkenlerinin yerlerini ihtiva ederken hız vektörü $\mathbf{v}$ de arama süresince bu yer vektörünün güncellenmesi için kullanılır. Sürü içindeki her bir partikül bütün ilk pozisyonlar $I_i^{(0)}$ ve hızlar $v_i^{(0)}$ Denklem 3.5 ve 3.6'ya bağlı olarak rastgele başlatma prensibiyle oluşturulur.

$$\mathbf{P} = (\mathbf{I}, \mathbf{v}), \quad \mathbf{I} = [I_1, I_2, \dots, I_{N_d}] \quad , \quad \mathbf{v} = [v_1, v_2, \dots, v_{N_d}] \quad (3.4)$$

$$I_i^{(0)} = I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min}), \quad i = 1, \dots, N_d \quad (3.5)$$

$$v_i^{(0)} = \frac{I_{\min} + r(I_{\max} - I_{\min})}{\Delta t}, \quad i = 1, \dots, N_d \quad (3.6)$$

Burada r , 0 ile 1 arasında rastgele seçilmiş bir numara; Δt zaman aralığı ve $I_{\min}$, $I_{\max}$ ise sırasıyla kesit listesindeki ilk ve son çelik profilin sıra numaralarını göstermektedir.

II - Partiküllerin değerlendirilmesi: Bütün partiküller ana denkleme bağlı kalınmak suretiyle analiz edilir ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır.

III - Partiküllerin en iyi değerinin ve küme içindeki en iyi partikül değerinin güncellenmesi: Bir partikülün o ana kadarki en iyi pozisyonu partikülün en iyi değeri olarak kabul edilir ve her bir partikülün en iyi değeri $\mathbf{B}$ vektörüne kaydedilir. Bunun yanı sıra prosesin başlangıcından itibaren herhangi bir partikül tarafından elde edilmiş olan en iyi pozisyon ise en iyi global pozisyon olarak $\mathbf{G}$ vektörüne kaydedilir. Her bir $\mathbf{k}$ iterasyon adımı için partikül ve global en iyi pozisyon değerleri güncellenir.

$$\mathbf{B}^{(k)} = [B_1^{(k)}, \dots, B_i^{(k)}, \dots, B_{N_d}^{(k)}] \quad \mathbf{G}^{(k)} = [G_1^{(k)}, \dots, G_i^{(k)}, \dots, G_{N_d}^{(k)}] \quad (3.7)$$

IV - Partiküllerin hız vektörlerinin güncellenmesi: Her partikülün hız vektörü partiküllerin mevcut pozisyonu, lokal ve global en iyi pozisyon dikkate alınarak aşağıdaki gibi güncellenir.

$$v_i^{(k+1)} = wv_i^{(k)} + c_1r_1\left(\frac{G_i^{(k)} - I_i^{(k)}}{\Delta t}\right) + c_2r_2\left(\frac{B_i^{(k)} - I_i^{(k)}}{\Delta t}\right) \quad (3.8)$$

Burada, r_1 ve r_2 0 ile 1 arasında seçilen rastgele sayılar; W algoritmanın keşif özelliklerini kontrol eden partikül atalet parametresi, c_1 ve c_2 ise partikülün sırasıyla kendisine ve sürüye ne kadar bağlı kalacağını gösteren güven parametreleridir.

V - Partikül pozisyon vektörünün güncellenmesi: Daha sonra güncellenen hız vektörü kullanılarak her bir partiküle ait pozisyon vektörü güncellenir.

$$I_i^{(k+1)} = I_i^{(k)} + v_i^{(k+1)}\Delta t \quad (3.9)$$

VI – Sonlandırma: İki den beşe kadar olan adımlar önceden belirlenmiş olan N_{ite} kadar iterasyon için tekrarlanır.

3.2. Kirişlerin Optimizasyon Probleminin Matematiksel Modeli

3.2.1. Sinüsoidal boşluklu kirişler

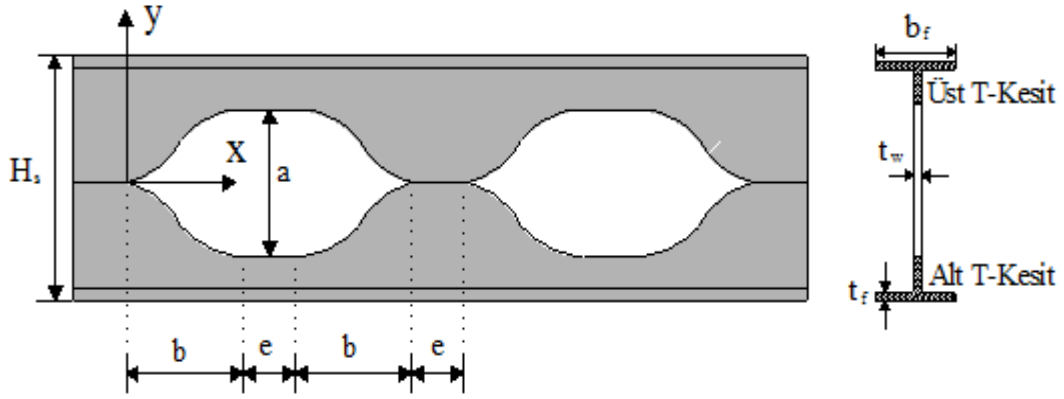
Minimum ağırlıklı sinüs eğrisi şeklinde gövde yüksekliği artırılmış çelik kirişlerin (Şekil 3.1) optimum boyutlandırılması probleminde değişkenler aşağıdaki gibi alınır.

$$\text{Tasarım değişkenleri kümesi; } \{I\} = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\}^T \quad (3.10)$$

Tanımlanan değişken kümesinde, I_1 çelik kesit profilin sıra numarasını, I_2 kirişte oluşacak gövde boşluğunun yüksekliğinin, I_3 kirişte oluşacak her eğrinin yatay uzunluğunun, I_4 boşluğun yassı kısmının uzunluğunun ve I_5 ise açıklık boyunca oluşacak toplam boşluk sayısının sıra numarasını tanımlar. Yapı elemanları, geniş başlıklı I-profilleri gibi şartnamelerce tanımlanan ve piyasada bulunan hazır profil listelerinin arasından seçilir. Amaç, yapı ağırlığını minimize etmektir. Sinüsoidal boşluklu GYA çelik kirişin ağırlığı W_{SSIB} olarak gösterilirse, amaç fonksiyonu Denklem 3.11'deki gibi olacaktır.

Amaç fonksiyonu;

$$\min W_{SSIB} = \rho_s \times A_{SSIB} \times L_{SSIB} - \rho_s \left(4 \times \left(\int_0^x y \times dx \right) \times t_w \times N_{hole} \right) \quad (3.11)$$



Şekil 3.1. Sinüsoidal boşluklu kirişin geometri ve notasyonları

Burada, ρ_s çeliğin yoğunluğunu, A_{SSIB} çelik kesitin kesit alanını, L_{SSIB} kiriş açıklığını, y eğri denklemini ve N_{hole} açıklık boyunca kırışta oluşacak toplam boşluk sayısını ifade eder. Kirişte oluşacak olan eğrinin fonksiyonel ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$y = \left(0.5 \times \frac{a}{2}\right) \times \sin \left[\pi \left(\frac{x}{b} + \frac{3}{2} \right) \right] + \frac{a}{4} \quad (3.12)$$

Sinüs eğrisi boşluklu çelik kirişlerin optimum tasarımında bazı geometrik ve davranış sınırlayıcılarının sağlanması gereken geometrik sınırlayıcılar vardır. Geometrik sınırlayıcılar boşluk yüksekliği değerlerine (a), her bir eğrinin yatay uzunluğuna (b), boşluğun yassı kısmının uzunluğuna (e), kirişin ilk boyuna (H_{ilk}) ve kirişin kesim ve kaynaklama işlemi sonundaki son boyuna (H_{son}) bağlı olarak aşağıdaki denklemleri sağlayacak şekilde ifade edilmiştir.

$$1.4 \times H_{ilk} - H_{son} \leq 0 \quad (3.13)$$

$$H_{son} - 1.7 H_{ilk} \leq 0 \quad (3.14)$$

$$3a - (2b + e) \leq 0 \quad (3.15)$$

$$(2b + e) - 5a \leq 0 \quad (3.16)$$

3.2.2. Dairesel boşluklu kirişler

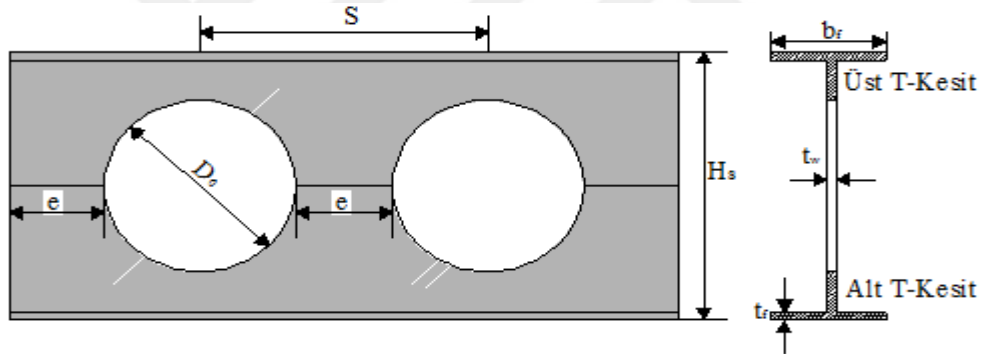
Minimum ağırlıklı dairese boşluklu çelik kirişlerin optimum boyutlandırılma probleminde değişkenler aşağıdaki gibi alınır:

$$\text{Tasarım değişkenleri kümesi: } \{I\} = \{I_1, I_2, I_3\}^T \quad (3.17)$$

Burada, I_1 çelik kesit profilin sıra numarasını, I_2 kirişte oluşacak gövde boşluğunun çapının sıra numarası ve I_3 ise açıklık boyunca oluşacak toplam boşluk sayısını ifade eder. Dairesel boşluklu GYA çelik kirişin ağırlığı W_{SCEB} olarak gösterilirse, amaç fonksiyonu Denklem 3.18'deki gibi olacaktır.

$$\text{Amaç fonksiyonu; } \min W_{SCEB} = \rho_s \times A_{CEB} \times L_{CEB} - \rho_s \left(\pi \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 \times t_w \times N_{hole} \right) \quad (3.18)$$

Yukarıdaki eşitlikte, ρ_s kullanılan çeliğin yoğunluğunu, A_{CEB} çelik kesitin toplam kesit alanını, L_{CEB} kiriş açıklığını, D_0 dairese boşluğun çapını ve N_{hole} açıklık boyunca kirişte oluşacak toplam dairese boşluk sayısını ifade eder.



Şekil 3.2. Dairesel boşluklu çelik kirişin geometri ve notasyonları

Dairesel boşluklu çelik kirişlerin optimum tasarımında bazı geometrik ve davranış sınırlayıcılarının sağlanması gerekmektedir (Şekil 3.2). Geometrik sınırlayıcılar boşluk çapı değerine (D_0), boşluk merkezleri arasındaki mesafelere (S) ve kirişin kesim ve kaynaklama işlemi sonundaki son boyuna (H_s) bağlı olarak aşağıdaki denklemleri sağlayacak şekilde ifade edilmiştir.

$$1.08 D_0 - S \leq 0 \quad (3.19)$$

$$S - 1.50 D_0 \leq 0 \quad (3.20)$$

$$1.25 D_0 - H_s \leq 0 \quad (3.21)$$

$$H_s - 1.75 D_0 \leq 0 \quad (3.22)$$

3.2.3. Petek boşluklu kirişler

Minimum ağırlıklı petek boşluklu çelik kirişlerin optimum boyutlandırılması probleminde dairesel boşluklu kirişlerden farklı olarak boşluk yüksekliğinin yanı sıra kenarlar arasındaki açı da değişken olarak hesaba katılarak değişken kümesi şöyle olur:

$$\text{Tasarım değişkenleri kümesi ; } \{I\} = \{I_1, I_2, I_3, I_4\}^T \quad (3.23)$$

Burada, I_1 çelik kesit profilin sıra numarasını, I_2 kirişte oluşacak gövde boşluğunun yüksekliğinin sıra numarasını, I_3 açıklık boyunca oluşacak boşluk sayısının, I_4 ise petek boşlukta oluşacak açının sıra numarasını ifade eder. Altıgen boşluklara sahip GYA çelik kirişin ağırlığı W_{SCAB} olarak gösterilirse, amaç fonksiyonu Denklem 3.24'teki gibi olacaktır.

Amaç fonksiyonu;

$$\min W_{SCAB} = \rho_s \times A_{CAB} \times L_{CAB} - \rho_s ((c \times (a + b)) \times t_w \times N_{hole}) \quad (3.24)$$

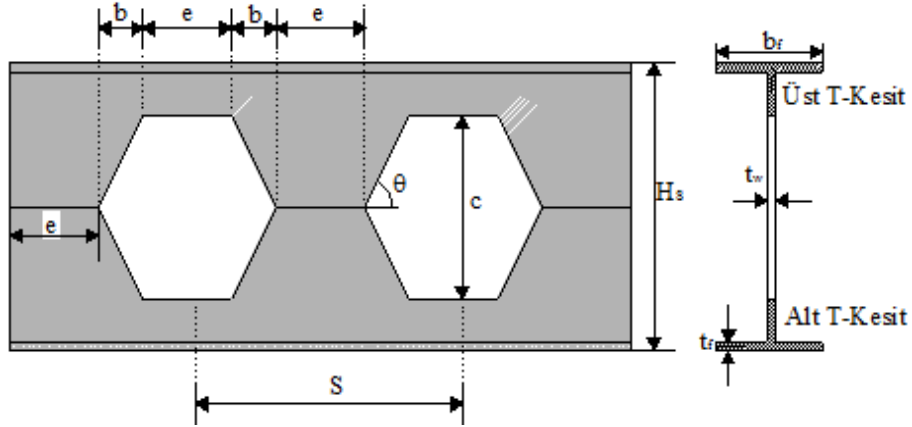
Yukarıdaki eşitlikte, ρ_s kullanılan çeliğin yoğunluğunu, A_{CAB} çelik kesitin toplam kesit alanını, L_{CAB} kiriş açıklığını ve N_{hole} açıklık boyunca kirişte oluşacak toplam boşluk sayısını ifade eder. Petek boşluklu çelik kirişlerin optimum tasarımında bazı geometrik ve davranış sınırlayıcılarının sağlanması gerekmektedir. Geometrik sınırlayıcılar boşluk yüksekliğine (c), boşluk merkezleri arasındaki mesafelere (S) ve kirişin kesim ve kaynaklama işlemi sonrası son boyuna (H_s) bağlı olarak aşağıdaki denklemleri sağlayacak şekilde ifade edilmiştir.

$$1.1 \ c - S \leq 0 \quad (3.25)$$

$$S - 1.60 \ c \leq 0 \quad (3.26)$$

$$1.25 \ c - H_s \leq 0 \quad (3.27)$$

$$H_s - 1.75 \ c \leq 0 \quad (3.28)$$



Şekil 3.3. Petek boşluklu çelik kirişin geometri ve notasyonları

Petek boşluklu çelik kiriş için kullanılan standart profil geometrisi ve notasyonları Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Bu kirişlerin ebatları aşağıdaki denklemlerde ifade edilmiştir.

$$e = 0.5 \times (S - 2 \times c \times \cot \theta) \quad (3.29)$$

$$b = c \times \cot \theta \quad (3.30)$$

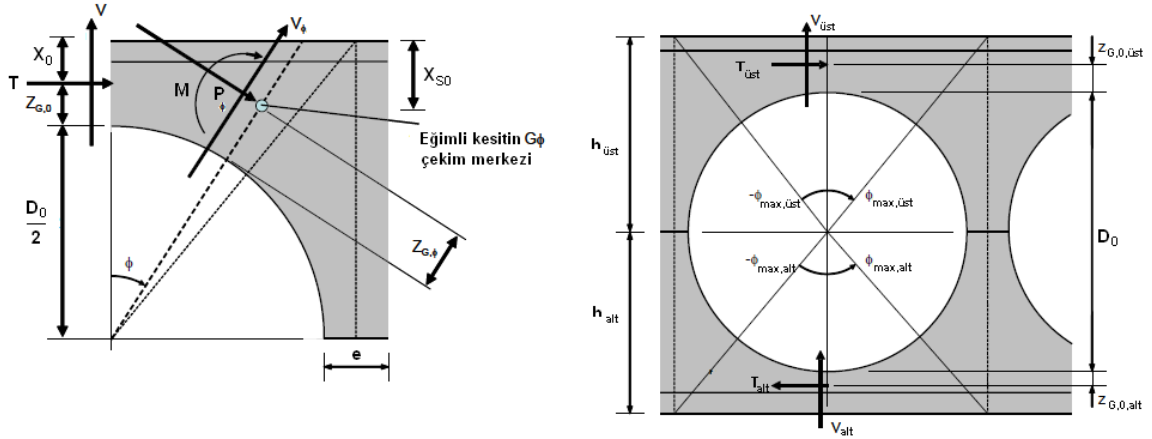
$$H_s = h_f + c \quad (3.31)$$

Bu eşitliklerde, S boşluk merkezleri arasındaki mesafeyi, h_f orijinal kesitin derinliğini, H_s kesim ve kaynaklama işlemi sonucunda oluşan petek boşluklu kirişin derinliğini, a , b ve c ifadeleri ise petek boşluğun ölçülerini tanımlamaktadır.

3.3. Davranış Sınırlayıcıları

Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin düşey yükler altında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; kiriş boşluk geometrisine, kiriş gövde narinliğine, yükleme tipine ve yanal desteklerin koşullarına bağlı olarak kirişte farklı göçme biçimleri gözlemlenmiştir. Yük kombinasyonları altında kirişlerde oluşabilecek kusurları engellemek için bazı davranışlar dikkate alınmalıdır.

3.3.1. İkincil eğilme (Vierendeel bending) kapasitesi:



Şekil 3.4. İkincil eğilmeden dolayı oluşacak kritik kesitin belirlenmesi

Bu kirişlerde eğilme altındaki kirişin alt ve üst parçalarının esneklik kapasitesinin tahkik edilmesi gerekir. Kiriş kesmeye maruz kaldığı zaman, kiriş boşluğunun alt ve üst kısmındaki T-kesitleri birincil ve ikincil momentlerin yanı sıra uygulanan kesmeyi de taşımaktadır (Denklem 3.32). Birincil moment kiriş kesiti üzerindeki klasik eğilme momentidir. Kesme kuvvetlerinin Şekil 3.4'te detaylı olarak gösterildiği gibi her bir boşluk boyunca aktarılması ise ikincil eğilme (vierendeel bending) momentine neden olur.

$$\frac{P_O}{P_U} + \frac{M}{M_p} \leq 1.0 \quad (3.32)$$

$$P_O = T \cos \theta - \frac{V}{2} \sin \theta \quad (3.33)$$

$$M = T(x_{s0} - x_0) + \frac{V}{2} \left(\frac{H_s}{2} - x_{s0} \right) \quad (3.34)$$

3.3.2. Kesme kuvveti kapasitesi

Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin boyutlandırılmasında üç kesme kuvveti kontrolü yapılır. Bunlardan ilki; mesnetlerdeki kesme kuvveti tahkikidir. Denklem 3.35'teki sınırlayıcı; mesnetteki kesme kuvveti değerinin ($V_{\max \text{ sup}}$) kiriş kesitinin maksimum kesme kuvvet kapasitesini (P_v) aşmamasını sağlar.

$$V_{\max \text{ sup}} - P_v \leq 0 \quad (3.35)$$

$$P_v = 0,6 \times p_y \times (0,9 \times \text{mesnetlerdeki kiriş gövde alanı}) \quad (3.36)$$

İlk tahkike ek olarak kirişteki düşey kesme kuvveti kontrolü Denklem 3.37 ile yapılır. Kirişin boşluktan dolayı oluşan alt ve üst T-kesitlerindeki kesme kuvvetleri kapasitelerinin toplamı kirişin toplam kesme kapasitesini verir. Uygulanan yük kombinasyonundan dolayı GYA kirişte oluşacak düşey yöndeki kesme kuvveti $V_{O\max}$; P_{vy} değerini aşmamalıdır.

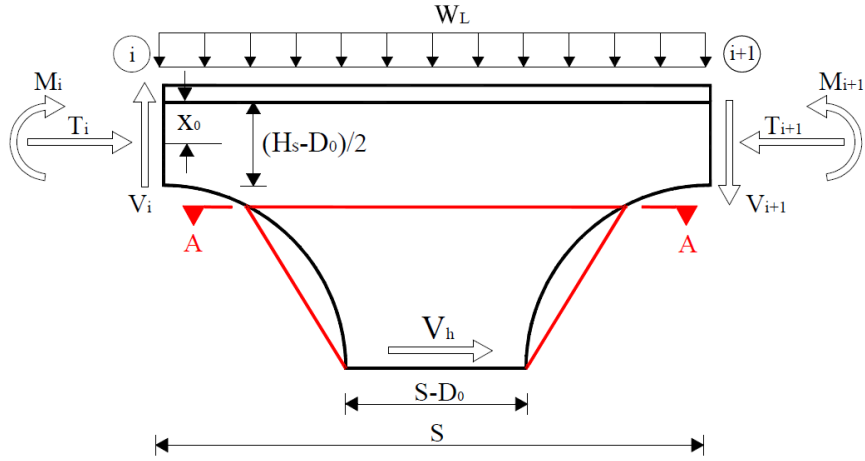
$$V_{O\max} - P_{vy} \leq 0 \quad (3.37)$$

$$P_{vy} = 0,6 \times p_y \times (0,9 \times \text{kiriş alt ve üst parça gövde alanı}) \quad (3.38)$$

Son olarak yanal kesme kuvveti kontrolü yapılır. Yanal kesme kuvveti; kirişin üst parçasındaki eksenel kuvvetlerin değişmesinden dolayı kirişin gövde kısmında meydana gelir (Şekil 3.5). Kirişin gövde bölgesindeki yanal kuvvet ($V_{H\max}$); yanal kesme kuvveti kapasitesi (P_{vh}) değerinden küçük olmalıdır. GYA kiriş kesitinin eğilme momenti ve kesme kuvveti hesap detayları Erdal vd (2011) tarafından kapsamlı olarak anlatılmıştır.

$$V_{H\max} - P_{vh} \leq 0 \quad (3.39)$$

$$P_{vh} = 0,6 \times p_y \times (0,9 \times \text{minimum gövde alanı}) \quad (3.40)$$



Şekil 3.5. Kirişin üst gövdesinde oluşan yanal kesme (Erdal vd 2011)

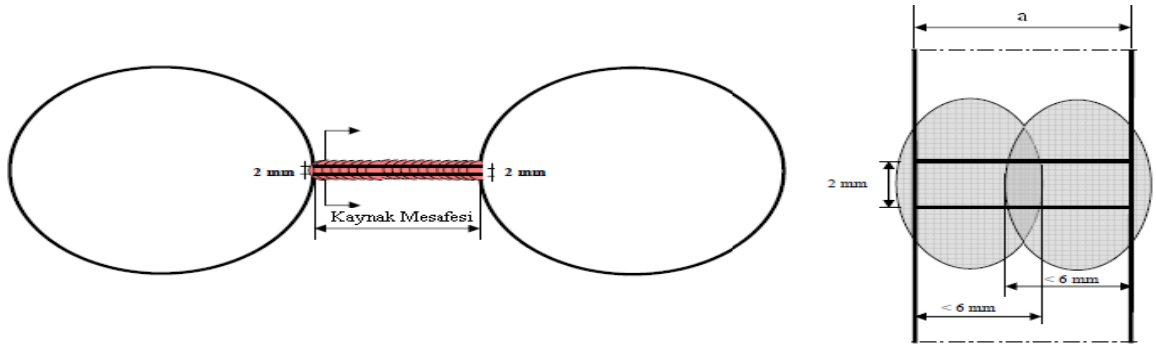
$$V_{i+1} = V_i \quad (3.41)$$

$$M_i = T_i \times (H_s - 2 \times x_0) \quad (3.42)$$

$$V_h = T_{i+1} - T_i = V_{i+1} \frac{S}{H_s - 2 \times x_0} \quad (3.43)$$

3.3.3. Kaynak bölgesinde kopma

Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerde uygulanan yük altında boşluklar arasındaki kaynak dikişi mesafesinin (Şekil 3.6) kiriş T-kesitlerinde oluşacak ikincil momentin büyüklüğünü azaltmak amacıyla kısa tutulması veya kaynak dikişi kalınlığının küçük alınması durumunda kaynaklı birleşim bölgesinde kopma meydana gelebilir.



Şekil 3.6. Kiriş gövdesinde kaynak işlemi

GYA kirişlerdeki boşluklar arası yapılan çift taraflı kaynağın kalınlığını ifade eden minimum “ a ” değerin formülasyonu Denklem 3.44’te gösterilmektedir. Bu ifadede, V_h kaynak bölgesinde oluşan yanal kesme kuvveti, w kaynak dikiş mesafesini, γ_w sabit parametreyi ifade eder. f_u ve β_w değerleri ise Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi çelik sınıfına göre belirlenir.

$$a \geq \frac{V_h \times \beta_w \times \sqrt{3}}{w \times f_u \times \gamma_w} \quad (3.44)$$

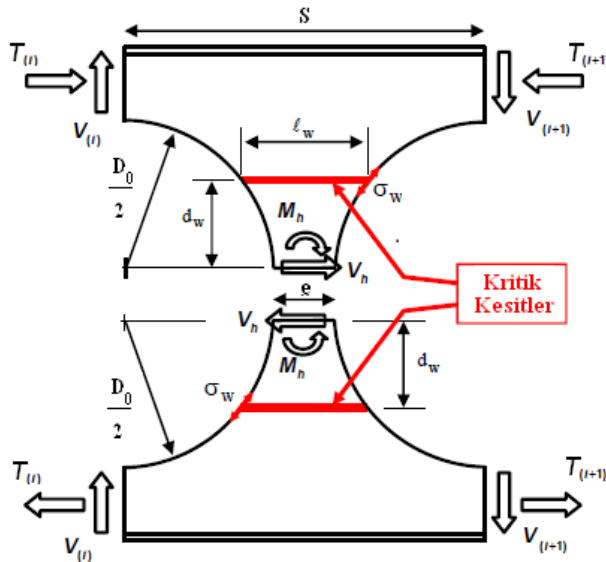
Çizelge 3.1. Kaynak kalınlığı parametreleri

Çelik Sınıfı	S235	S275	S355	S420	S460
f_u (MPa)	340	370	470	520	550
β_w	0,80	0,85	0,90	1,00	1,00

3.3.4. Gövde burkulması

Şekil 3.7’de kesitteki maksimum moment (M_{max}) ve neticesinde oluşan (kırmızı çizgilerle belirtilen) σ_w değerleri kiriş gövdesindeki izin verilen maksimum moment (M_{wmax}) ve $\sigma_{w-allow}$ değerlerini aşmamalıdır. Kiriş gövde burkulması ile ilgili hesap detayları Ward (1990), Erdal vd (2011) tarafından ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

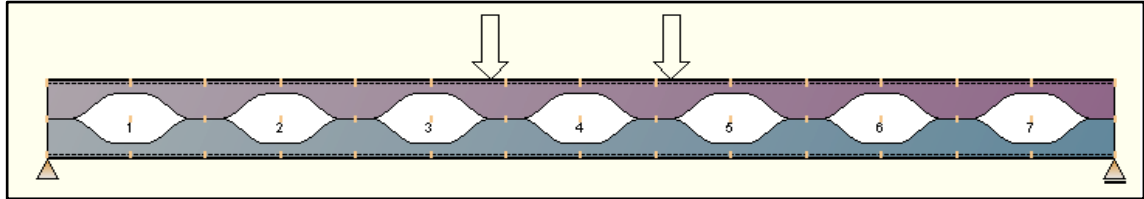
$$M_{A-A_{max}} - M_{wmax} \leq 0 \quad (3.45)$$



Şekil 3.7. Kirişlerin gövde bölgesinde oluşan kritik kesitler

3.4. Tasarım Örneği

Şekil 3.8’de gösterilen çelik kirişin sinüs eğrisi şeklinde boşluklu kiriş yapılmasına karar verildiği varsayılıyor. Kiriş, kendi ağırlığının yanı sıra iki farklı noktadan tekil yüke maruz kalıyor. Hareketli yükler altında kiriş için izin verilebilir deplasman 17 mm ile sınırlandırılmıştır. Elastisite Modülü 205 kN/mm^2 ve çelik kiriş için tasarım gerilmesi 275 MPa ’dır.



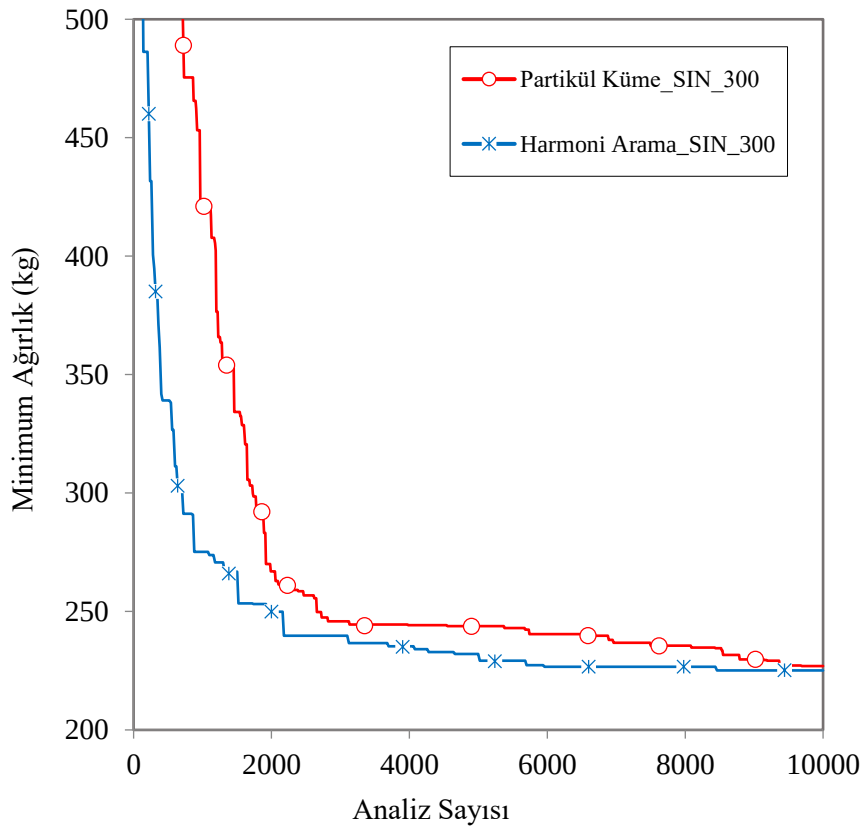
Şekil 3.8. Sinüsoidal boşluklu çelik kiriş

Optimum boyutlandırma probleminde standart çelik kesit tablosundan sıcak haddelenmiş kiriş kesit sıra numarası, boşluk yüksekliği, eğri yatay uzunluğu ve boşluk merkezleri arası mesafe, doğrusal bölgenin uzunluğu ve kiriş açıklığındaki toplam boşluk sayısı tasarım değişkenleri olarak alınırlar. Bu amaçla IPE_100 ile IPE_750 arasında değişen standart I-kesit kiriş profillerinden, 70 mm ile 600 mm arasında değişen boşluk yüksekliklerinden ve 2 ile 40 arasında değişen kirişteki toplam oluşabilecek boşluk sayısından oluşan bir tasarım havuzu hazırlanır. Tasarım sınırlayıcıları olarak deplasman kısıtlayıcısı, kiriş profilin esneklik kapasitesi, kiriş kesme kapasitesi, kiriş gövdesi esneklik ve burkulma kapasitesi, kirişin alt ve üst parçalarının ikincil eğilme (vierendeel bending) kapasitesi ve kirişin üst başlığında oluşabilecek bölgesel burkulma alınmıştır.

Kirişin boyutlandırılmasında farklı Harmoni arama (HA) ve Partikül Küme (PK) yöntem parametreleri optimum sonuç için test edilmiştir. Harmoni hafıza matrisi (*hms*) ve partikül sayısı (*m*) her iki yöntem için eşit ve 10 (on) olarak alınmıştır. Harmoni arama yönteminin diğer parametreleri *hmcr* ve *par* sırasıyla 0,8 ve 0,35 olarak alınmıştır. PK yönteminin tasarım parametreleri olan *c1* ve *c2* 1 olarak, *w* 2 olarak ve *Dt* ile *max V* değerleri de 2 olarak seçilmiştir. HA algoritması parametreleri ve PK algoritması parametreleri kullanılarak optimum boyutlandırması yapılan sinüsoidal boşluklu gövde yüksekliği artırılmış kirişin sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Her iki yöntemde optimum sonuca yakın değerler bulmasına karşın HA algoritması bu kiriş için optimum sonucu *hms*, *hmcr* ve *par* parametreleri için sırasıyla 30, 0,80 ve 0,45 değerlerini kullanarak 10000 iterasyon sonra 225,1 kg ağırlık ile IPE_SB_300 kirişini Şekil 3.9’da görüldüğü üzere optimum kesit tasarımını bulmaktadır.

Çizelge 3.2. IPE_SB_300 kirişi için bulunan sonuçların kıyaslanması

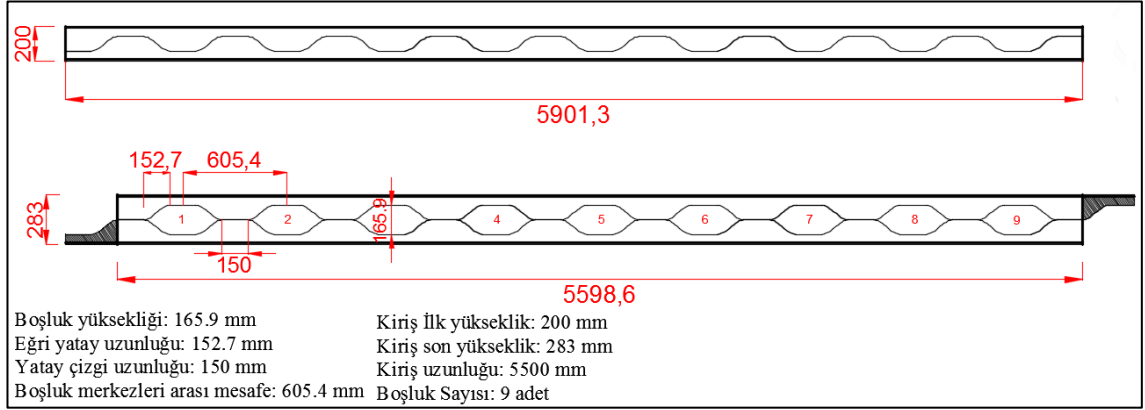
Optimizasyon Arama Yöntemi	Optimum Kesit Tasarımları	Boşluk Merkezleri Arası	Boşluk Yüksekliği (mm)	Eğri Yatay Mesafesi	Toplam Boşluk Sayısı	Minimum Ağırlık (kg)
HA Algoritması	SB_300	730,3	268	215,2	7	225,1
PK Algoritması	SB_300	737,9	259	211,6	7	226,3



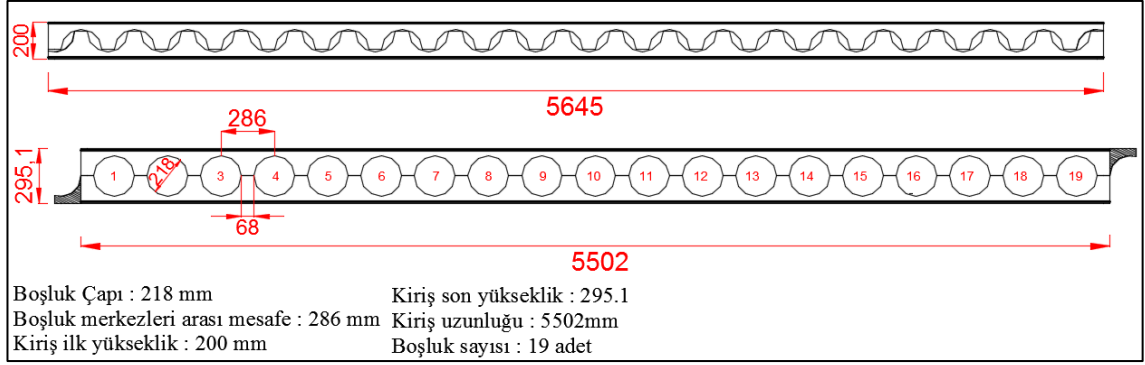
Şekil 3.9. Sinüsoidal boşluklu çelik kiriş

Matematiksel olarak detayları verilen GYA kirişlerin optimum boyutlandırma işlemi IPE_SB_DB_PB_200, IPE_SB_DB_PB_240 ve IPE_SB_DB_PB_300 kirişleri için yapılmış olup tasarım algortimalarından elde edilen optimum kirişlerin yük taşıma kapasiteleri belirli yük durumları için hesaplanmıştır. Yapılan optimizasyonlar sonucunda GYA çelik kirişlerinin geometrik ölçüleri ve detayları bir sonraki sayfada verilmiştir.

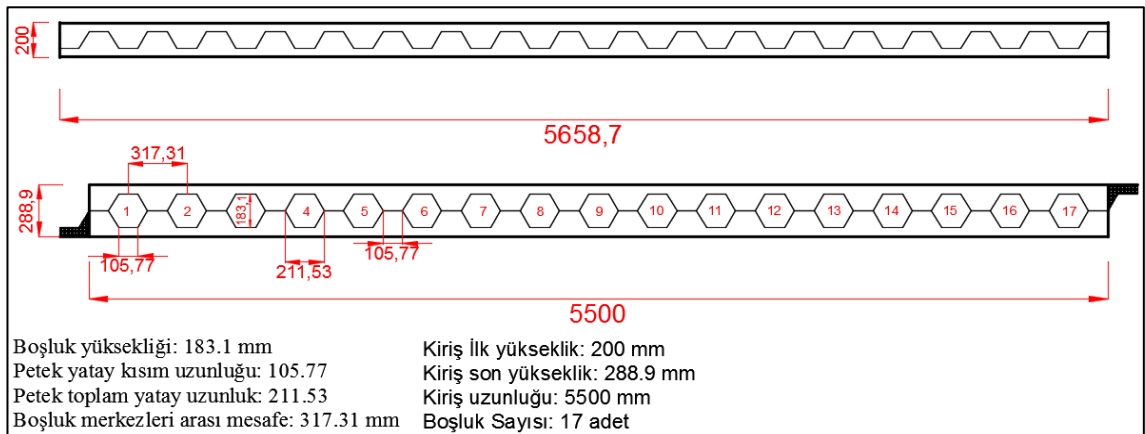
IPE_SB_DB_PB_200 kirişleri;



Şekil 3.10. IPE 200 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_200) detayı

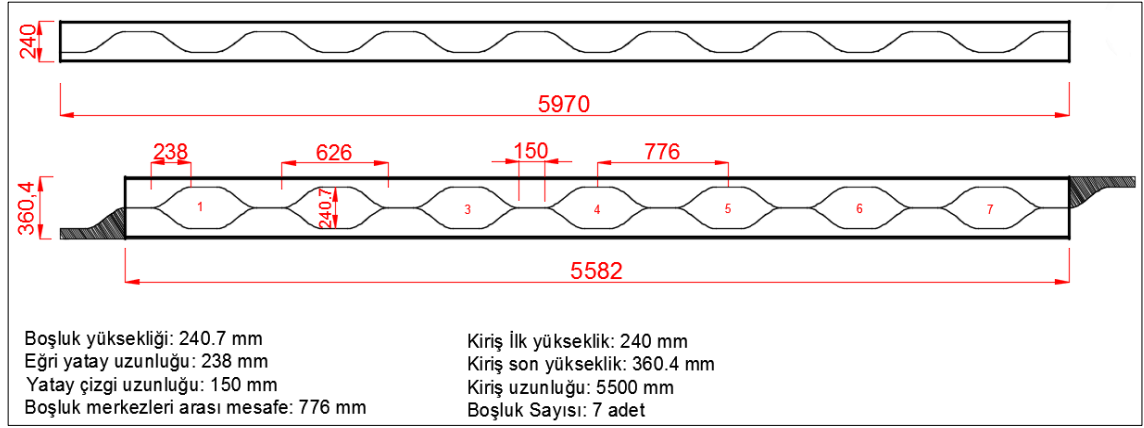


Şekil 3.11. IPE 200 dairesel boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_200) detayı

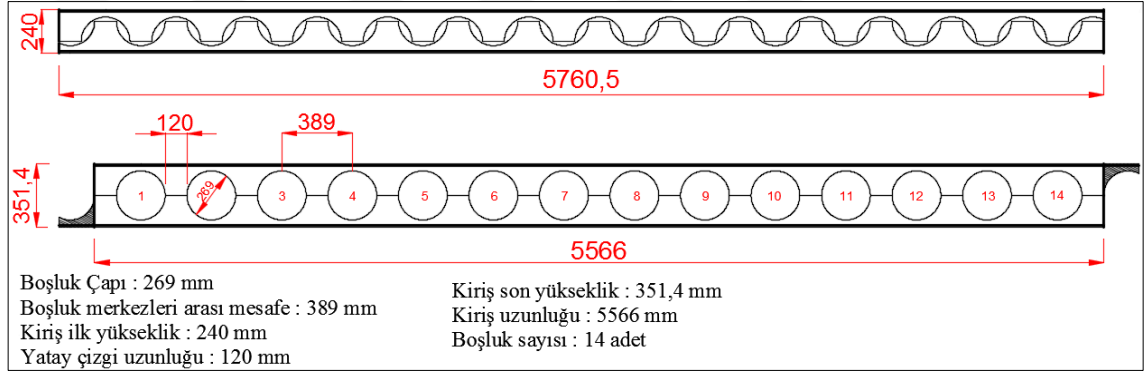


Şekil 3.12. IPE 200 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_200) detayı

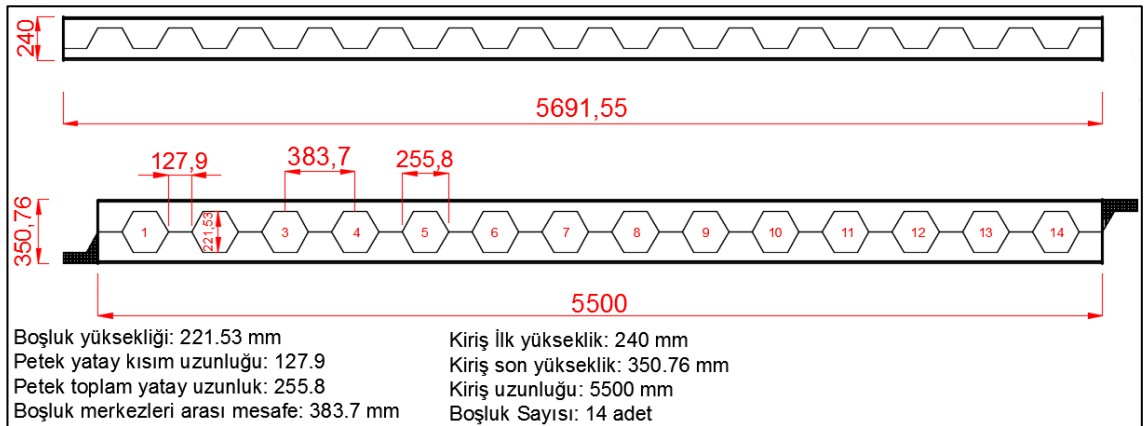
IPE_SB_DB_PB_240 kirişleri;



Şekil 3.13. IPE 240 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_240) detayı

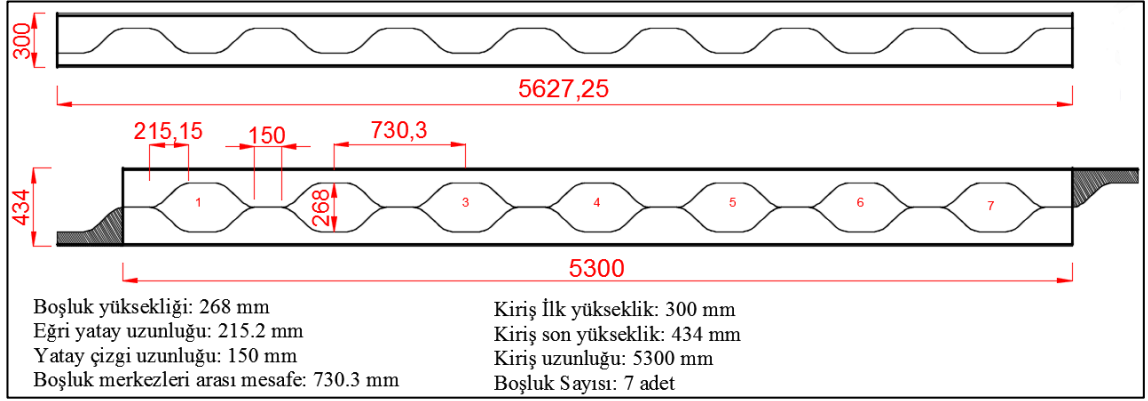


Şekil 3.14. IPE 240 dairesel boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_240) detayı

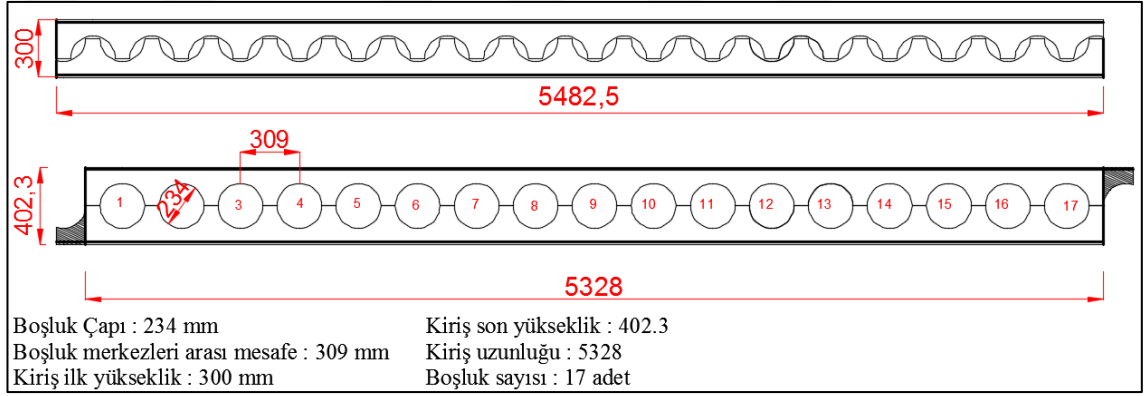


Şekil 3.15. IPE 240 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_240) detayı

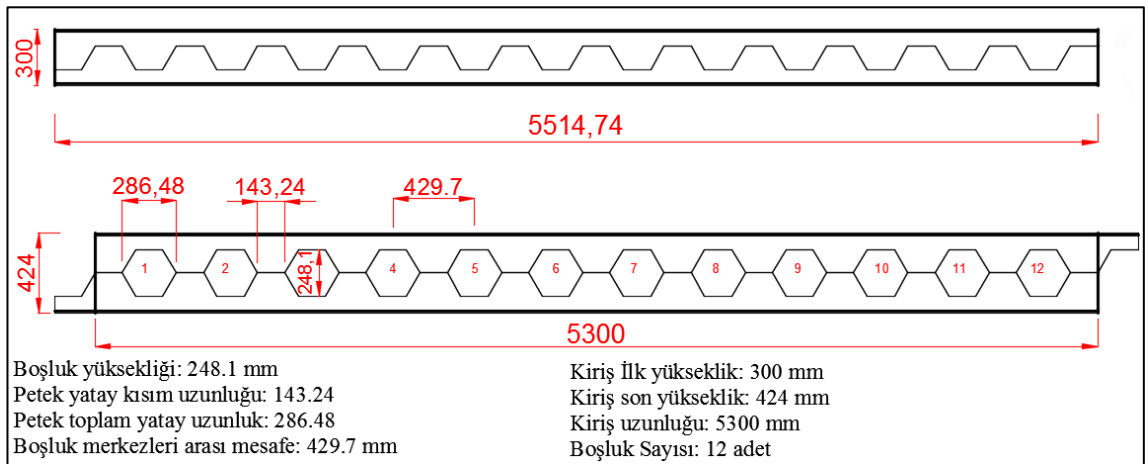
IPE_SB_DB_PB_300 kirişleri;



Şekil 3.16. IPE 300 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_300) detayı



Şekil 3.17. IPE 300 dairesel boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_300) detayı

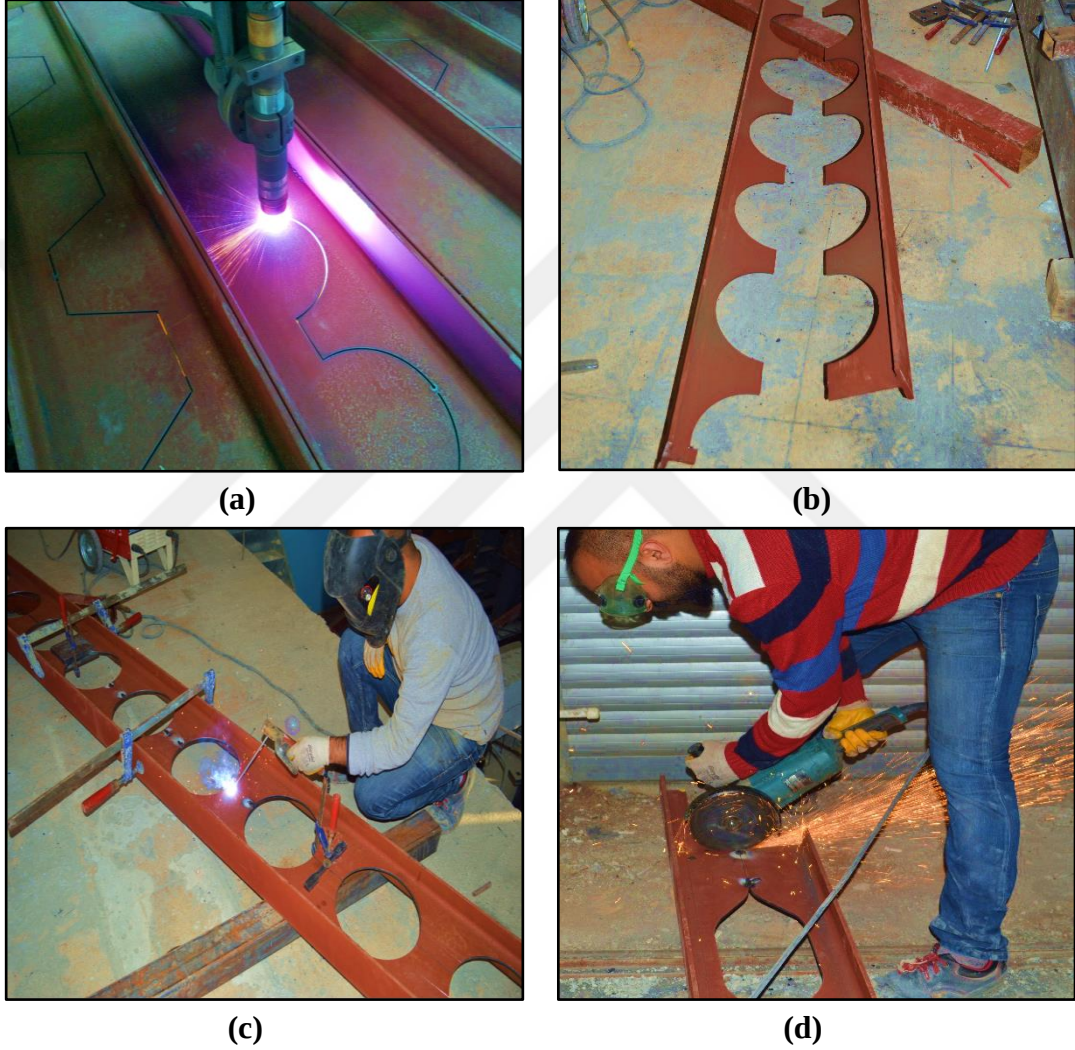


Şekil 3.18. IPE 300 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_300) detayı

3.5. Kirişlerin Deney Öncesi Hazırlıkları

3.5.1. GYA kirişlerin elde edilmesi

Çelik I-kesitli profilin gövdesi boyunca değişik formlarda kesilerek elde edilen alt ve üst parçaların kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucu oluşurlar (Şekil 3.19). Kiriş profilinin kesim işlemi, gövde bölgesinde oluşacak boşlukların bilgisayara dayalı sayısal kontrol (CNC) yöntemi ile yapılır.



Şekil 3.19. a) Kirişlerin CNC ile gövdesinden kesilmesi
b) Alt ve üst başlıkların kaydırılarak birleştirilmesi
c) Alt ve üst başlıkların sabitlenerek kaynak yapılması
d) Artan parçaların kesilmesi

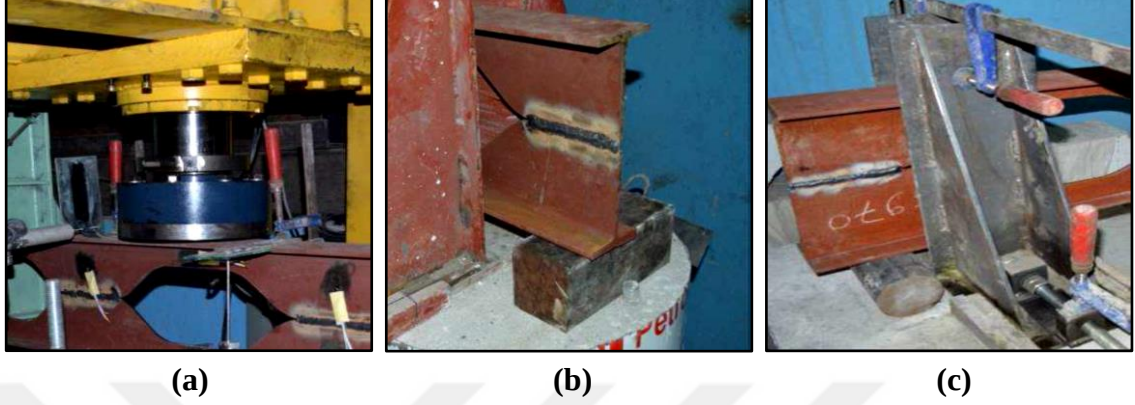
3.5.2. Kirişlerin test edilmesi

Gövde yüksekliği artırılmış (GYA) kirişler, genellikle ara mesnet gerektirmeyen büyük açıklıkları geçmek için kullanıldıklarından dolayı kiriş uzunlukları 5-5,6 metre arası seçilmiş ve her kiriş tipi için iki tekrar yapılmıştır. Bu amaçla stokastik yöntemler kullanılarak optimum boyutlandırılan sinüs eğrisi şeklinde boşluklara sahip olan IPE_SB_200, IPE_SB_240 ve IPE_SB_300; petek boşluklara sahip IPE_PB_200, IPE_PB_240 ve IPE_PB_300; dairesel boşluklara sahip IPE_DB_200, IPE_DB_240 ve IPE_DB_300 toplamda 18 (on sekiz) adet GYA profiller tasarlanmıştır. Deneylerin yapıldığı yükleme çerçevesi 1000 kN kapasiteli eğilme deneylerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu sistemde IPE200, IPE240 ve IPE300 profillerden üretilen GYA kirişlerinin sırasıyla tekil, yayılı ve iki noktadan yüklemeler altında yük kapasiteleri ve davranışları incelenmiştir. Bu kirişlere ilave olarak GYA kirişlerin atalet momenti artışından dolayı orijinal kesitlerin kapasite artışını tespit etmek amacıyla GYA kirişlerin elde edildiği orijinal profiller (IPE_200_240_300) kullanılarak aynı yükleme altında (sırasıyla tekil, yayılı, iki noktadan) deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 3.3. Kirişlerin adlandırılması ve uygulanan yükleme tipleri

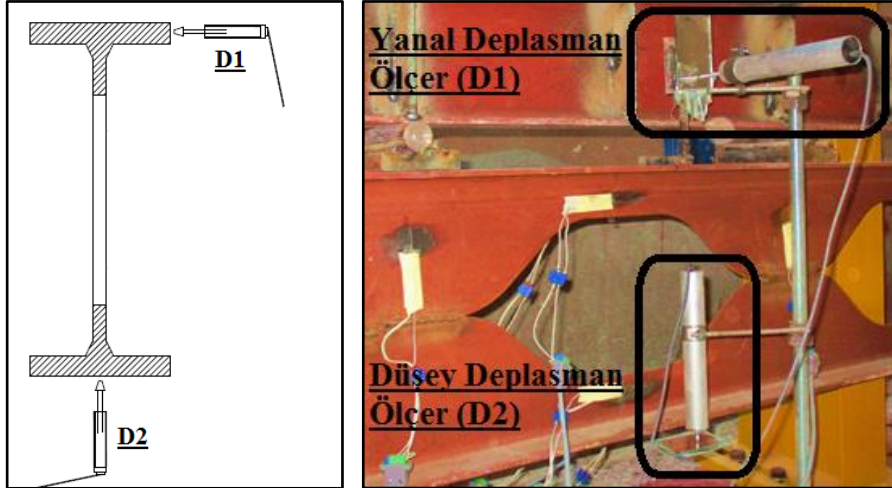
Test	Yükleme Tipi	Gövde Boşluk Tipi	Test Sayısı
IPE_SB_200	Tek Noktadan	Sinüs	2
IPE_DB_200	Tek Noktadan	Dairesel	2
IPE_PB_200	Tek Noktadan	Petek	2
ORJ IPE200	Tek Noktadan	—	1
IPE_SB_240	Yayılı	Sinüs	2
IPE_DB_240	Yayılı	Dairesel	2
IPE_PB_240	Yayılı	Petek	2
ORJ IPE240	Yayılı	—	1
IPE_SB_300	İki Noktadan	Sinüs	2
IPE_DB_300	İki Noktadan	Dairesel	2
IPE_PB_300	İki Noktadan	Petek	2
ORJ IPE300	İki Noktadan	—	1

Kirişe etki edecek yükün daha hassas değerlerle okunması amacıyla hidrolik pistonla kalibrasyonu yapılmış 1000 kN kapasiteli yük hücresi monte edilmiştir (Şekil 3.20.a). Kirişler, bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnetlerin üzerine eksantrik bir yükleme olmamasına dikkat edilerek yerleştirilmiştir (Şekil 3.20.b,c).



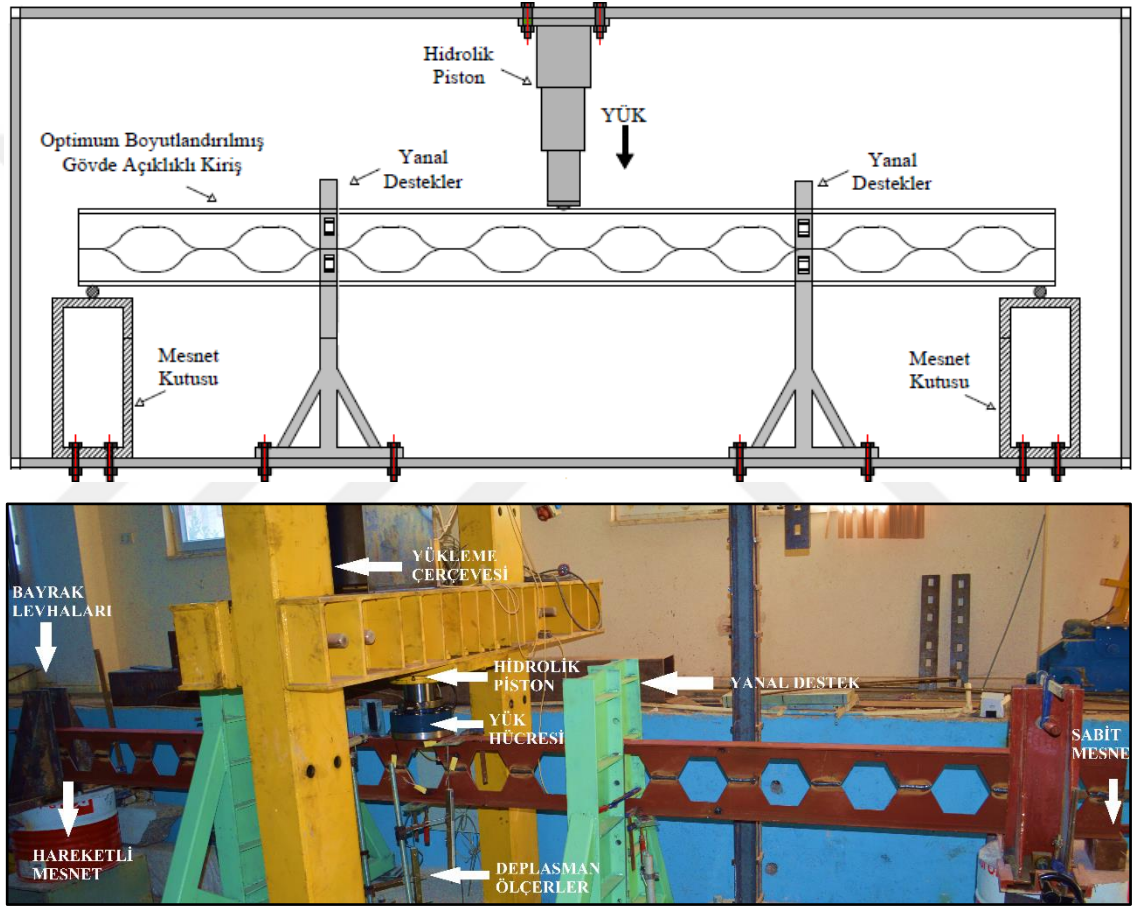
Şekil 3.20. a) Yük hücresi
b) Sabit mesnet sistemi
c) Hareketli mesnet sistemi

Yüklemeler sonucunda kirişlerde oluşacak deplasmanları ölçmek amacıyla deplasman ölçerler (doğrusal değişken diferansiyel transformatörler-LVDT) açıklık ortasının ($L/2$) alt başlığına dikey olarak ve kirişte yanal desteklere rağmen oluşabilecek yanal deplasmanlar için de açıklık ortası kiriş üst başlığına yatay olarak deplasman ölçer yerleştirilmiştir. Deplasman ölçerlerin yükleme çerçevesinde gösterimi ve konumları Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Deplasman ölçerler ve konumları

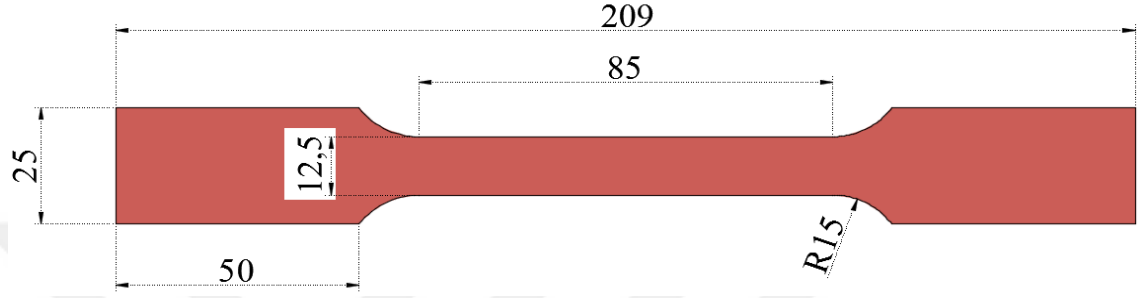
Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin gövdeleri boyunca kesilip elde edilen alt ve üst parçalarının kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda yükseklikleri buna bağlı olarak da kesit katsayıları ve atalet momentleri artar. Böylece bu kirişlerin temel özelliği olan düşey yük altında taşıma kapasitelerinin artması sağlanır. Diğer taraftan bu kirişlerin derin ve narin gövde kısmının zayıf eksenindeki eğilme rijitliği, çarpılma ve burulma sertliklerinin aynı kalması, bu kirişlerin dolu gövdeli ilk hallerine oranla yanal burkulma riskini artırır. Yapılan deneylerde yanal burkulmayı kısıtlamak amacıyla aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere belirli aralıklarla yanal destek payandaları yerleştirilmiştir. Çelik gövde yüksekliği artırılmış kirişlerden sinüsoidal ve petek boşluklu kirişin tekil yükleme altında yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Tekil yükleme test düzeneği

3.6. Kirişlerin Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi

DeneySEL verilerden elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının kıyaslanması amacıyla analizde kullanılmak üzere malzeme mukavemet özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla IPE_200 IPE_240 IPE_300 profillerinin her birinden ikişer adet olmak üzere toplamda altı adet kupon alınmıştır. Boyutları *American Society for Testing and Materials (ASTM)* yönetmeliğine göre belirlenen (Şekil 3.23) numuneler kirişlerden CNC (Bilgisayar Nümerik Kontrolü) ile Şekil 3.24'te gösterildiği gibi alınmış ve çekme testi yapılmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.23. IPE_200_240_300 profillerden alınan numunelerin boyutları

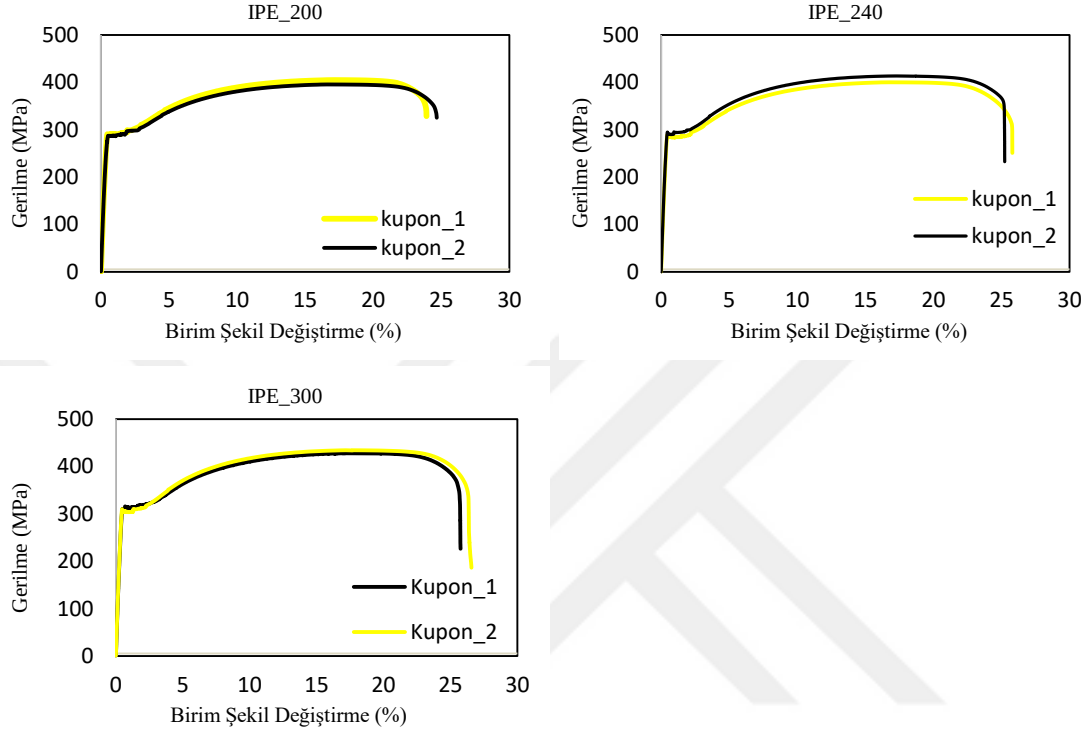


Şekil 3.24. GYA kirişlerden alınan numune örnekleri



Şekil 3.25. Çekme testi makinesi

Yapılan çekme testleri sonucunda IPE200, IPE240, IPE300 profilleri için ortalama akma gerilmeleri sırasıyla 281 MPa, 285 MPa ve 305 MPa olarak belirlenmiştir. Elastisite modülü ortalama $1,9 \times 10^5$ MPa, tanjant modülü ise 1443 MPa hesaplanmıştır (Çizelge 3.4). Şekil 3.26'da çekme testleri neticesinde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri verilmiştir.



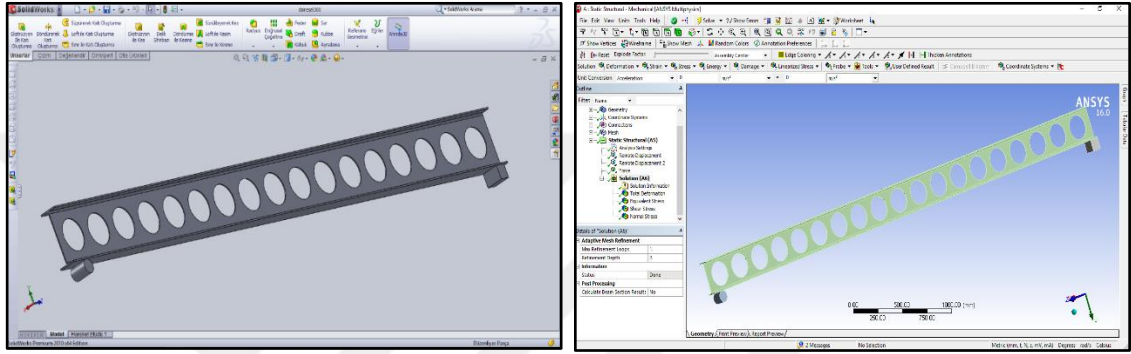
Şekil 3.26. Kuponların gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

Çizelge 3.4. Profillerin mukavemet özellikleri

Kupon	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)
IPE200	281	$1,9 \times 10^5$	1443
IPE240	285	$1,9 \times 10^5$	1443
IPE300	305	$1,9 \times 10^5$	1443

3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi

Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin deneysel kısımda bulunan yük taşıma kapasitelerinin kıyaslanması amacıyla SOLIDWORKS programında katı modellemesi yapılan kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi ANSYS-Workbench V16 ile yapılmıştır (Şekil 3.27). Deneysel bölümde yükleme çerçevesinde testleri yapılan her bir kiriş tipi için bulunan göçme yükleri ortalaması ANSYS-Workbench programında lineer olmayan analizi yapılacak şekilde simülasyonu ile kiriş üzerinde oluşacak deplasmanların ve eşdeğer gerilmelerin yanı sıra kesme ve normal gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu tez kapsamında yapılan sonlu elemanlar yöntemi ile analiz aşamaları aşağıda adım adım anlatılmıştır.



Şekil 3.27. GYA kirişlerin katı modelinin oluşturulması ve SEA

IPE200, IPE240, IPE300 profilleri için akma gerilmeleri sırasıyla 281 MPa, 285 MPa ve 305 MPa; Elastisite modülü $1,9 \times 10^5$ MPa, tanjant modülü 1443 MPa, poisson oranı ise 0,3 olarak programa girilmiştir (Çizelge 3.5). Programda malzeme tipi olarak lineer olmayan malzeme seçilmiş olup IPE_SB_200 kirişi için girilen malzeme değerleri Şekil 3.28’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.5. Profillerin mukavemet özellikleri

SEA	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)	Poisson Oranı
IPE_SB_200	281	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3
IPE_PB_200	281	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3
IPE_DB_200	281	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3
IPE_SB_240	285	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3
IPE_PB_240	285	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3
IPE_DB_240	285	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3
IPE_SB_300	305	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3
IPE_PB_300	305	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3
IPE_DB_300	305	$1,9 \times 10^5$	1443	0,3

Properties of Outline Row 4: Structural Steel NL			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	7850	kg m ⁻³
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Mod... 	
5	Young's Modulus	1.9E+05	MPa
6	Poisson's Ratio	0.3	
7	Bulk Modulus	1.5833E+11	Pa
8	Shear Modulus	7.3077E+10	Pa
9	 Field Variables		
10	Temperature	Yes 	
11	Shear Angle	No 	
12	Degradation Factor	No 	
13	 Bilinear Isotropic Hardening		
14	Yield Strength	281	MPa
15	Tangent Modulus	1443	MPa

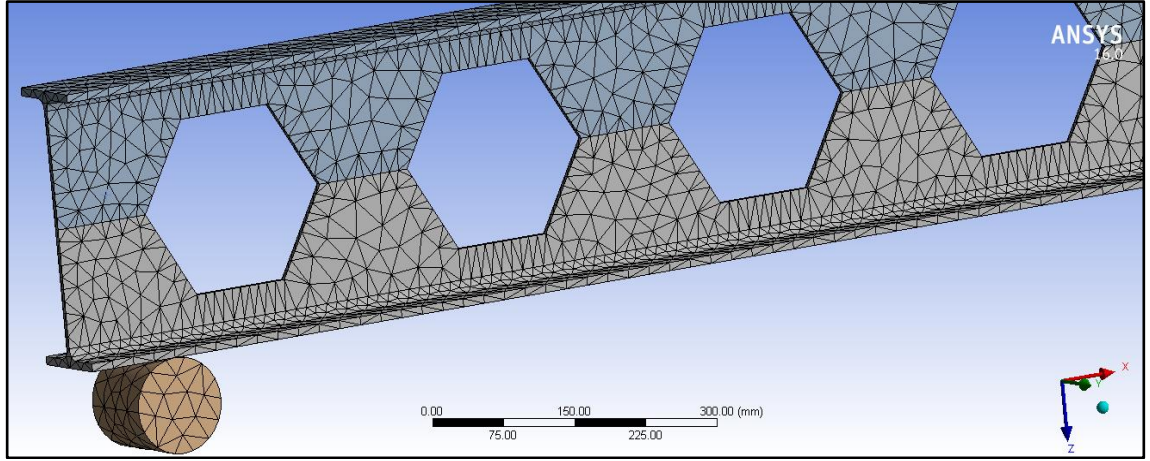
Şekil 3.28. IPE_SB_200 kirişi için girilen malzeme değerleri

3.7.1. Mesh tipinin belirlenmesi

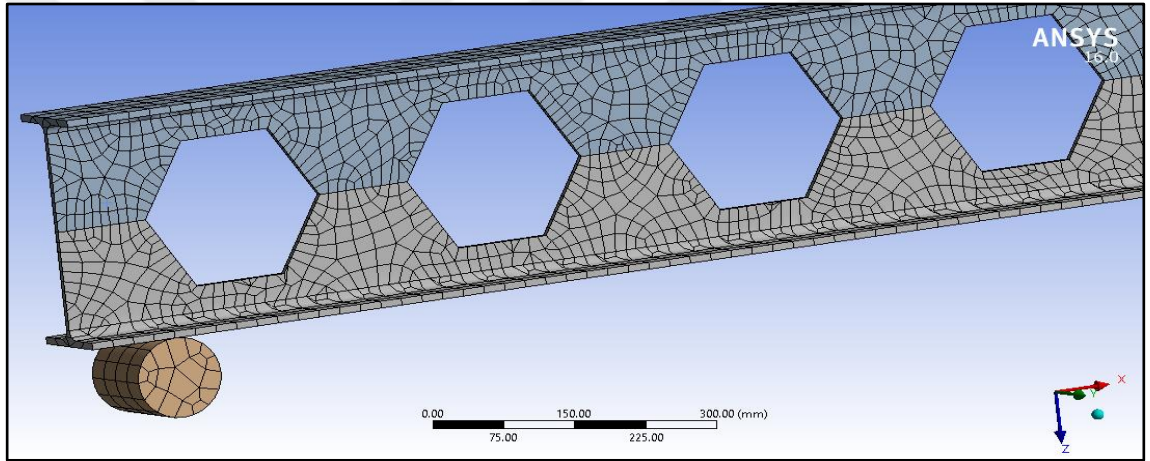
Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılırken uygun ağ boyutları (mesh size), sınır şartlarının doğru tanımlanması ve malzeme özellikleri analiz sonuçlarını etkilediğinden dolayı çok önemlidir. Diğer önemli bir husus ise mesh tipidir. En uygun mesh tipinin belirlenmesi için ANSYS-Workbench programında Automatic, Hex-Dominant, Tetrahedrons, mesh metotları 25 mm ağ boyutu (mesh size) kullanılarak Şekil 3.33'te gösterilen IPE_PB_200 kirişi üzerinde yapılmış ve sonuçlar Çizelge 3.6'da verilmiştir. Sweep mesh tipi ise GYA kirişlerin geometrisine uygun olmadığından dolayı kullanılamamıştır. Tetrahedrons mesh tipi 82591 düğüm ve 40532 parça olarak Automatic ve Hex-Dominant'a göre daha fazla düğüm (nod) ve parça (element) sayısı verdiği için sonuçların hassasiyeti açısından Tetrahedrons tercih edilmiştir. Şekil 3.29, Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de mesh tiplerine göre elde edilen görseller verilmiştir.

Çizelge 3.6. Mesh tipleri için düğüm ve parça sayısı

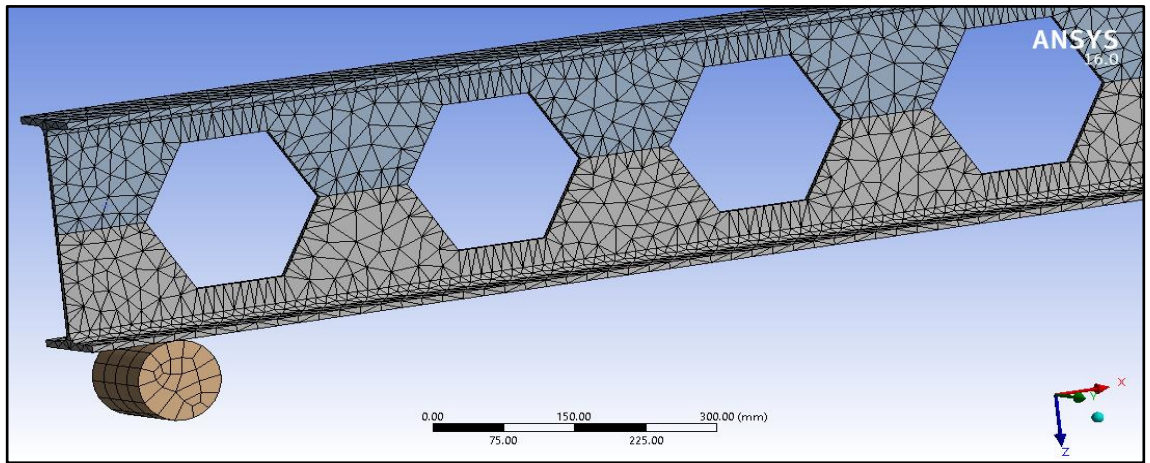
Mesh Tipi	Düğüm Sayısı	Parça Sayısı
Automatically Generated	81601	39405
Hex-Dominant	74971	22258
Tetrahedrons	82591	40532



Şekil 3.29. Tetrahedrons metodu ile gösterim



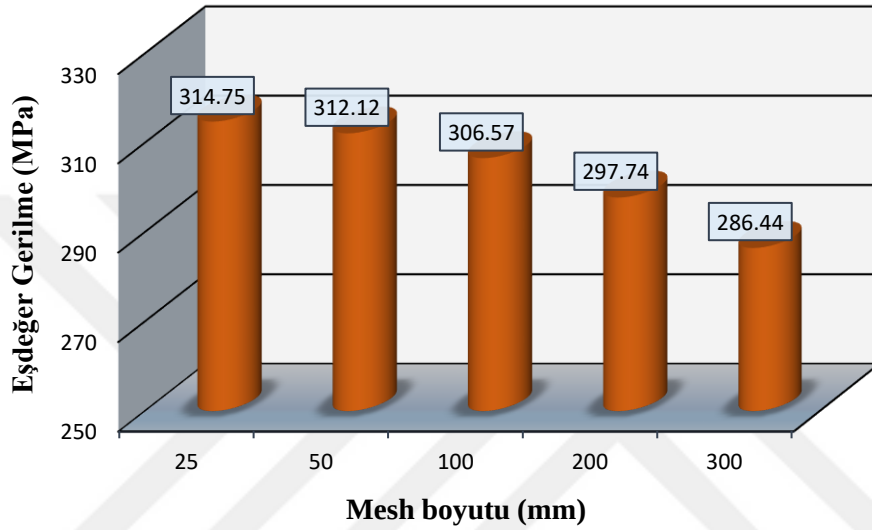
Şekil 3.30. Hex-Dominant metodu ile gösterim



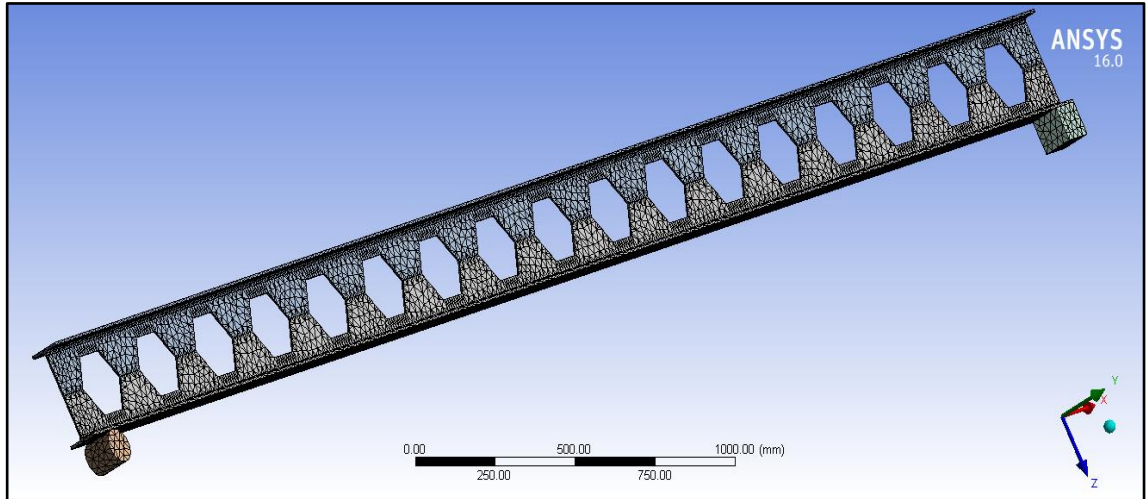
Şekil 3.31. Automatic metodu ile gösterim

3.7.2. Mesh boyutlarının belirlenmesi

Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle lineer olmayan analizi yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi mesh boyutlarıdır. Mesh boyutları belirlenirken her kiriş tipi için mesh boyutları kademe kademe azaltılmış olup ve her boyut için yapılan analizler neticesinde çıkan gerilme ve deplasman değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 3.32). Mesh boyutları 25 mm ve 50 mm kullanılarak yapılan analizler sonucunda gerilme ve deformasyonların neredeyse aynı olduğu gözlemlenmiş (Erdal 2011) ve uygun mesh boyutu olarak 25 mm tercih edilmiştir.



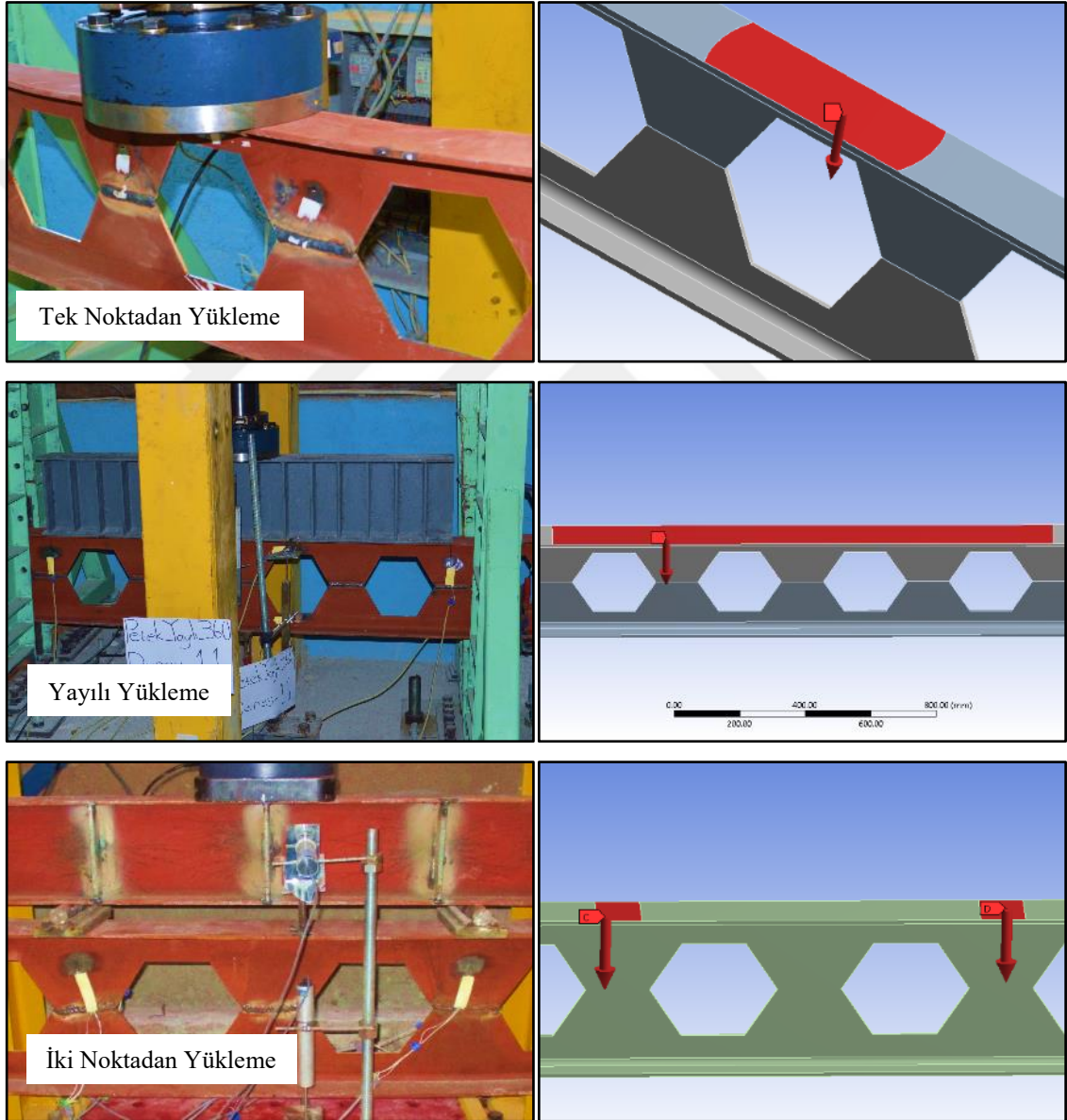
Şekil 3.32. Farklı mesh boyutları için gerilme değerleri



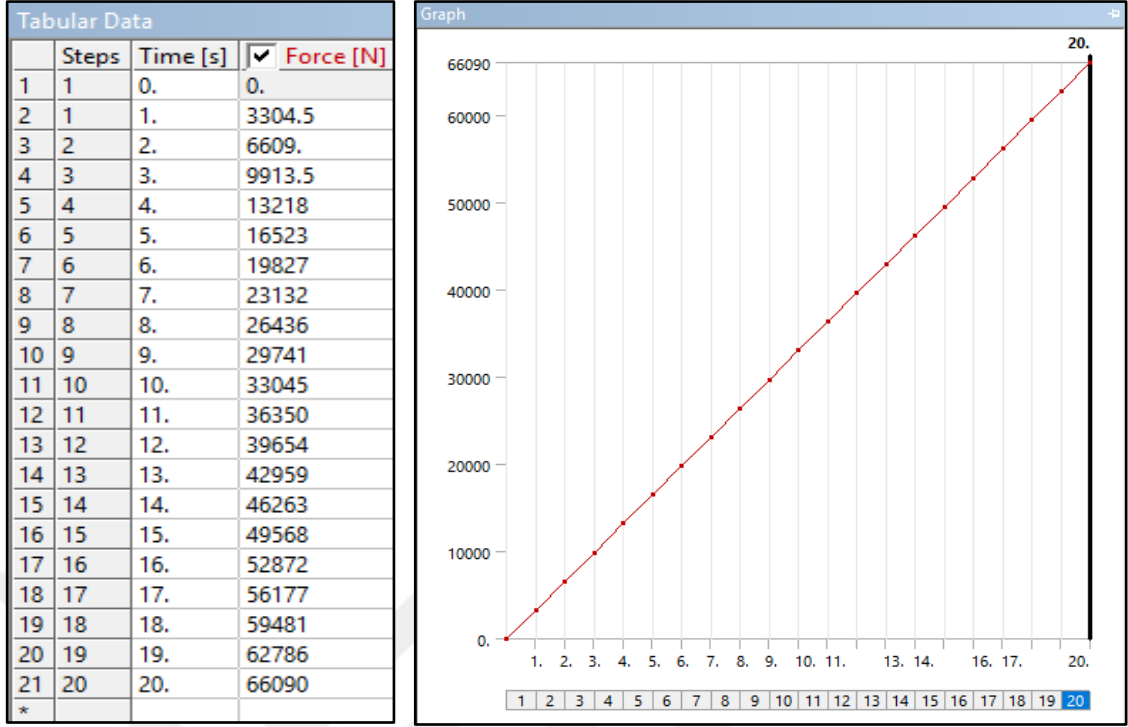
Şekil 3.33. Tetrahedrons mesh tipi (maksimum 25 mm)

3.7.3. Sınır şartları (mesnetler ve yükler)

Sonlu eleman yöntemiyle analiz yapılırken sınır şartlarının (mesnetler ve yükler) deneylerde kullanılan sınır şartlarına uygun olarak tanımlanması kıyaslama açısından oldukça önemlidir. Programda kiriş üzerine yükleme yapılırken deneysel çalışmada yükün etki ettirildiği alan baz alınarak modelde de aynı şekilde tanımlanmıştır. Şekil 3.34'te tek noktadan yükleme, yayılı yükleme ve iki noktadan yükleme altında deneysel çalışma ve model görselleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca kirişin yük altında gerçek davranışına yakın sonuçların elde edilmesi amacıyla yükleme adım adım uygulanmıştır (Şekil 3.35).

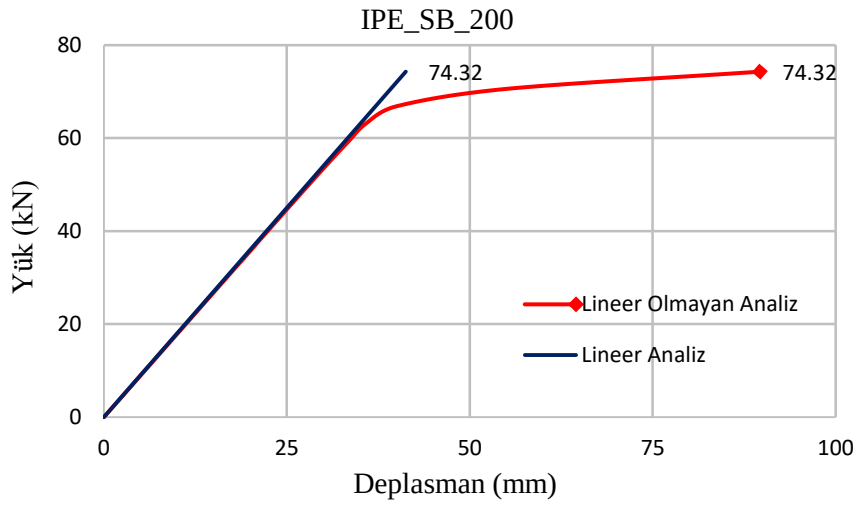


Şekil 3.34. Tekil, yayılı ve iki noktadan yükleme durumları



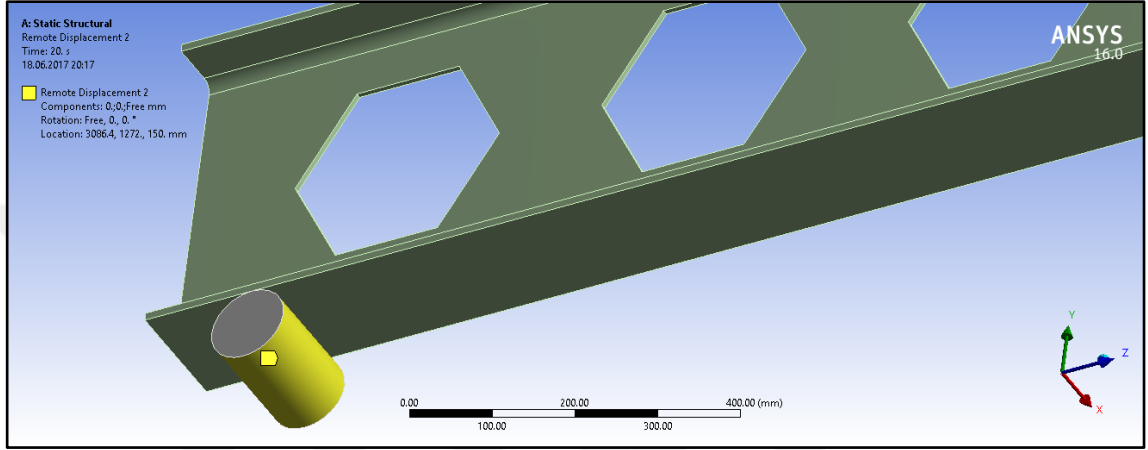
Şekil 3.35. Yüklemenin adım adım verilmesi

Yük altında kirişin gerçek davranışını gözlemlemek amacıyla yapılan lineer olmayan analiz ile lineer analiz grafiği kıyaslanması Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.36. Lineer ve lineer olmayan analiz kıyaslanması

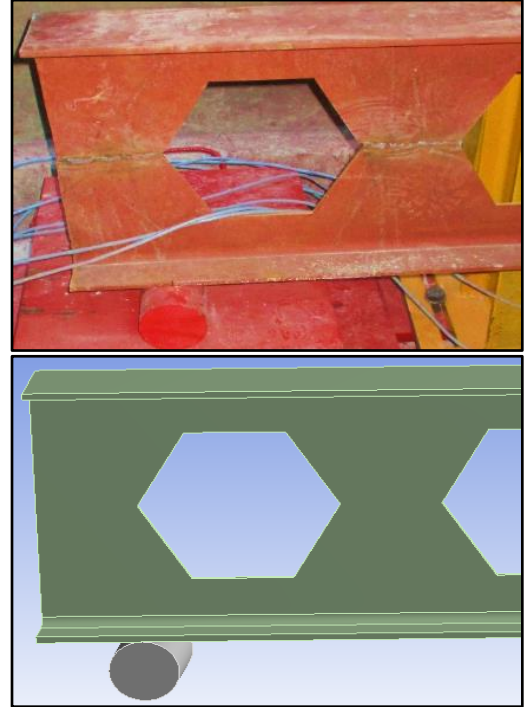
Sonlu elemanlar yöntemi analiz sonuçları ile deneysel çalışmadan elde edilen verilerin kıyaslanması diğer önemli bir husus ise sınır şartı olarak mesnet tiplerinin programa tanıtılmasıdır. Şekil 3.37 ve Şekil 3.39’da boyutları ve geometrik formu görsel açıdan deneydekilerle birebir olarak modellenen mesnetlerde Şekil 3.37’de mesnet giriş alt yüzeyine çizgisel olarak temas edecek şekilde modellenmiştir. Bu durumda temas eden yüzeylerin bağlantısı program tarafından otomatik olarak sağlanabilmektedir. Hareketli mesnet özelliği kazanması amacıyla ötelenmeler; X ve Y doğrultularında tutulu Z doğrultusunda serbesttir. Dönme serbestlikleri ise X eksenini etrafında serbest Y ve Z eksenleri etrafında tutulmuştur (Şekil 3.38.a).



Şekil 3.37. Hareketli mesnet

Details of "Remote Displacement 2"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Coordinate System	Global Coordinate System
☐ X Coordinate	3086.4 mm
☐ Y Coordinate	1272. mm
☐ Z Coordinate	150. mm
Location	Click to Change
Definition	
Type	Remote Displacement
☐ X Component	0. mm (ramped)
☐ Y Component	0. mm (ramped)
☐ Z Component	Free
☐ Rotation X	Free
☐ Rotation Y	0. ° (ramped)
☐ Rotation Z	0. ° (ramped)
Suppressed	No
Behavior	Deformable

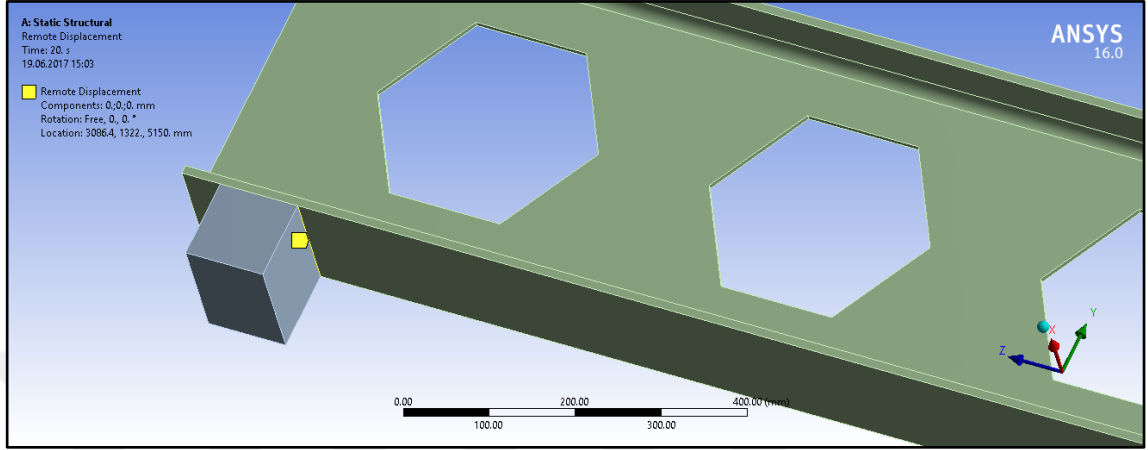
(a)



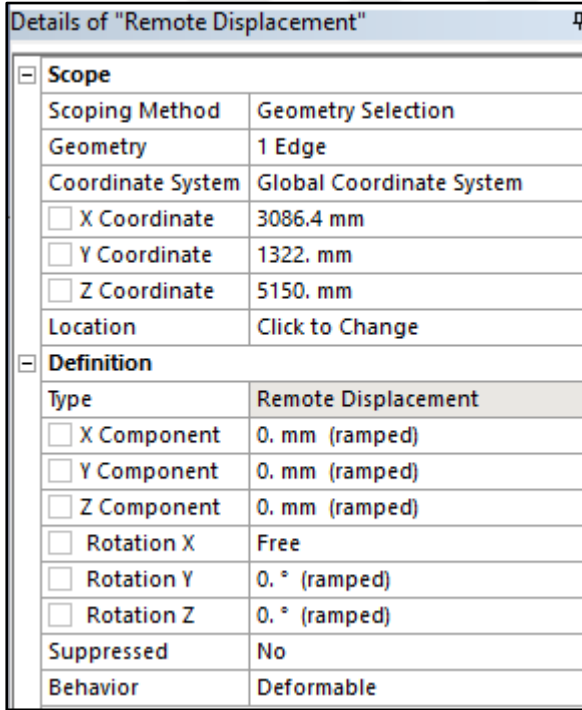
(b)

Şekil 3.38. Hareketli mesnet; a) SEA mesnet serbestlikleri
b) Deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırma

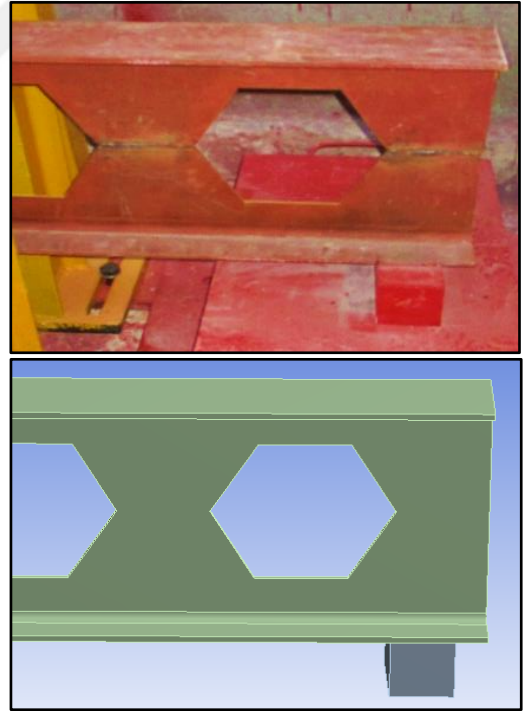
Şekil 3.39’da sabit mesnet olarak tanımlanan mesnette ise kiriş alt yüzeyine alansal olarak temas edecek şekilde modellenmiştir. Temas eden yüzeylerin bağlantısı program tarafından otomatik olarak sağlanmış olup sabit mesnet özelliği kazanması amacıyla ötelenmeler; X, Y ve Z doğrultularında tutulu dönme serbestlikleri ise X eksenı etrafında serbest Y ve Z eksenleri etrafında tutulmuştur (Şekil 3.40.a).



Şekil 3.39. Sabit mesnet



(a)



(b)

Şekil 3.40. Sabit mesnet; a) SEA mesnet serbestlikleri

b) Deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırma

Son olarak Şekil 3.41’de ANSYS-Workbench programında kullanılan analiz ayarları verilmiştir.

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	20.
Current Step Number	20.
Step End Time	20. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Poi...	Program Controlled
Retain Files After Fu...	No
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson O...	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Conve...	Program Controlled
Rotation Convergen...	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneo...	No
General Miscellaneo...	No
Store Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	
Future Analysis	None
Scratch Solver Files ...	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Fil...	Yes
Nonlinear Solution	Yes

Şekil 3.41. Analiz ayarları

4. BULGULAR

4.1. IPE 200 Testleri (tekil yükleme)

Sinüsoidal boşluklu (SB), petek boşluklu (PB) ve dairesel boşluklu (DB) gövde yüksekliği artırılmış (GYA) IPE_200 kirişlerinin tekil yük altında yük taşıma kapasitelerinin ve göçme modlarının tespit edilmesi amacıyla IPE_SB_200 kirişi için 2 (iki) adet IPE_PB_200 kirişi için 2 (iki) adet ve IPE_DB_200 kirişi için 2 (iki) adet eğilme testleri yapılmıştır. Bu testlere ilave olarak, GYA kirişlerin atalet momentlerinin artışından dolayı orijinal kesitin kapasitesindeki artış yüzdesini tespit etmek amacıyla orijinal IPE200 kirişi için 1 (bir) adet toplamda ise 7 (yedi) adet eğilme testi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.1).

Deneyisel verilerin kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup kirişlerin yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması, yük taşıma kapasiteleri, göçme modları ve verilmiştir. Ayrıca, IPE_SB_DB_PB_200 kirişlerin geometrik ölçüleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. IPE_SB_PB_DB_200 kirişleri test sayıları

Test	Yükleme Tipi	Gövde Boşluk Tipi	Test Sayısı
IPE_SB_200	Tek Noktadan	Sinüs	2
IPE_DB_200	Tek Noktadan	Dairesel	2
IPE_PB_200	Tek Noktadan	Petek	2
ORJ IPE200	Tek Noktadan	–	1

Çizelge 4.2. IPE_SB_PB_DB_200 kirişleri geometrik ölçüleri

mm	IPE_SB_200	IPE_PB_200	IPE_DB_200
Kiriş İlk Yükseklik	200	200	200
Kiriş Son Yükseklik	283	288,9	295,1
Boşluk Yüksekliği	165,9	183,1	218
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	605,4	317,3	286
Eğri Yatay Uzunluğu	152,7	-	-
Yatay Çizgi Uzunluğu	150	105,77	68
Boşluk Sayısı	9	17	19
Toplam Yatay Uzunluk	5598 ¹	5500	5502

¹ Tekil yükleme altında yapılan testlerde kirişlerin toplam yatay uzunluklarındaki farklılıklardan dolayı mesnetler arası net açıklığın her 3(üç) tip kirişte de aynı olmasına dikkat edilmiştir.

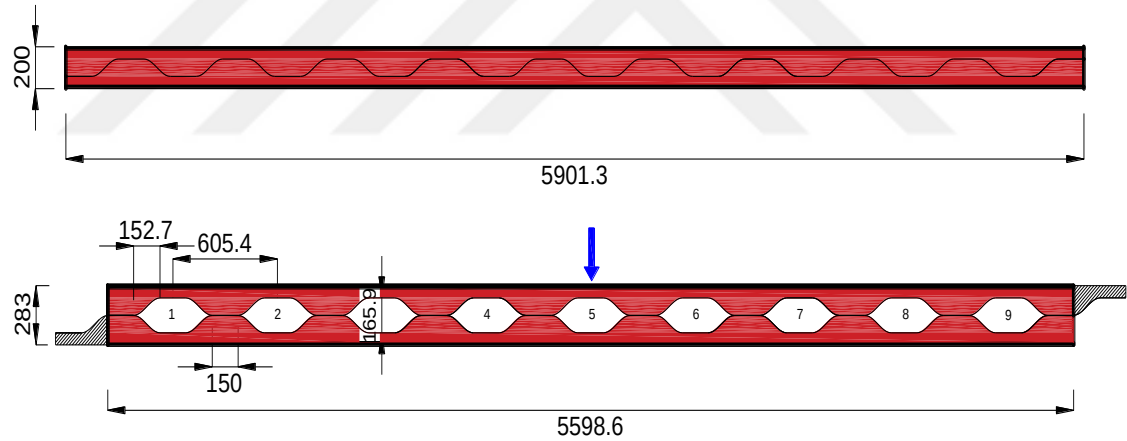
4.1.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_200 kirişleri

Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 1000 kN kapasiteye sahip yük hücresi 560 cm açıklıklı kirişin tam ortasından etki etmektedir.

Sinüsoidal boşluklu çelik kirişlerin tekil yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.1’de ve bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sinüsoidal boşluklu kiriş testi; tekil yükleme durumu



Kiriş İlk Yükseklik	200 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	152,7 mm
Kiriş Son Yükseklik	283 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	150 mm
Boşluk Yüksekliği	165,9 mm	Boşluk Sayısı	9
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	605,4 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5598,6mm

Şekil 4.2. IPE_200 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_200) detayı

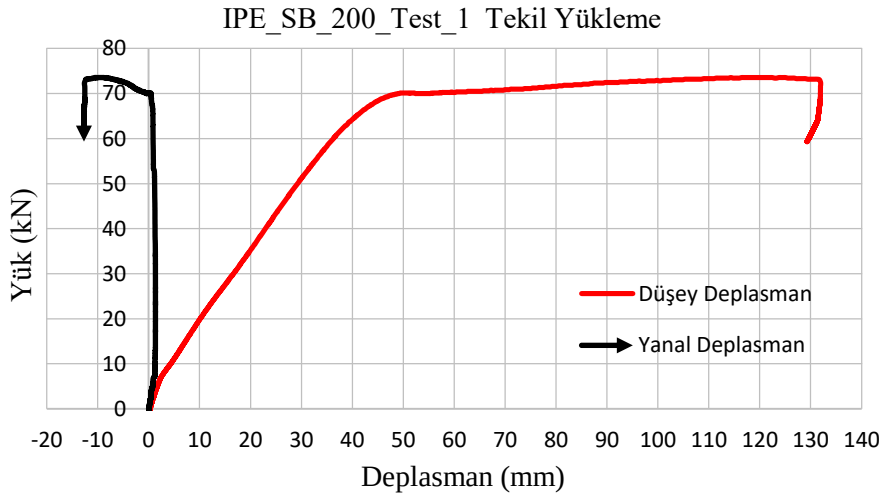
4.1.1.1. IPE_SB_200_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.2’de detaylı olarak verilen ilk sinüs boşluklu kiriş tekil yük altında test edilmiştir. IPE_SB_200_Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 73,58 kN olarak ölçülmüştür. Bu testte kirişin 70 kN yüke kadar herhangi bir yanal deplasman yapmadığı fakat bu değerden sonra kirişin üst başlığından itibaren yanal ötelenildiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.3, Şekil 4.4).



Şekil 4.3. IPE_SB_200_Test_1; tekil yükleme altında yanal burkulma durumu

IPE_SB_200_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.4’te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere tekil yükleme 70 kN’u aştıktan sonra kirişin orta kısmında önemli ölçüde yanal ötelenme ölçülmüştür.



Şekil 4.4. IPE_SB_200_Test_1; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiği

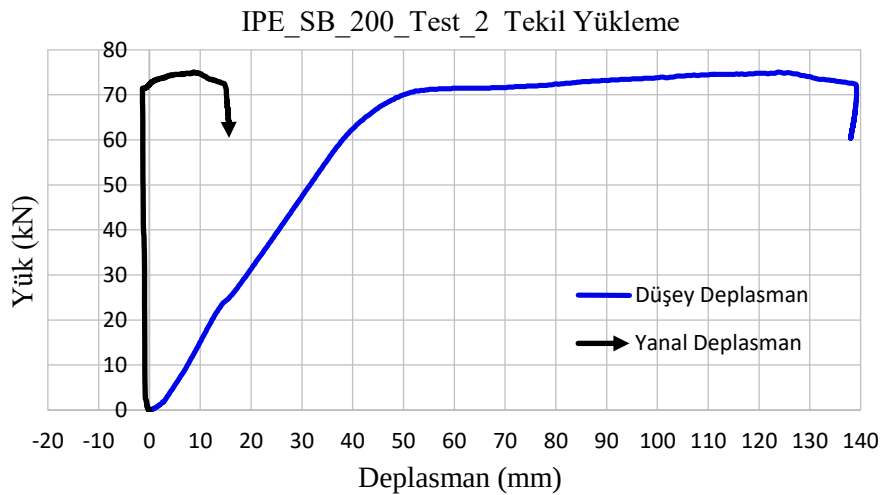
4.1.1.2. IPE_SB_200_Test_2

İkinci sinüs eğrisi şeklinde boşluklu kiriş tekil yük altında test edilmiştir. IPE_SB_200_Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 75,05 kN olarak ölçülmüştür. Bu testte kirişin 71.6 kN yüke kadar herhangi bir yanal deplasman yapmadığı fakat bu değerden sonra kirişin üst başlığından itibaren yanal ötelendiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.5, Şekil 4.6).



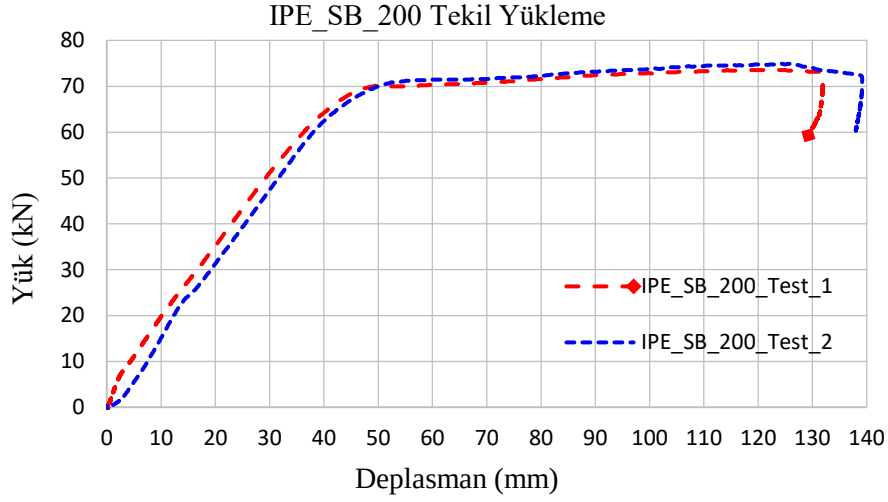
Şekil 4.5. IPE_SB_200_Test_2; tekil yükleme altında yanal burkulma durumu

IPE_SB_200_Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.6'da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere tekil yükleme 71,6 kN olan kapasitesine ulaşana kadar bir yanal deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. IPE_SB_200_Test_2; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiği

Sinüsoidal boşluklu kiriş (IPE_SB_200) için tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 73,58 kN ve 75,05 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri karşılaştırması Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. IPE_SB_200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikleri

IPE_SB_200 kirişlerinin tekil yükleme altında deney fotoğrafları Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. IPE_SB_200 kirişleri deney fotoğrafları.

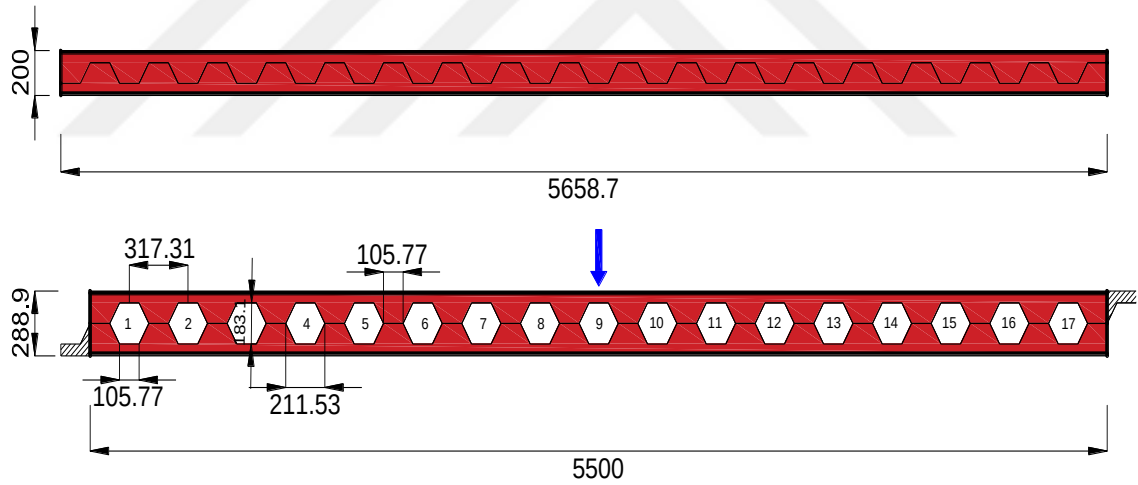
4.1.2. Petek boşluklu IPE_200 kirişleri

Yüklemeye çerçevesine entegre edilmiş olan 1000 kN kapasiteye sahip yük hücresi 550 cm açıklıklı kirişin tam ortasından etki etmektedir.

Petek boşluklu çelik kirişlerin tekil yük altında yüklemeye çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.9’da, bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Petek boşluklu kiriş testi; tekil yükleme durumu



Kiriş İlk Yükseklik	200 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	-
Kiriş Son Yükseklik	288,9 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	105,77 mm
Boşluk Yüksekliği	183,1 mm	Boşluk Sayısı	17 mm
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	317,3 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5500 mm

Şekil 4.10. IPE_200 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_200) detayı

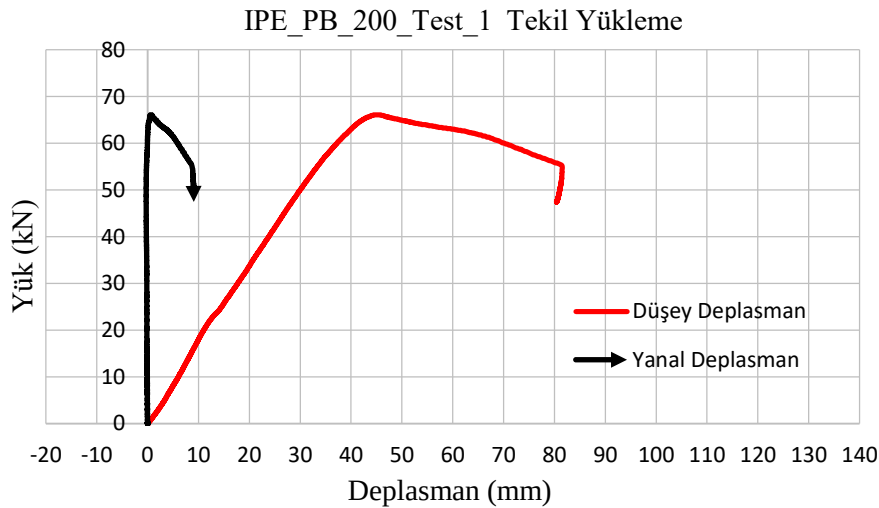
4.1.2.1. IPE_PB_200_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.10’da detaylı olarak verilen ilk petek boşluklu kiriş tekil yük altında test edilmiştir. IPE_PB_200_Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 66,09 kN olarak ölçülmüştür. Bu testte kirişin 63 kN yüke kadar herhangi bir yanal deplasman yapmadığı fakat bu değerden sonra kirişin üst başlığından itibaren yanal ötelendiği gözlemlenmiştir. Yanal burkulmayla beraber kirişin üst başlığındaki normal basınç kuvvetlerine ve kirişin yanal doğrultudaki şekil değiştirmesine bağlı olarak yerel burkulmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. IPE_PB_200_Test_1; yanal burkulma ve yerel burkulma

IPE_PB_200_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey deplasman ve yanal deplasman Şekil 4.12’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere deney esnasında kiriş maksimum yüke ulaşmasıyla beraber yanal burkulmaya ve yerel burkulmalara bağlı olarak stabilite kaybına uğramıştır. Bu durum yükteki artışı sınırlayarak yükün düşmesine neden olmuştur.



Şekil 4.12. IPE_PB_200_Test_1; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiği

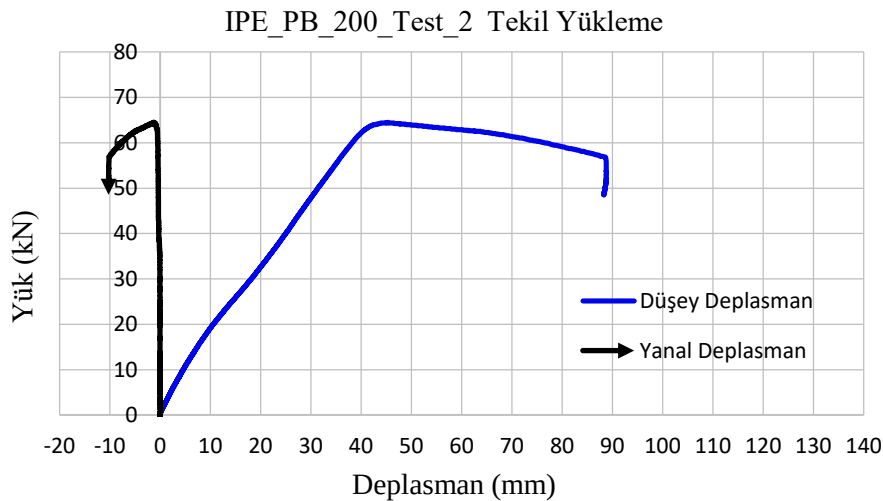
4.1.2.2. IPE_PB_200_Test_2

İkinci petek boşluklu kiriş tekil yük altında test edilmiştir. IPE_PB_200_Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 64,50 kN olarak ölçülmüştür. Bu testte kirişin 62 kN yüke kadar herhangi bir yanal deplasman yapmadığı fakat bu değerden sonra kirişin üst başlığından itibaren yanal olarak ötelendiği gözlemlenmiştir. İlk testte olduğu gibi yanal burkulmayla beraber kirişin üst başlığındaki normal basınç kuvvetlerine ve kirişin yanal doğrultudaki şekil değiştirmesine bağlı olarak yerel burkulmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.13).



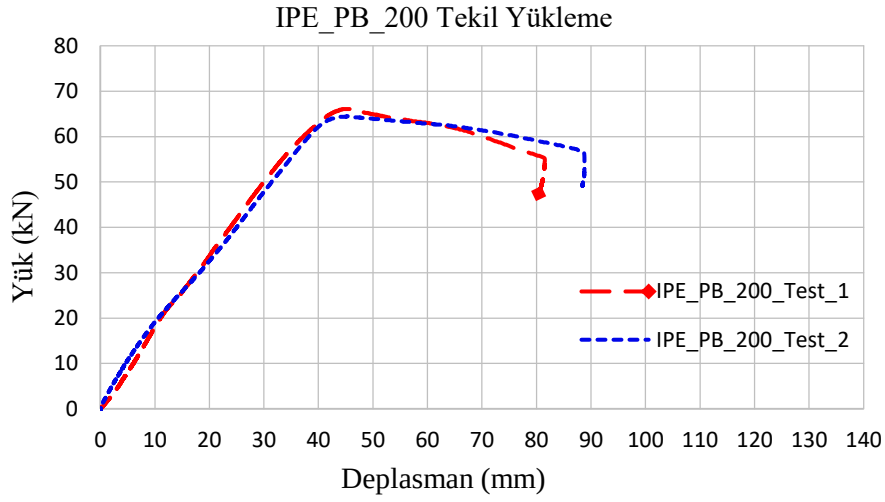
Şekil 4.13. IPE_PB_200_Test_2; yanal burkulma ve yerel burkulma durumu

IPE_PB_200_Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı deplasmanlar Şekil 4.14'te verilmiştir. Deney esnasında kirişin 62 kN'a kadar yanal deplasman yapmadığı sonrasında ise ilk testte olduğu gibi yanal burkulmaya ve yerel burkulmalara bağlı olarak yükte düşme meydana geldiği tespit edilmiştir.



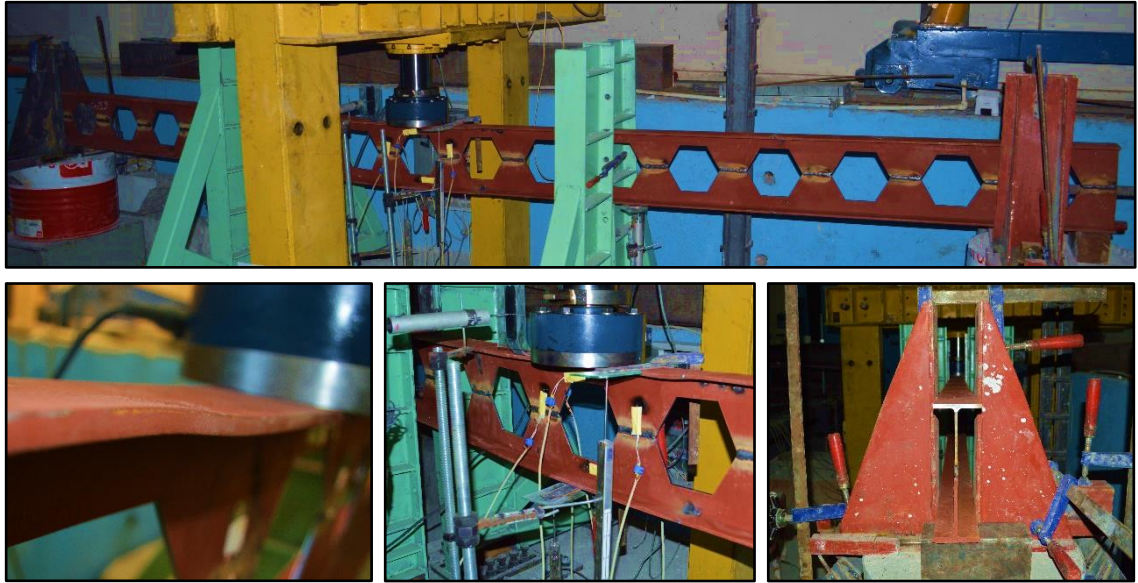
Şekil 4.14. IPE_PB_200_Test_2; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiği

Petek boşluklu kiriş (IPE_PB_200) için tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 66,09 kN ve 64,50 kN) yaptığı maksimum düşey deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. IPE_PB_200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikleri

IPE_PB_200 kirişlerinin tekil yükleme altında deney fotoğrafları Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğrafları.

4.1.3. Dairesel boşluklu IPE_200 kirişleri

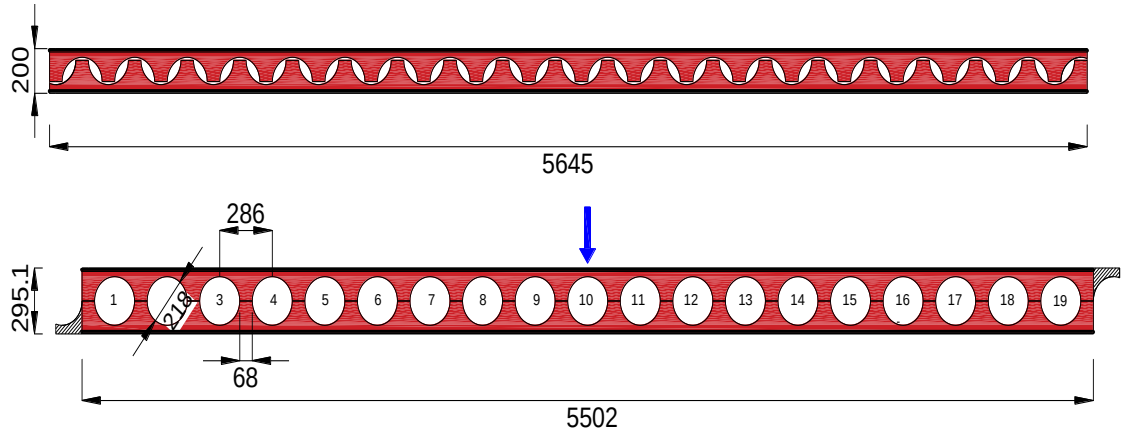
Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 1000 kN kapasiteye sahip yük hücresi 550 cm açıklıklı kirişin tam ortasından etki etmektedir. Yanal destekler ise kirişin $L/3$ ve $2L/3$ konumlarına ve diğer testlerde olduğu gibi mesnet bölgelerine de yerleştirilmiştir.

Deplasman ölçerlerin konumları her üç kiriş tipi için aynı olacak şekilde kiriş alt başlığının ortasına düşey deplasman ölçer, kiriş üst başlığının ortasına ise yanal deplasman ölçer yerleştirilmiştir.

Dairesel boşluklu çelik kirişlerin tekil yük altında yanal destekli olarak yüklemeye çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.17’de bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Dairesel boşluklu kiriş testi; tekil yükleme durumu

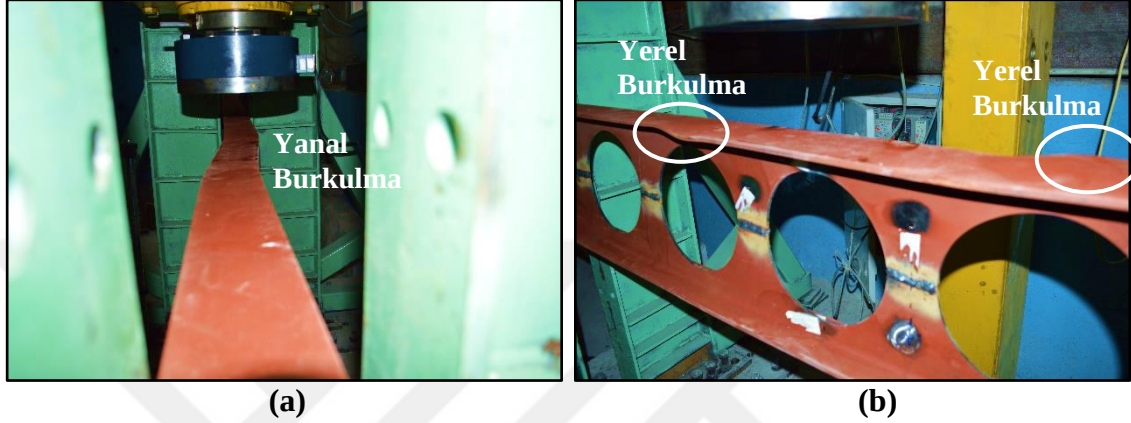


Kiriş İlk Yükseklik	200 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	-
Kiriş Son Yükseklik	295,1 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	68 mm
Boşluk Yüksekliği	218 mm	Boşluk Sayısı	19
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	286 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5502 mm

Şekil 4.18. IPE_200 dairesel boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_200) detayı

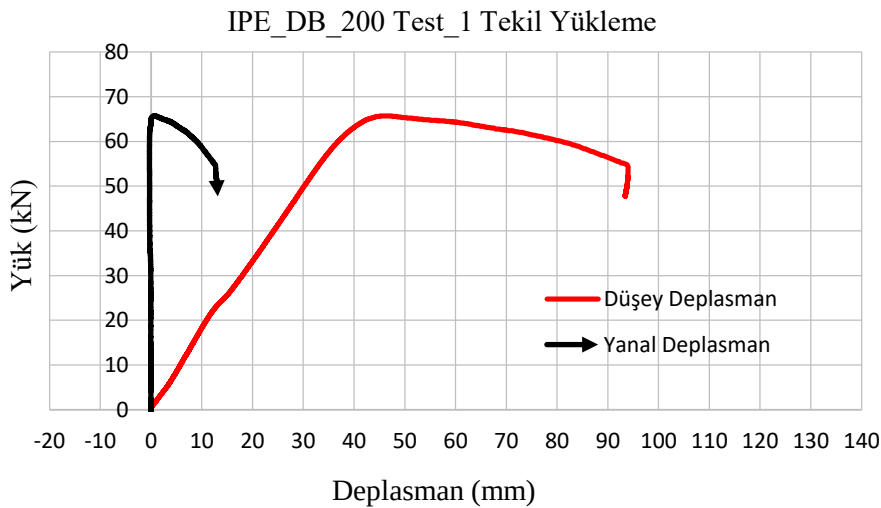
4.1.3.1. IPE_DB_200_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.18’de detaylı olarak verilen ilk dairesel boşluklu kiriş tekil yük altında test edilmiştir. IPE_DB_200_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 65,73 kN olarak ölçülmüştür. Bu testte kiriş nihai yüke ulaşana kadar herhangi bir yanal deplasman yapmadığı sonrasında ise Şekil 4.19’da görüldüğü üzere yanal burkulma ve yerel burkulmalara bağlı olarak yük taşıma kapasitesinde düşme meydana gelmiştir.



Şekil 4.19. IPE_DB_200_Test_1; tekil yükleme altında göçme durumu

IPE_DB_200_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey ve yanal deplasman Şekil 4.20’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere tekil yükleme altında yanal deplasmanların başlaması yükteki artışı sınırlayıp yükün düşmesine neden olmuştur.



Şekil 4.20. IPE_DB_200_Test_1; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiği

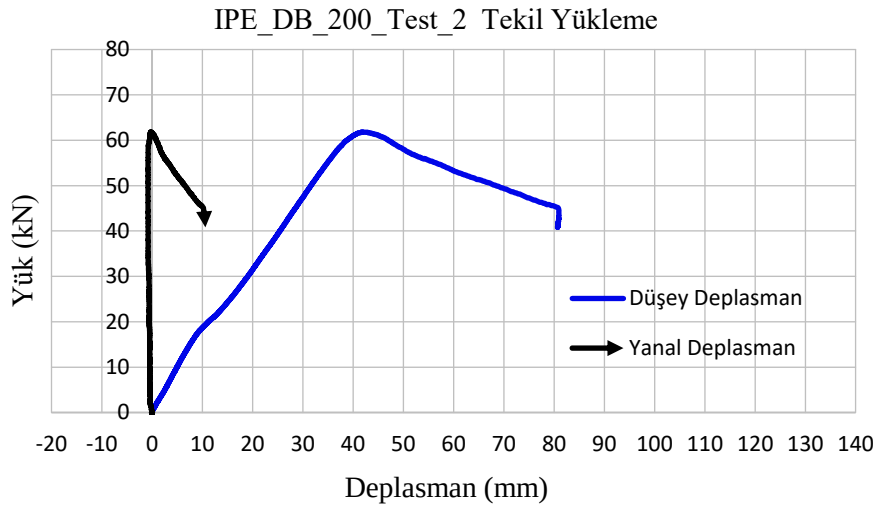
4.1.3.2. IPE_DB_200_Test_2

İkinci dairesel boşluklu çelik kiriş tekil yükleme altında test edilmiştir. IPE_DB_200_Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 61,93 kN olarak ölçülmüştür. Kiriş nihai yüke ulaşana kadar herhangi bir yanal deplasman yapmadığı sonrasında ise ilk testteki duruma benzer olarak Şekil 4.21’de görüldüğü üzere yanal burkulma ve yerel burkulma göçme modları tespit edilmiştir.



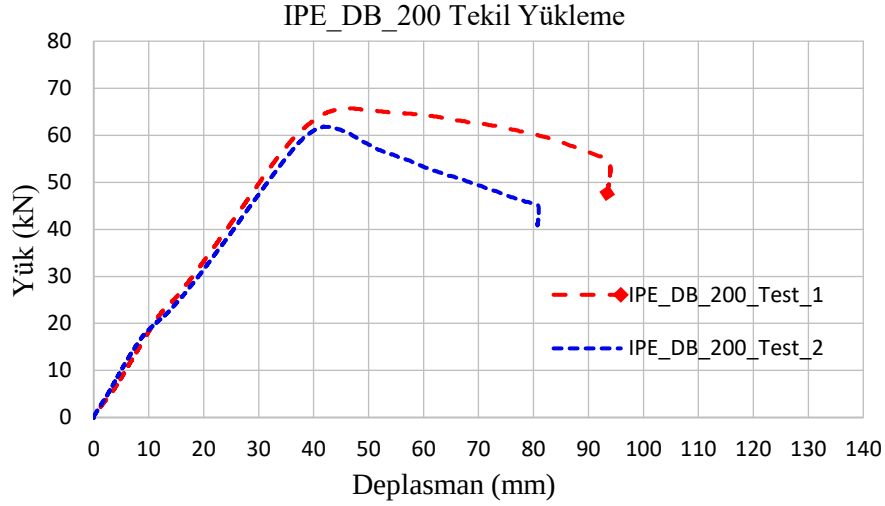
Şekil 4.21. IPE_DB_200_Test_2; a) Yanal burkulma
b) Yerel burkulma

IPE_DB_200_Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey ve yanal deplasman Şekil 4.22’de verilmiştir.



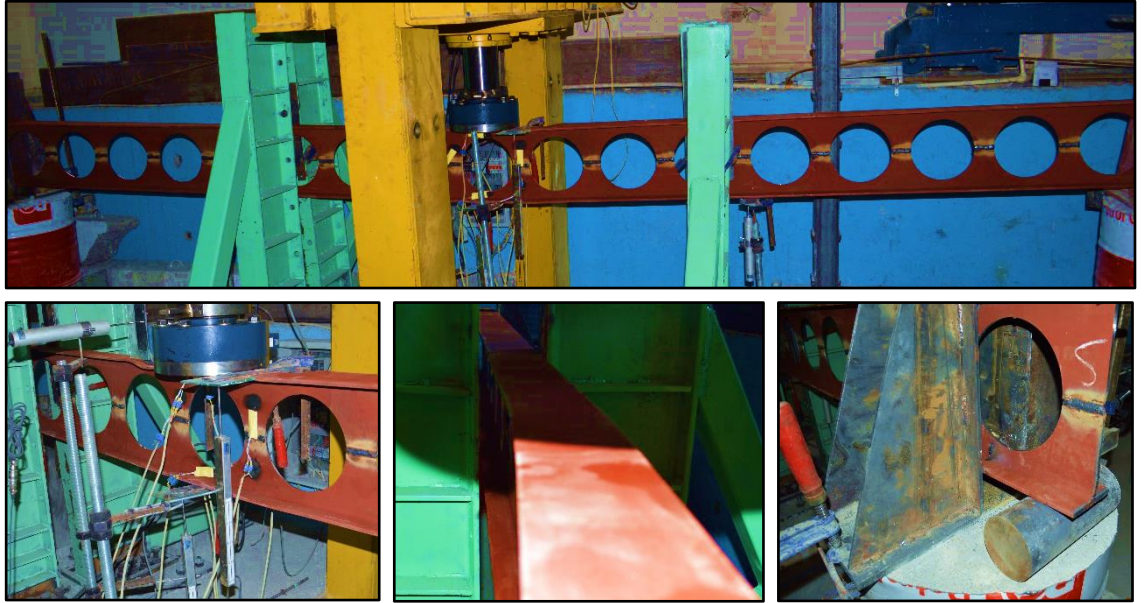
Şekil 4.22. IPE_DB_200_Test_2; tekil yükleme altında yük-deplasman grafiği

Dairesel boşluklu kiriş (IPE_DB_200) için tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 65,73 kN ve 61,93 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23. IPE_DB_200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikleri

IPE_DB_200 kirişlerinin tekil yükleme altında deney fotoğrafları Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğrafları

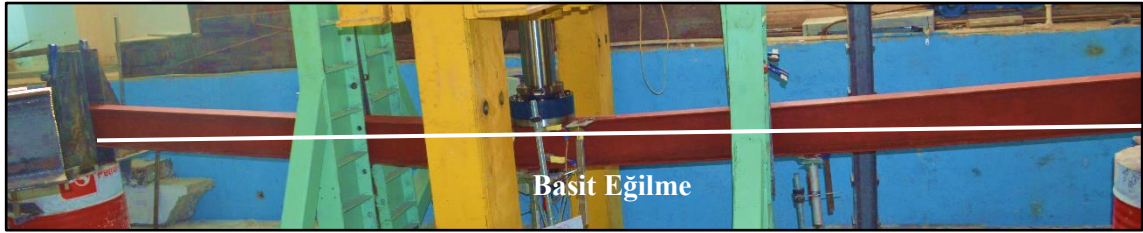
4.1.4. Orijinal IPE200 kirişi

Sinüsoidal, petek, dairesel boşluklu kirişlere ilave olarak kirişin atalet momenti artışına bağlı olarak kapasitelerindeki artış yüzdesini belirlemek amacıyla bu kirişlerin elde edildiği orijinal profil (IPE200) kullanılarak tekil yükleme altında testi yapılmıştır (Şekil 4.25).

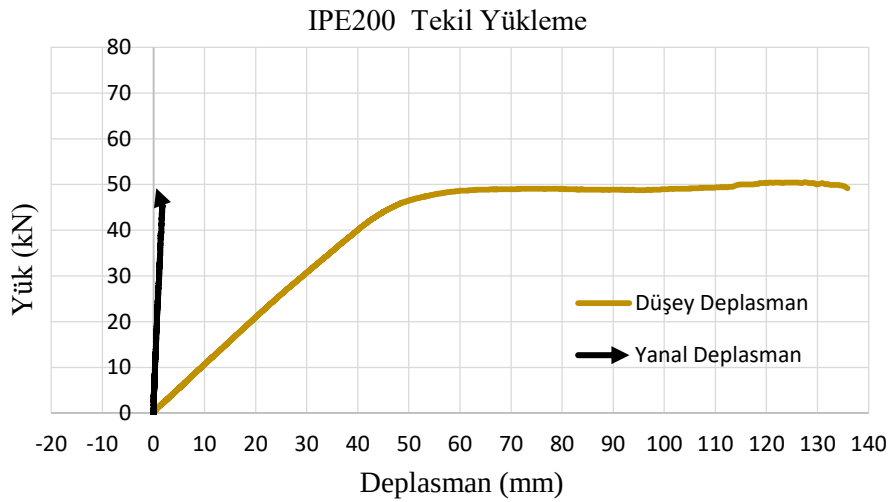


Şekil 4.25. Orijinal IPE200 kirişi testi; tekil yükleme durumu

Deney sonucunda kirişin göçme yükü 50,53 kN olarak belirlenmiştir. Şekil 4.27’de görüleceği üzere önemsenmeyecek düzeyde yanal deplasman yapmış olup kirişin göçme modu basit eğilme olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.27).



Şekil 4.26. IPE200; tekil yükleme altında göçme durumu



Şekil 4.27. IPE200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikleri

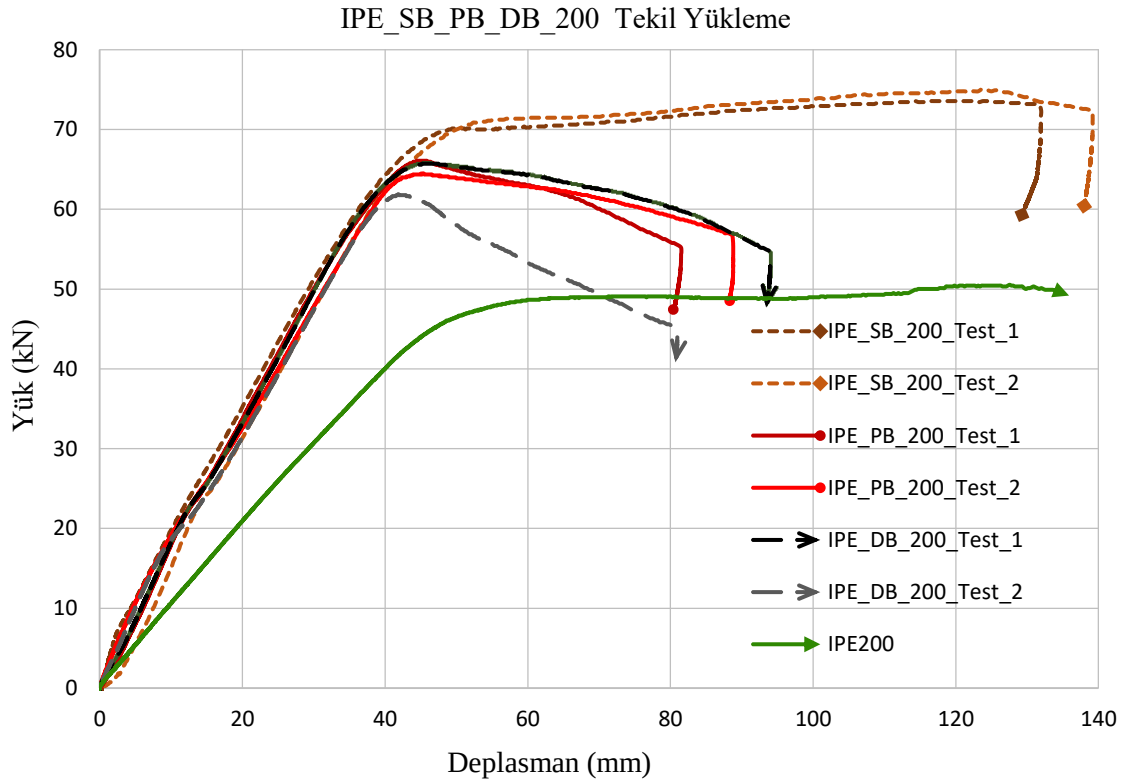
4.1.5. IPE_200 kirişlerinin karşılaştırılması

Farklı boşluk geometrik yapılarına sahip IPE_200 eleman bazlı gövde yüksekliği artırılmış kirişler üzerinde yapılan tekil yükleme sonucunda ortalama dayanım sinüs eğrisi şeklinde boşluk olduğu zaman 74,32 kN petek boşluk olduğu zaman 65,29 kN dairesel boşluk olduğu zaman 63,83 kN orijinal IPE200 olduğu zaman ise 50,53 kN olarak yapılan testlerde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar sinüsoidal boşluğa sahip çelik kirişin dairesel boşluklu kirişe oranla %16,4 ve petek boşluklu kirişe oranla %13,8 daha fazla dayanımlı olduğunu göstermektedir.

Tekil yükleme altında GYA IPE_200 çelik kirişlerden yapılan 6 (altı) eğilme testi sonucunda kirişlerin taşıma yükleri ortalaması 67,81 kN olarak belirlenmiştir. Bu değer orijinal profilden GYA kiriş yapılması durumunda orijinal profilin dayanımında %34,2 artış olduğunu göstermektedir. (Çizelge 4.3).

Şekil 4.28’de IPE_SB_PB_DB_200 ve Orijinal IPE200 kirişleri üzerinde yapılan 7 (yedi) farklı tekil yükleme sonucunda yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Aynı şekilden görüleceği üzere dairesel ve petek boşluklu kirişlerin nihai yüke ulaştıktan sonra stabilite kaybına uğrayarak yük kapasitesinde düşme meydana gelmiştir. Sinüsoidal gövde boşluklu kiriş testlerinde ise lineer olmayan bölgede yük artarak devam etmiştir.

Genel olarak karşılaştırıldığında tekil yük altında sinüsoidal gövde boşluklu kirişlerin yük kapasitesinin petek ve dairesel boşluklu kirişlere göre fazla olmasının yanı sıra süneklik kapasitesinde daha fazla olduğu Şekil 4.28’de açıkça görülmektedir.



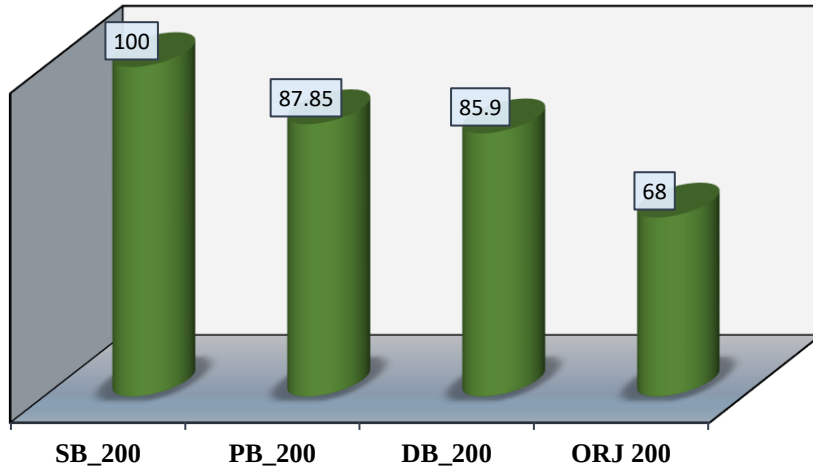
Şekil 4.28. IPE_SB_PB_DB_200 tekil yükleme altında yük-deplasman grafikler

Çizelge 4.3. IPE_SB_PB_DB_200 kirişleri test sonuçları

Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Boşluk Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Modu	Ortalama Dayanım (kN)
SB_200 Test_1	Tekil	Sinüs	73,58	Yanal Burkulma	74,32
SB_200 Test_2	Tekil	Sinüs	75,05	Yanal Burkulma	
PB_200 Test_1	Tekil	Petek	66,09	Yanal Burkulma Yerel Burkulma	65,29
PB_200 Test_2	Tekil	Petek	64,50	Yanal Burkulma Yerel Burkulma	
DB_200 Test_1	Tekil	Dairesel	65,73	Yanal Burkulma Yerel Burkulma	63,83
DB_200 Test_2	Tekil	Dairesel	61,93	Yanal Burkulma Yerel Burkulma	
GYA Kirişlerin Ortalama Dayanımı					67,81
ORJ 200	Tekil	-	50,53	Basit Eğilme	50,53
ORJ 200 Kirişinin Dayanım Artışı					%34,2

Şekil 4.29'da ortalama dayanımı en yüksek (SB_200, 74,32 kN) olan kiriş tipine verilen 100 birim üzerinden diğer kirişler normalize edilmiştir.

IPE_200 Kirişlerinin Normalize Edilmesi



Şekil 4.29. IPE_SB_PB_DB_200 kirişlerinin normalize edilmesi

4.2. IPE 240 Testleri (yayılı yükleme)

Sinüsoidal boşluklu (SB), petek boşluklu (PB) ve dairesel boşluklu (DB) gövde yüksekliği artırılmış (GYA) IPE_240 kirişlerinin yayılı yük altında yük taşıma kapasitelerinin ve göçme modlarının tespit edilmesi amacıyla IPE_SB_240 kirişi için 2 (iki) adet IPE_PB_240 kirişi için 2 (iki) adet ve IPE_DB_240 kirişi için 2 (iki) adet eğilme testi yapılmıştır. Bu testlere ilave olarak, GYA kirişlerin atalet momentlerinin artışından dolayı orijinal kesitin kapasitesindeki artış yüzdesini tespit etmek amacıyla orijinal IPE240 kirişi için 1 (bir) adet toplamda ise 7 (yedi) adet eğilme testi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.4).

Deneyisel verilerin kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup kirişlerin yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması, yük taşıma kapasiteleri, göçme modları ve verilmiştir. Ayrıca, GYA IPE_SB_DB_PB_240 kirişlerinin geometrik ölçüleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. IPE_SB_PB_DB_240 kirişleri test sayıları

Test	Yükleme Tipi	Gövde Boşluk Tipi	Test Sayısı
IPE_SB_240	Yayılı	Sinüs	2
IPE_DB_240	Yayılı	Dairesel	2
IPE_PB_240	Yayılı	Petek	2
ORJ IPE240	Yayılı	-	1

Çizelge 4.5. IPE_SB_PB_DB_240 kirişleri geometrik ölçüleri

mm	IPE_SB_240	IPE_PB_240	IPE_DB_240
Kiriş İlk Yükseklik	240	240	240
Kiriş Son Yükseklik	360,4	350,76	351,4
Boşluk Yüksekliği	240,7	221,5	269
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	776	383,7	389
Eğri Yatay Uzunluğu	238	-	-
Yatay Çizgi Uzunluğu	150	127,9	120
Boşluk Sayısı	7	14	14
Toplam Yatay Uzunluk	5582 ²	5500	5566

² Yayılı yükleme altında yapılan testlerde kirişlerin toplam yatay uzunluklarındaki farklılıklar dikkate alınmış olup her 3 (üç) tip kiriş için mesnetler arası net açıklık aynı olacak şekilde ayarlanmıştır.

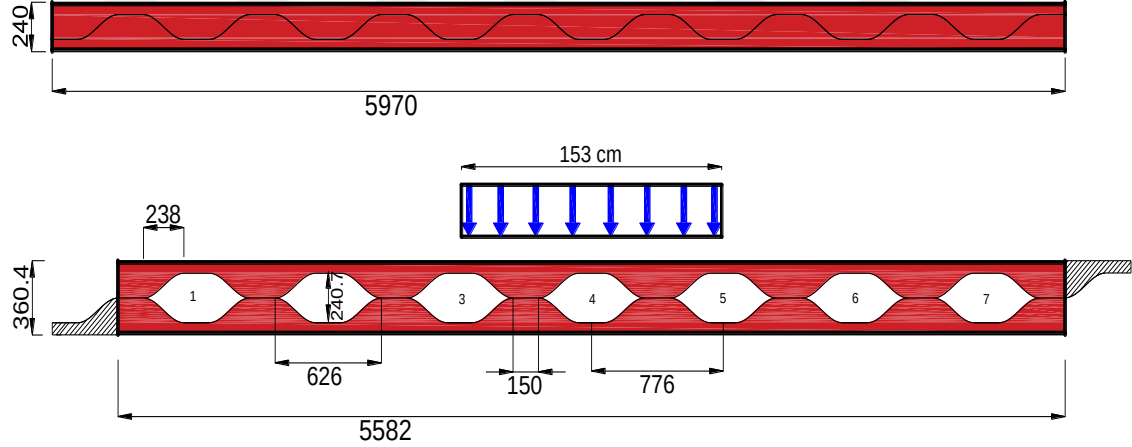
4.2.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_240 kirişleri

Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 1000 kN kapasiteye sahip yük hücresi 558 cm uzunluğundaki kirişin orta bölgesine 153 cm boyundaki berkitmeli ara kiriş aracılığıyla kirişe etki etmektedir.

Sinüsoidal boşluklu kirişlerin (IPE_SB_240) yayılı yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.30'da ve bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.30. IPE_SB_240 sinüsoidal boşluklu kiriş deneyi; yayılı yükleme durumu

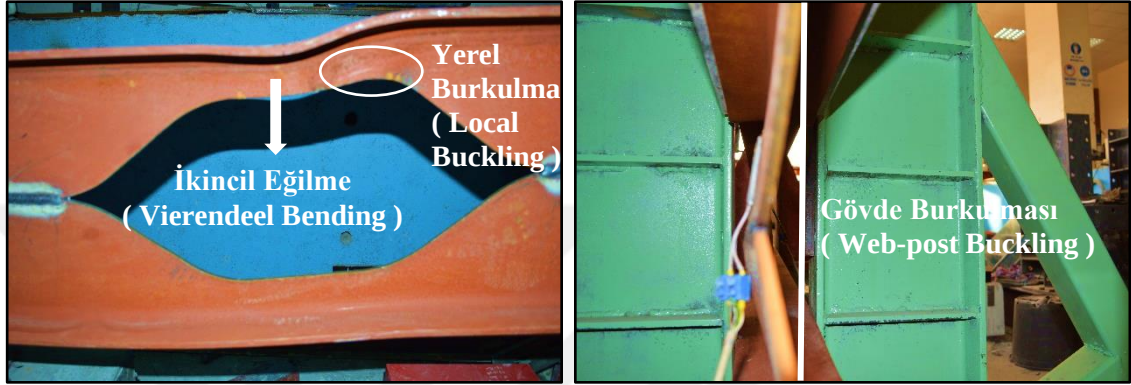


Kiriş İlk Yükseklik	240 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	238 mm
Kiriş Son Yükseklik	360,4 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	150 mm
Boşluk Yüksekliği	240,7 mm	Boşluk Sayısı	7
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	776 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5582 mm

Şekil 4.31. IPE_240 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_240) detayı

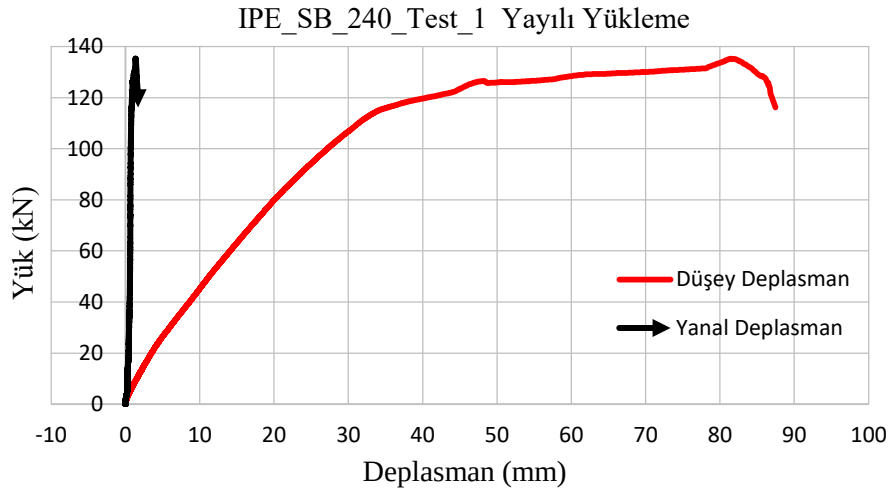
4.2.1.1. IPE_SB_240_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.31’de detaylı olarak verilen sinüs eğrisi şeklinde boşluklu IPE_SB_240 kirişi yayılı yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan IPE_SB_240_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 135,25 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.32’de görüleceği üzere kirişin göçmesinde gövde boşluk çevresindeki kiriş başlıklarının kesme kuvveti etkisi altında oluşan ikincil eğilme (vierendeel bending) etkili olmuştur. İkincil eğilmenin yanı sıra gövde burkulması ve boşluk çevrelerinde yerel burkulmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.32. IPE_SB_240_Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumu

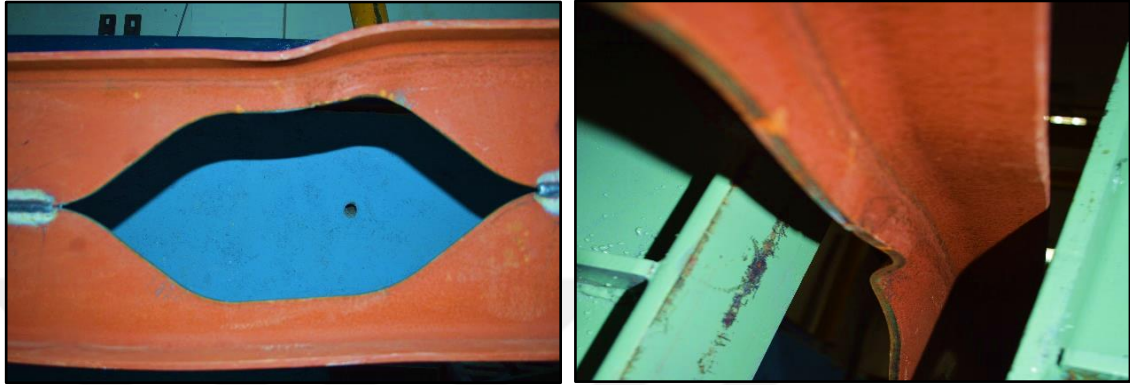
IPE_SB_240_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.33’te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme altında yanıl deplasman önemsenmeyecek kadar azdır.



Şekil 4.33. IPE_SB_240_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

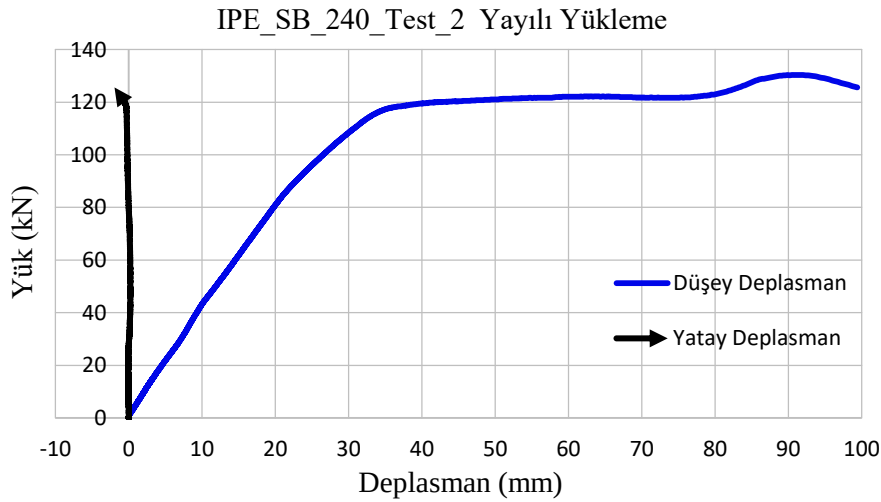
4.2.1.2. IPE_SB_240_Test_2

Yayılı yük altında IPE_SB_240_Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 130,34 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.34'te görüleceği üzere kirişin göçmesinde ilk testte olduğu gibi gövde boşluk çevresindeki kiriş başlıklarının kesme kuvveti etkisi altında oluşan ikincil eğilme (vierendeel bending) etkili olmuştur. İkincil eğilmenin yanı sıra gövde burkulması ve boşluk çevrelerinde yerel burkulmalar meydana gelmiştir.



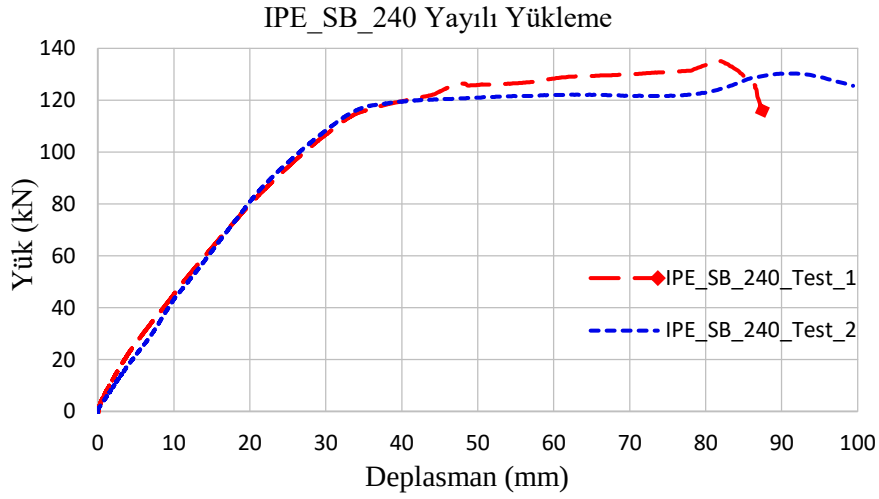
Şekil 4.34. IPE_SB_240_Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumu

IPE_SB_240_Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.35'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme altında yanıl deplasman önemsenmeyecek kadar azdır.



Şekil 4.35. IPE_SB_240_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

Sinüsoidal boşluklu kiriş (IPE_SB_240) için yayılı yükleme testlerinden elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 135,25 kN ve 130,34 kN) maksimum düzeyde deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.36’da verilmiştir.



Şekil 4.36. IPE_SB_240 yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri

IPE_SB_240 kirişlerinin yayılı yükleme altında deney fotoğrafları Şekil 4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.37. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğrafları

4.2.2. Petek boşluklu IPE_240 kirişleri

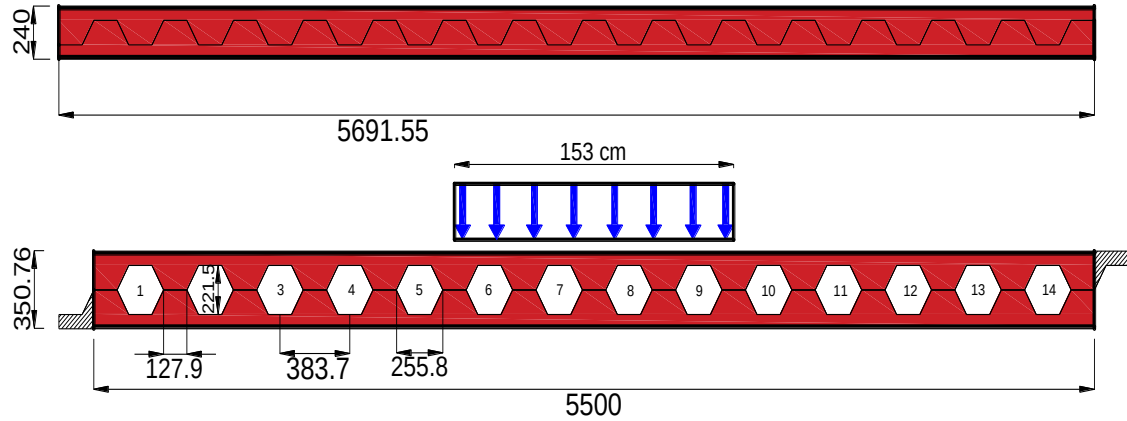
Yayıllı yük vermek amacıyla 153 cm boyundaki berkitmeli ara kiriş 550 cm uzunluğundaki kirişin orta bölgesine etki etmektedir.

Yanal destekler arası mesafeler ve deplasman ölçerlerin konumları her üç tip (sinüsoidal, petek, dairesel) kiriş için olup aynı zamanda; zemine bulonlarla rijit olarak monte edilen yanal destekler farklı başlık genişliklerine göre karşılıklı yanal desteklerin mesafesi bulonlarının gevşetilmesiye açılıp daraltılabilmektedir.

Petek boşluklu çelik kirişlerin (IPE_PB_240) yayıllı yük altında yükleme çerçevesindeki test düzeneği Şekil 4.38’de bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.39’de gösterilmiştir.



Şekil 4.38. IPE_PB_240; petek boşluklu kiriş deneyi; yayıllı yükleme durumu



Kiriş İlk Yükseklik	240 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	-
Kiriş Son Yükseklik	350,76 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	127,9 mm
Boşluk Yüksekliği	221,5 mm	Boşluk Sayısı	14
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	383,7 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5500 mm

Şekil 4.39. IPE 240 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_240) detayı

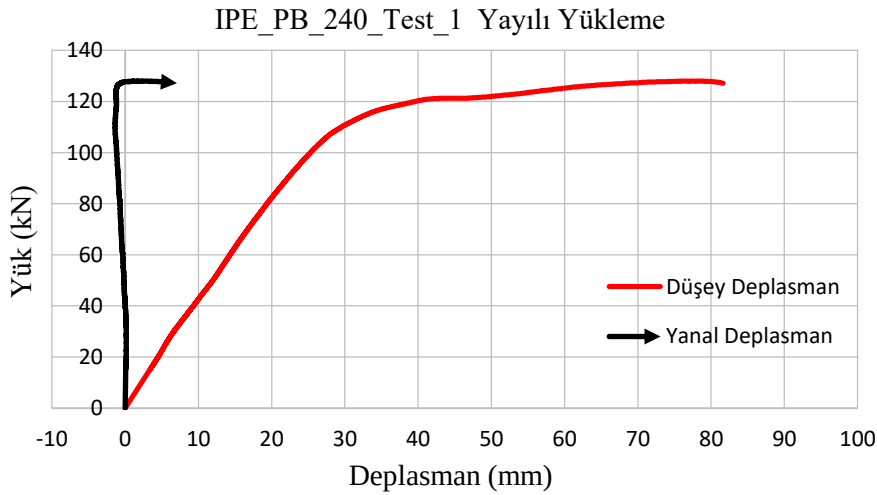
4.2.2.1. IPE_PB_240_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.39’da detaylı olarak verilen petek boşluklu IPE_PB_240 kirişi yayılı yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan IPE_SB_240_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 127,98 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.30’da görüleceği üzere kirişin göçmesinde yanal burkulma etkili olmuştur (Şekil 4.40).



Şekil 4.40. IPE_PB_240_Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumu

IPE_PB_240 kirişi üzerinde yapılan ilk yayılı yükleme testinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasmanlar Şekil 4.41’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yanal deplasmanların başlaması kirişteki yük artışını sınırlayıp düşmesine neden olmuştur.



Şekil 4.41. IPE_PB_240_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

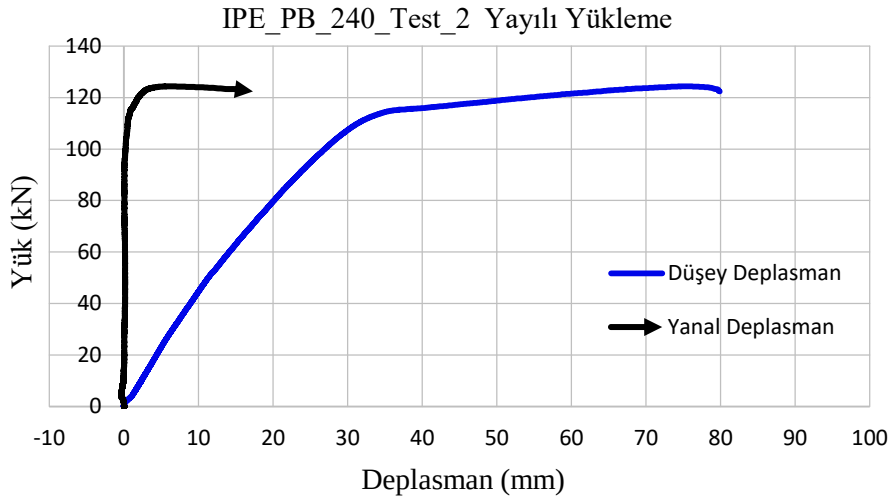
4.2.2.2. IPE_PB_240_Test_2

IPE_SB_240 kirişi yayılı yük altında yapılan ikinci teste yük taşıma kapasitesi 124,38 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te görüleceği üzere ilk testte olduğu gibi bu testte de göçme modu yanal burkulma olarak tespit edilmiştir.



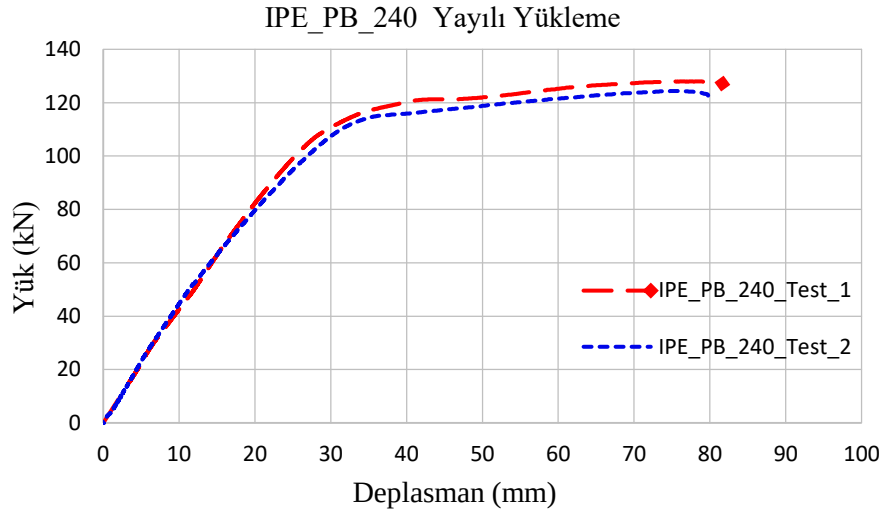
Şekil 4.42. IPE_PB_240_Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumu

IPE_PB_240 kirişi üzerinde yapılan ikinci yayılı yükleme testinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasmanlar Şekil 42'de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere kiriş önemli ölçüde yanal deplasman yapmıştır.



Şekil 4.43. IPE_PB_240_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

Petek boşluklu kiriş (IPE_PB_240) için yayılı yükleme testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 127,98 kN ve 124,38 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.44'te verilmiştir.



Şekil 4.44. IPE_PB_240 yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri

IPE_PB_240 kirişlerinin yayılı yükleme altında deney fotoğrafları Şekil 4.45'te verilmiştir.



Şekil 4.45. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğraflar

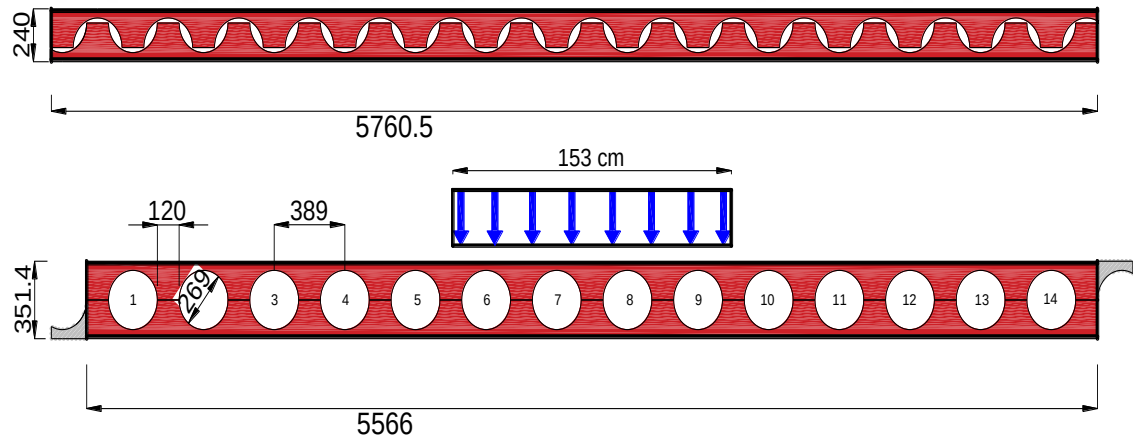
4.2.3. Dairesel boşluklu IPE_240 kirişleri

Yayılı yük vermek amacıyla 153 cm uzunluğundaki berkitmeli ara kiriş 557 cm uzunluğundaki kirişin orta bölgesine etki etmektedir. Özellikle gerilmelerin yoğun olduğu kısımlardaki kiriş başlıklarının elastik bölgeyi geçmeden stabilite kaybına uğramaması adına mesnet bölgelerine, kirişin $L/3$ ve $2L/3$ konumlarına yanal destekler yerleştirilmiştir.

Dairesel boşluklu çelik kirişlerin (IPE_DB_240) yayılı yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.46'da bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.47'de verilmiştir.



Şekil 4.46. IPE_DB_240 dairesele boşluklu kiriş deneyi; yayılı yükleme durumu



Kiriş İlk Yükseklik	240 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	-
Kiriş Son Yükseklik	351,4 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	120 mm
Boşluk Yüksekliği	269 mm	Boşluk Sayısı	14
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	389 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5566 mm

Şekil 4.47. IPE_240 dairesele boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_240) detayı

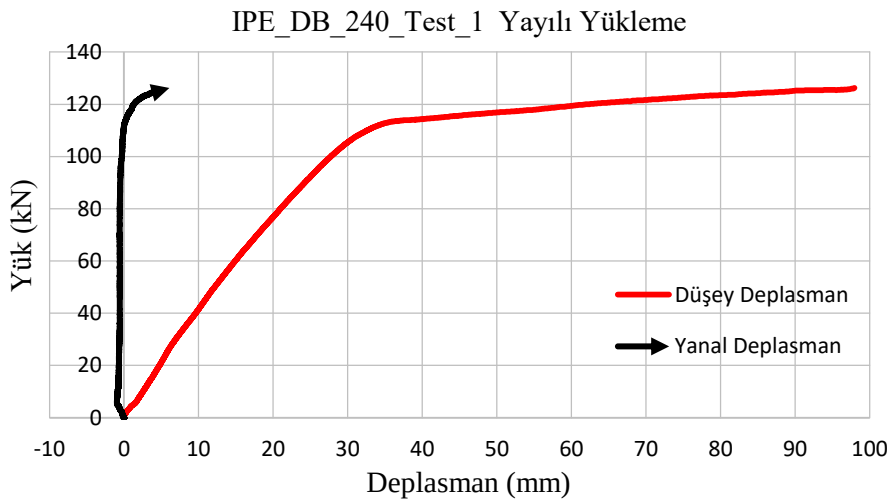
4.2.3.1. IPE_DB_240_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.47’de detaylı olarak verilen sinüs eğrisi şeklinde boşluklu IPE_DB_240 kirişi yayılı yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan IPE_DB_240_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 126,25 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.48’de görüleceği üzere kirişin göçmesinde gövde boşluk çevresindeki kiriş başlıklarının kesme kuvveti etkisi altında oluşan ikincil eğilme (vierendeel bending) etkili olmuştur. İkincil eğilmenin yanı sıra gövde burkulması ve boşluk çevrelerinde yerel burkulmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.48. IPE_DB_240_Test_1; yayılı yük altında göçme durumu

IPE_DB_240 kirişi üzerinde yapılan ilk yayılı yükleme testi sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey ve yanal deplasmanlar Şekil 4.49’da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere çok az miktarda yanal deplasman meydana gelmiştir.



Şekil 4.49. IPE_DB_240_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

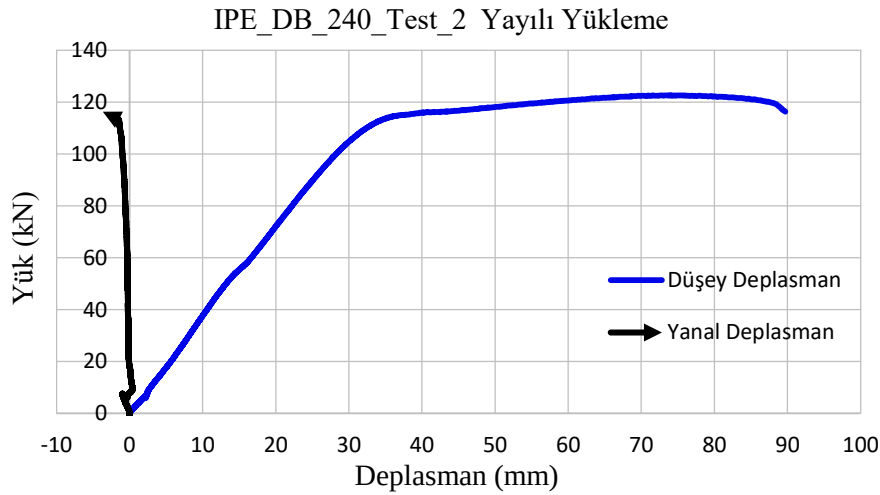
4.2.3.2. IPE_DB_240_Test_2

IPE_DB_240 kirişi üzerinde yapılan ikinci yayılı yükleme testinde yük taşıma kapasitesi 122,80 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.50’de görüleceği ilk testte olduğu gibi kirişin göçmesinde gövde boşluk çevresindeki kiriş başlıklarının kesme kuvveti etkisi altında oluşan ikincil eğilme (vierendeel bending) etkili olmuştur. İkincil eğilmenin yanı sıra gövde burkulması ve boşluk çevrelerinde yerel burkulmalar meydana gelmiştir.



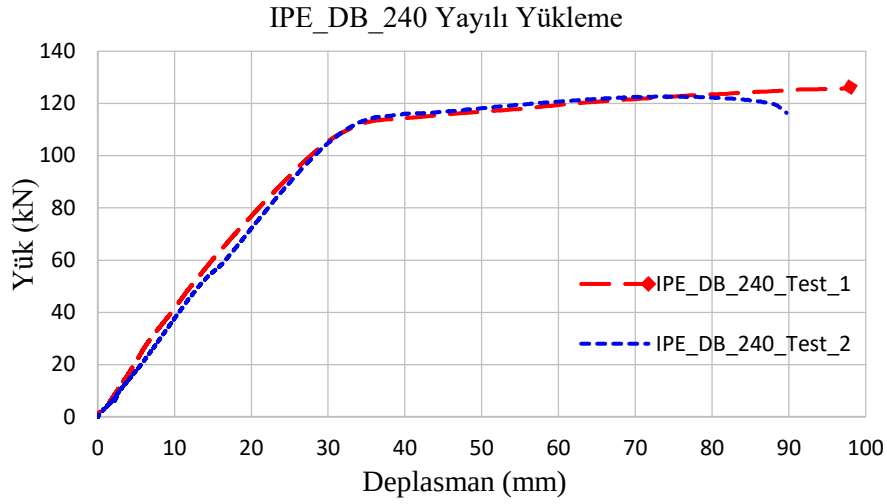
Şekil 4.50. IPE_DB_240_Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumu

IPE_DB_240 kirişi üzerinde yapılan ikinci yayılı yükleme testinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey ve yanal deplasmanlar Şekil 4.51’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme altında çok az miktarda yanal deplasman meydana gelmiştir.



Şekil 4.51. IPE_DB_240_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

Dairesel boşluklu kiriş (IPE_PB_240) için yayılı yükleme testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 126,25 kN ve 122,80 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.52’de verilmiştir.



Şekil 4.52. IPE_DB_240; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafikleri

IPE_SB_240 kirişlerinin yayılı yükleme altında deney fotoğrafları Şekil 4.53’te verilmiştir.



Şekil 4.53. IPE_PB_200 kirişi deney fotoğraflar

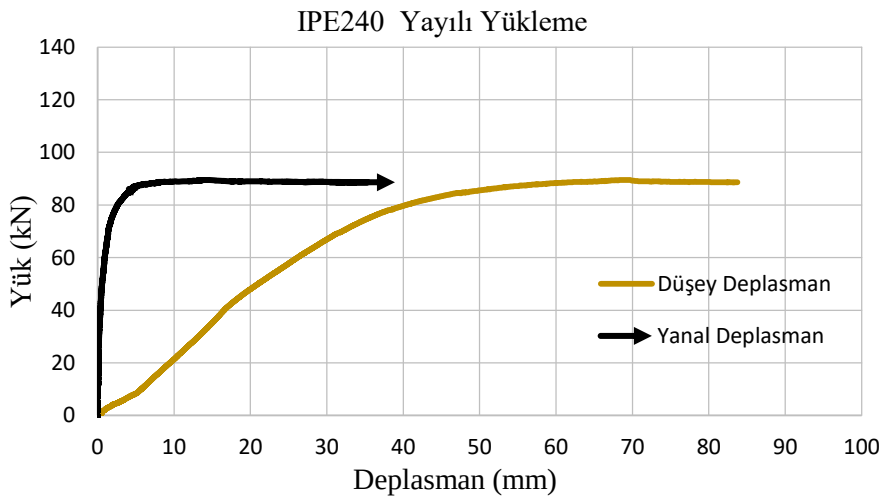
4.2.4. Orijinal IPE240 kirişi

Sinüsoidal, petek, dairesel boşluklu kirişlere ilave olarak kirişin atalet momenti artışına bağlı olarak kapasitesindeki artış oranını belirlemek amacıyla bu kirişlerin elde edildiği orijinal profil (IPE240) kullanılarak yayılı yükleme altında testi yapılmıştır (Şekil 4.53.a). Test sonucunda kirişin göçme yükü 89,48 kN olarak belirlenmiştir. Şekil 4.55'te görüleceği üzere yanal deplasmanlar kirişteki yük artışını sınırlayarak yükün düşmesine neden olmuştur. Bu deneyde kirişin göçme modu yanal burkulma olarak belirlenmiştir (Şekil 4.54.b).



Şekil 4.54. a) IPE240 yayılı yükleme test düzeneği
b) Yanal Burkulma

IPE240 kirişi üzerinde yapılan yayılı yükleme testinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı deplasmanlar Şekil 4.55'te verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere yanal deplasmanlar kirişin davranışını olumsuz yönde etkileyerek yükün düşmesine neden olmuştur.



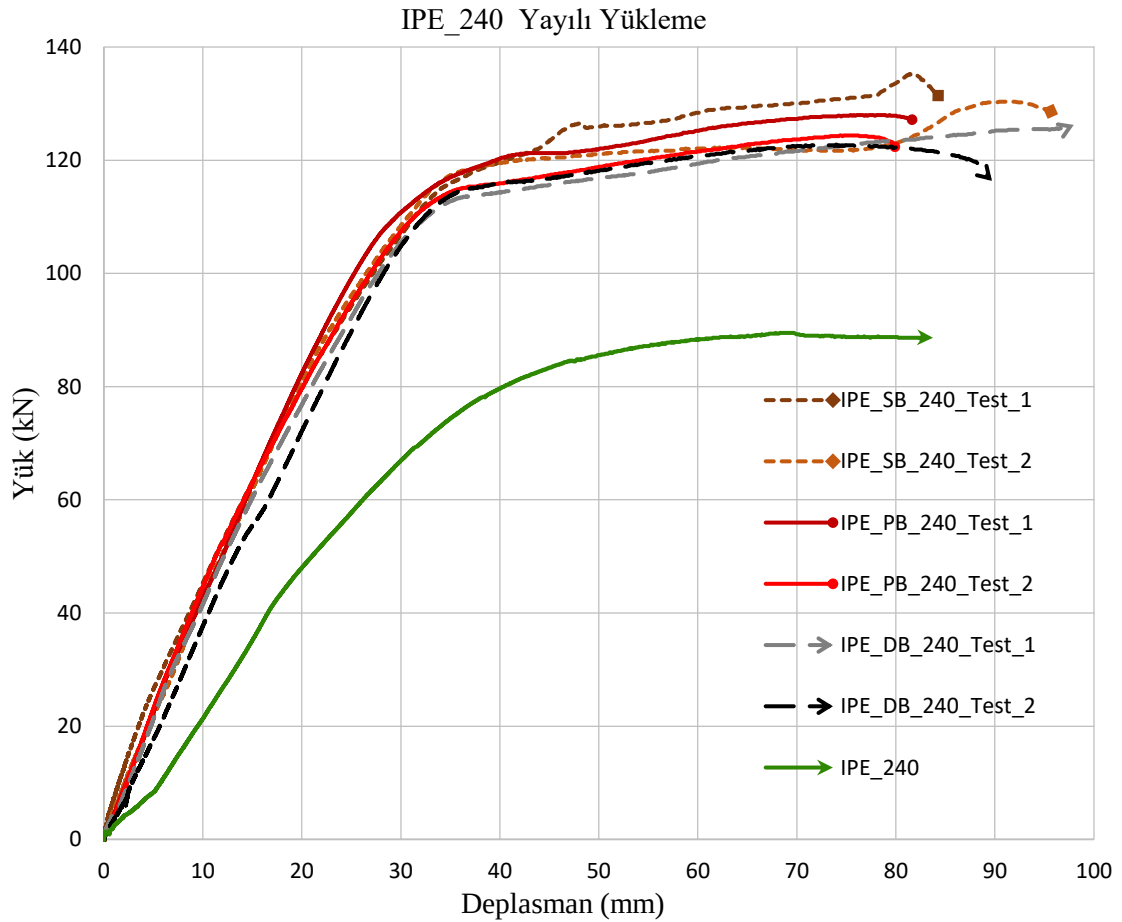
Şekil 4.55. IPE240; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

4.2.5. IPE_240 kirişlerinin karşılaştırılması

Farklı boşluk geometrik yapılarına sahip IPE_240 eleman bazlı gövde yüksekliği artırılmış kirişler üzerinde yapılan yayılı yükleme sonucunda ortalama dayanım sinüsoidal boşluk olduğu zaman 132,80 kN petek boşluk olduğu zaman 126,18 kN dairesel boşluk olduğu zaman 124,53 kN orijinal IPE240 olduğu zaman ise 89,48 kN olarak yapılan testlerle belirlenmiştir. Bu sonuçlar sinüsoidal boşluğa sahip çelik kirişin dairesel boşluklu kirişe göre %6,6 ve petek boşluklu kirişe göre %5,2 daha fazla dayanımlı olduğunu ve en iyi performansı veren gövde şekli olduğunu göstermektedir.

Yayılı yükleme altında GYA IPE_240 çelik kirişlerle yapılan 6 (altı) eğilme testi sonucunda kirişlerin taşıma yükleri ortalaması 127,84 kN olarak belirlenmiştir. Bu değer orijinal profilden GYA kiriş yapılması durumunda orijinal profilin dayanımında %42,9 artış olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.6).

Şekil 4.56'da IPE_SB_PB_DB_240 ve Orijinal IPE240 kirişleri üzerinde yapılan 7 (yedi) farklı yayılı yükleme testleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır.



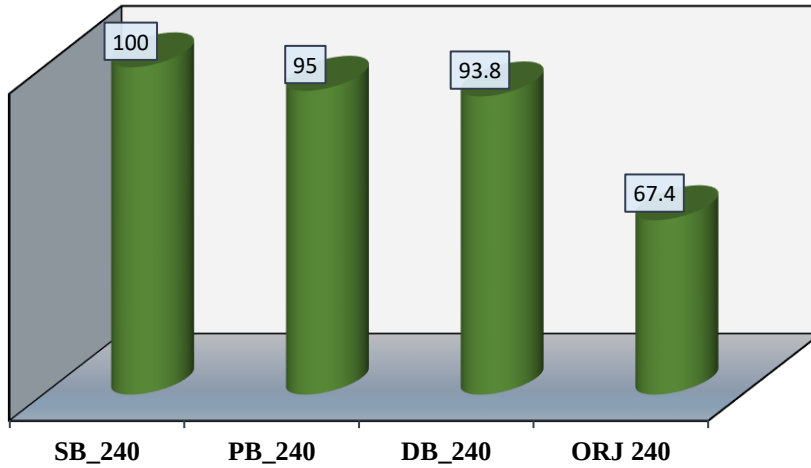
Şekil 4.56. IPE_SB_PB_DB_240 yayılı yükleme altında yük-deplasman grafikler

Çizelge 4.6. IPE_SB_PB_DB_240 kirişleri test sonuçları

Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Boşluk Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Modu	Ortalama Dayanım (kN)
SB_240 Test_1	Yayılı	Sinüs	135,25	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	132,80
SB_240 Test_2	Yayılı	Sinüs	130,34	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	
PB_240 Test_1	Yayılı	Petek	127,98	Yanal Burkulma	126,18
PB_240 Test_2	Yayılı	Petek	124,38	Yanal Burkulma	
DB_240 Test_1	Yayılı	Dairesel	126,25	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	124,53
DB_240 Test_2	Yayılı	Dairesel	122,80	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	
GYA Kirişlerin Ortalama Dayanımı					127,84
ORJ 240	Yayılı	–	89,48	Yanal Burkulma	89,48
ORJ 240 Kirişinin Dayanım Artışı					%42,9

Şekil 4.57’de ortalama dayanımı en yüksek (SB_240, 132,80 kN) olan kiriş tipine verilen 100 birim üzerinden diğer kirişler normalize edilmiştir.

IPE_240 Kirişlerinin Normalize Edilmesi



Şekil 4.57. IPE_SB_PB_DB_240 yayılı yüklemeye altında performansları

4.3. IPE 300 Testleri (iki noktadan yükleme)

Sinüsoidal boşluklu (SB), petek boşluklu (PB) ve dairesel boşluklu (DB) gövde yüksekliği artırılmış (GYA) IPE_300 kirişlerinin iki noktadan yük altında yük taşıma kapasitelerinin ve göçme modlarının tespit edilmesi amacıyla IPE_SB_300 kirişi için 2 (iki) adet IPE_PB_300 kirişi için 2 (iki) adet ve IPE_DB_300 kirişi için 2 (iki) adet eğilme testi yapılmıştır. Bu testlere ilave olarak, GYA kirişlerin atalet momentlerinin artışından dolayı orijinal kesitin kapasitesindeki artış yüzdesini tespit etmek amacıyla orijinal IPE300 kirişi için 1 (bir) adet toplamda ise 7 (yedi) adet eğilme testi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.7).

Deneyisel verilerin kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup kirişlerin yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması, yük taşıma kapasiteleri, göçme modları ve verilmiştir. Ayrıca, GYA IPE_SB_DB_PB_300 kirişlerinin geometrik ölçüleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri test sayıları

Test	Yükleme Tipi	Gövde Boşluk Tipi	Test Sayısı
IPE_SB_300	İki Noktadan	Sinüs	2
IPE_DB_300	İki Noktadan	Dairesel	2
IPE_PB_300	İki Noktadan	Petek	2
ORJ IPE300	İki Noktadan	—	1

Çizelge 4.8. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri geometrik ölçüleri

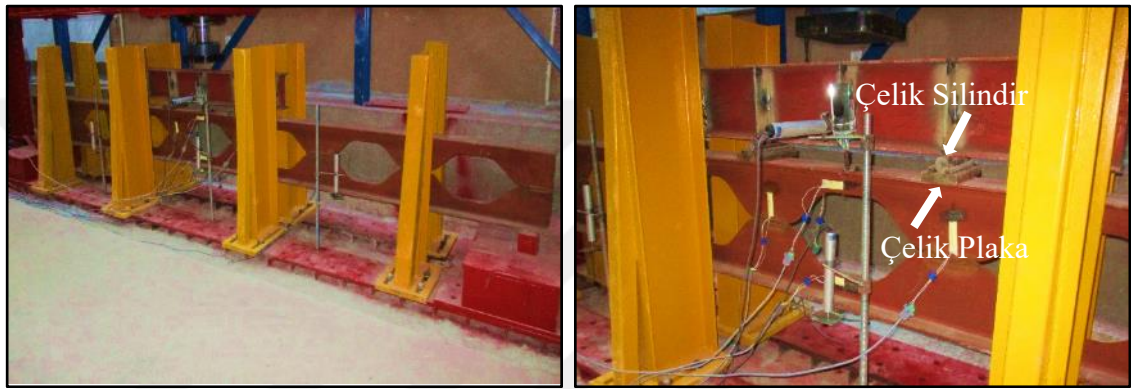
(mm)	IPE_SB_300	IPE_PB_300	IPE_DB_300
Kiriş İlk Yükseklik	300	300	300
Kiriş Son Yükseklik	434	424	402,3
Boşluk Yüksekliği	268	248,1	234
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	730,3	429,7	309
Eğri Yatay Uzunluğu	215,1	-	-
Yatay Çizgi Uzunluğu	150	143,2	75
Boşluk Sayısı	7	12	17
Toplam Yatay Uzunluk	5300	5300	5328
Noktasal Yükler Arası Mesafe	730	860	930 ³

³İki noktadan yükleme altında yapılan testlerde dairesel boşluklu kirişin noktasal yükler arası ve mesnetler arası mesafesi baz alınarak sabit bir P kuvveti altında hesaplanan moment değeri üzerinden, diğer kirişlerin mesnetler arası net açıklıkları belirlenmiştir.

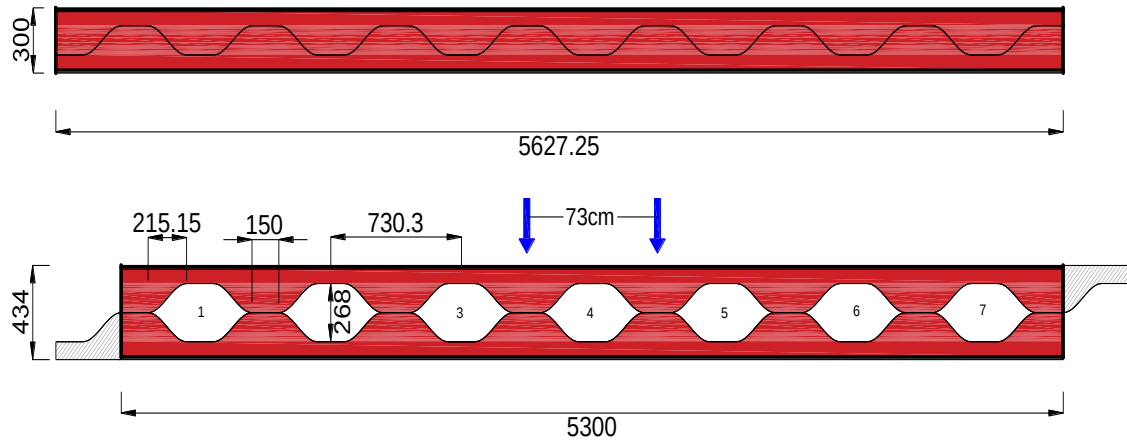
4.3.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_300 kirişleri

Yük hücresinin altına yerleştirilen berkitmeli ara kiriş ve bu ara kirişin altına yerleştirilen moment aktarmayan plakalar vasıtasıyla 530 cm açıklıklı ana kirişe yük etki ettirilmiştir. Noktasal yükler 73 cm aralıklarla etki ettirilmiş olup boşluk merkezlerinin ortasına (web-post) yerleştirilmiştir. Noktasal yükleri ana kirişe aktaracak olan moment aktarmayan çelik plakaların yükleri merkezlerinden ve kiriş başlığına dik olarak aktarabilmesi amacıyla bu plakaların ortasına silindir yerleştirilmiştir (Şekil 4.58).

Sinüsoidal boşluklu çelik kirişlerin (IPE_SB_300) iki noktadan yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.58’de, bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.59’da verilmiştir.



Şekil 4.58. IPE_SB_300; sinüsoidal boşluklu kiriş deneyi; iki noktadan yükleme

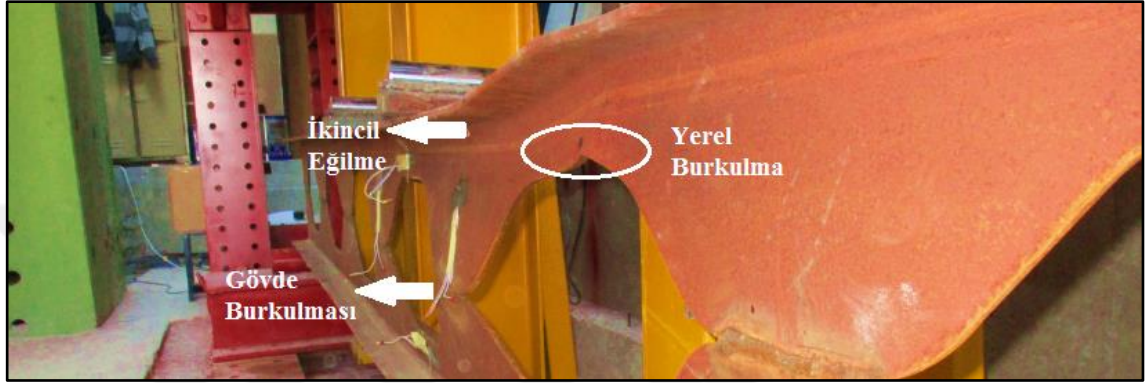


Kiriş İlk Yükseklik	300 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	215,1 mm
Kiriş Son Yükseklik	434 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	150 mm
Boşluk Yüksekliği	268 mm	Boşluk Sayısı	7
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	730,3 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5300 mm

Şekil 4.59. IPE_300 sinüsoidal boşluklu çelik kiriş (IPE_SB_300) detayı

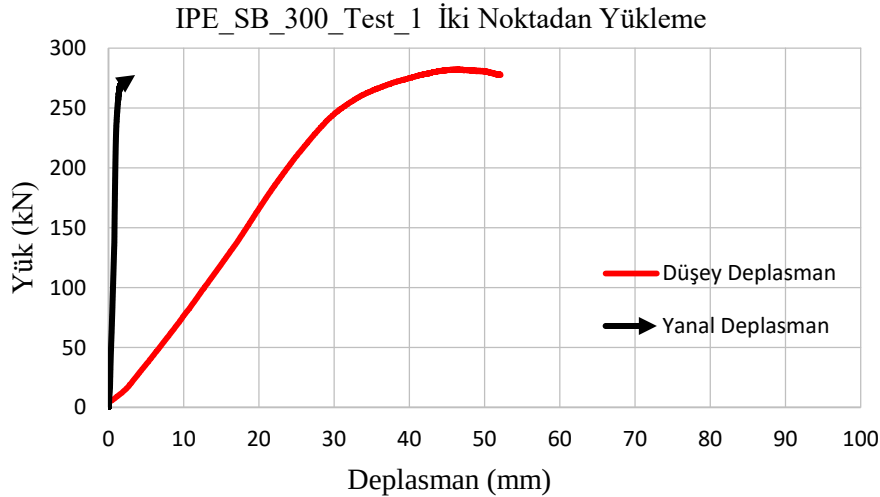
4.3.1.1. IPE_SB_300_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.59’da detaylı olarak verilen sinüsoidal boşluklu IPE_SB_300 kirişi iki noktadan yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan IPE_SB_300_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 282,48 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.60’ta görüleceği üzere kirişin göçmesinde gövde boşluk çevresindeki kiriş başlıklarının kesme kuvveti etkisi altında oluşan ikincil eğilme (vierendeel bending) etkili olmuştur. İkincil eğilmenin yanı sıra gövde burkulması ve boşluk çevrelerinde yerel burkulmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.60. IPE_SB_300_Test_1; iki noktadan yükleme altında göçme durumu

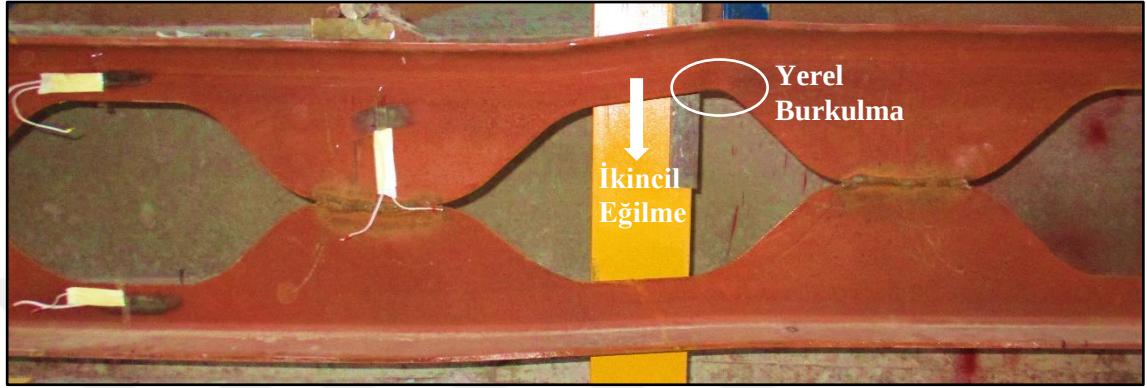
IPE_SB_300 kirişi üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testi sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey ve yatay deplasmanlar Şekil 4.61’de verilmiştir.



Şekil 4.61. IPE_SB_300_Test_1; yük-deplasman grafiği

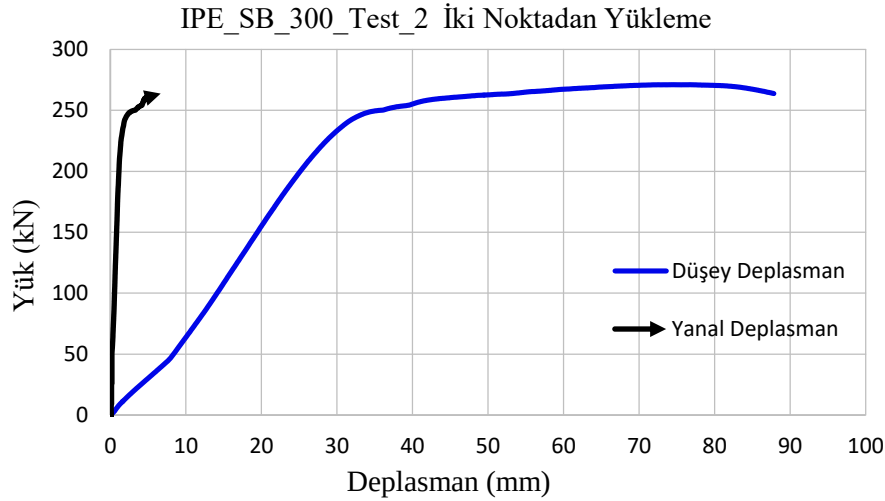
4.3.1.2. IPE_SB_300_Test_2

İki noktadan yük altında IPE_SB_300_Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 270,46 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.62’de görüleceği üzere kirişin göçmesinde ilk testte olduğu gibi gövde boşluk çevresindeki kiriş başlıklarının kesme kuvveti etkisi altında oluşan ikincil eğilme (vierendeel bending) etkili olmuştur. İkincil eğilmenin yanı sıra yerel burkulmalar meydana gelmiştir.



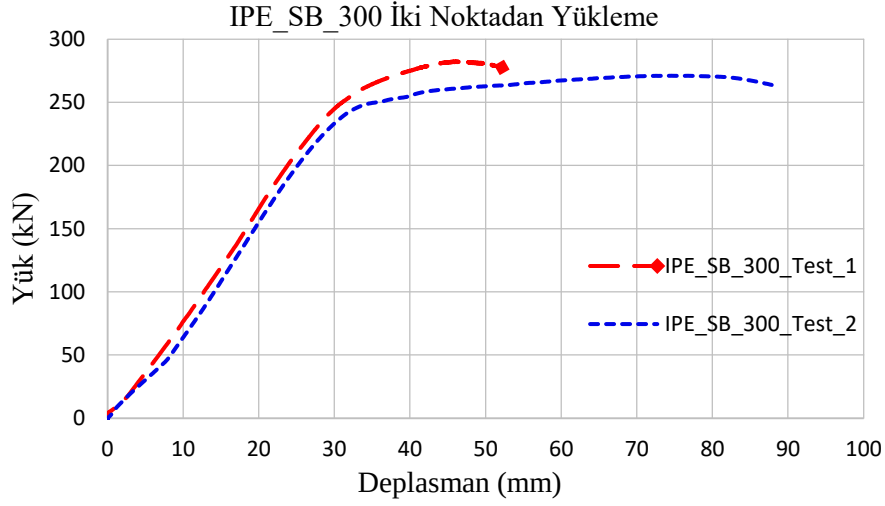
Şekil 4.62. IPE_SB_300_Test_2; iki noktadan yükleme altında göçme durumu

IPE_SB_300 kirişi üzerinde yapılan ikinci iki noktadan yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasmanlar Şekil 4.63’te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme esnasında önemli derecede bir yanal deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.63. IPE_SB_300_Test_2; yük-deplasman grafiği

Sinüsoidal boşluklu kiriş (IPE_SB_300) için iki noktadan yükleme testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 282,48 kN ve 270,46 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri karşılaştırılması Şekil 4.64'te verilmiştir.



Şekil 4.64. IPE_SB_300; yük-deplasman grafikleri

IPE_SB_300 kirişlerinin iki noktadan yük altında deney fotoğrafları Şekil 4.65'de verilmiştir.



Şekil 4.65. IPE_SB_300 kirişi deney fotoğraflar

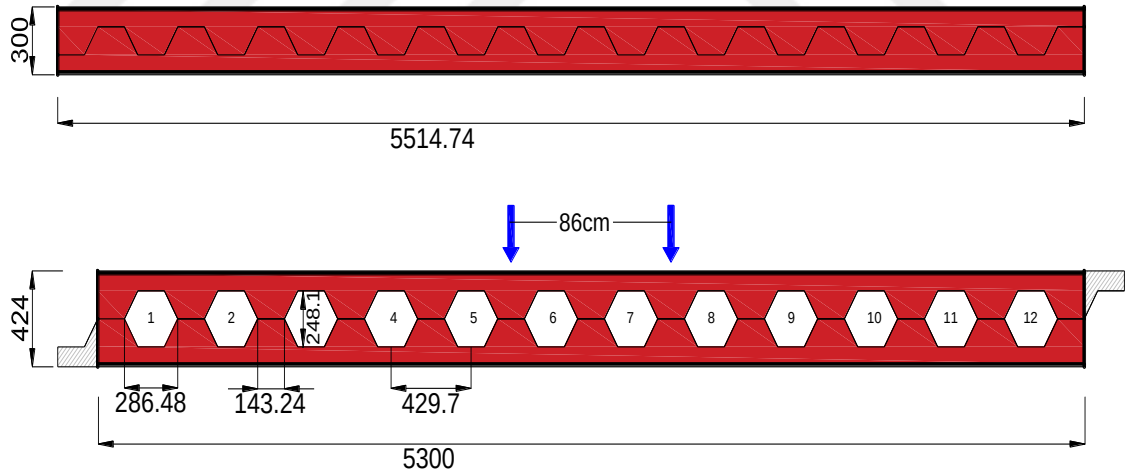
4.3.2. Petek boşluklu IPE_300 kirişleri

Yük hücresinin altına yerleştirilen berkitmeli ara kiriş ve bu ara kirişin altına yerleştirilen moment aktarmayan plakalar vasıtasıyla 530 cm açıklıklı ana kirişe yük etki ettirilmiştir. Noktasal yükler 86 cm aralıkla etki ettirilmiş olup boşluk merkezlerinin ortasına (web-post) yerleştirilmiştir.

Petek boşluklu çelik kirişlerin (IPE_PB_300) iki noktadan yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.66'da, bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.67'de verilmiştir.



Şekil 4.66. IPE_PB_300; petek boşluklu kiriş deneyi; iki noktadan yükleme

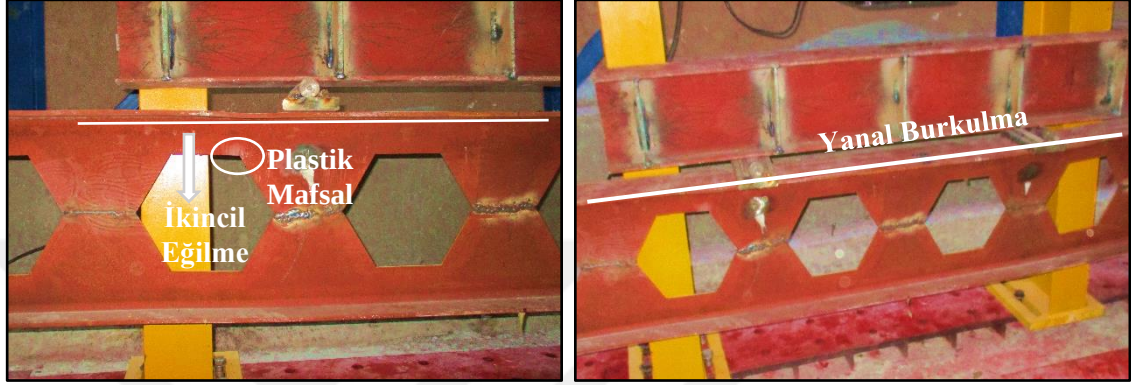


Kiriş İlk Yükseklik	300 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	-
Kiriş Son Yükseklik	424 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	143,2 mm
Boşluk Yüksekliği	248,1 mm	Boşluk Sayısı	12
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	429,7 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5300 mm

Şekil 4.67. IPE_300 petek boşluklu çelik kiriş (IPE_PB_300) detayı

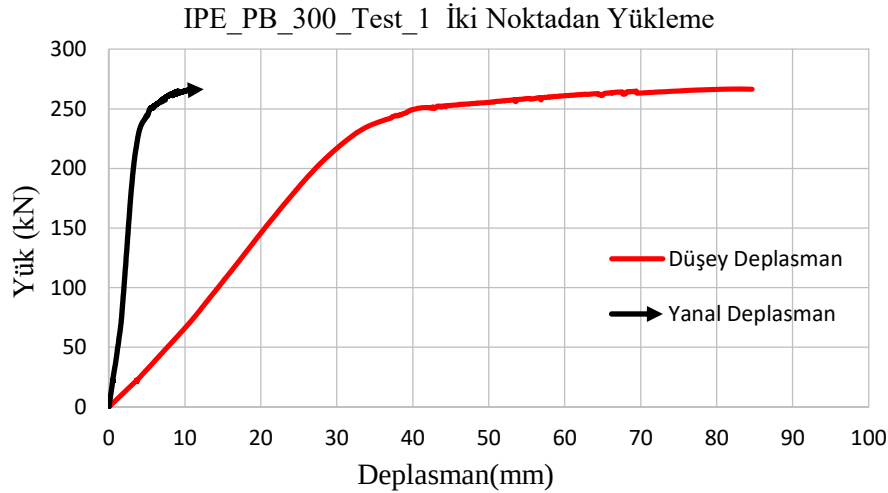
4.3.2.1. IPE_PB_300_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.67’de detaylı olarak verilen petek boşluklu IPE_PB_300 kirişi iki noktadan yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan IPE_PB_300_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 266,71 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.68’de görüleceği üzere kirişin göçmesinde ikincil eğilme (vierendeel bending) etkili olmuştur. İkincil eğilmenin yanı sıra kirişin göçmesinde yanal burkulma da etkili olmuştur.



Şekil 4.68. IPE_PB_300; iki noktadan yükleme altında göçme durumu

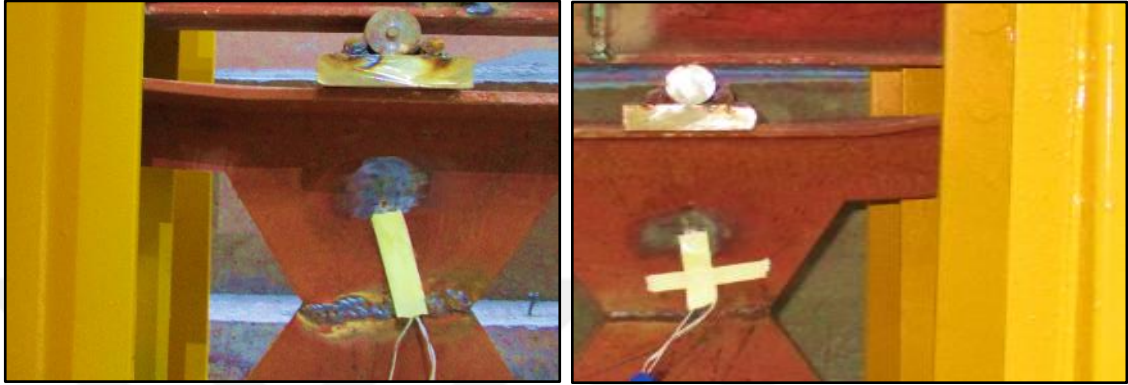
IPE_PB_300 kirişi üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testi sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.69’da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktadan yükleme altında kiriş 240 kN’u aştıktan sonra kirişin orta kısmında bir miktar yanal ötelenme ölçülmüştür.



Şekil 4.69. IPE_PB_300_Test_1; yük-deplasman grafiği

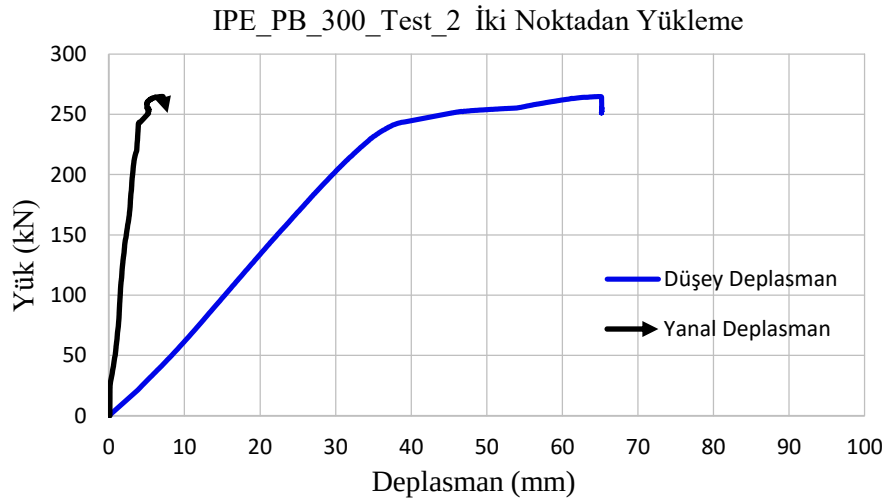
4.3.2.2. IPE_PB_300_Test_2

İki noktadan yük altında IPE_PB_300_Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 264,28 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.70'te görüleceği üzere kirişin göçmesinde ilk testte olduğu gibi ikincil eğilme (vierendeel bending) etkili olmuştur. Bu testte nihai yüke ulaşıldıktan sonra hidrolik pistonun arıza vermesi nedeniyle teste devam edilememiş ve bu yüzden deformasyonlar belirgin bir şekilde gözlenememiştir.



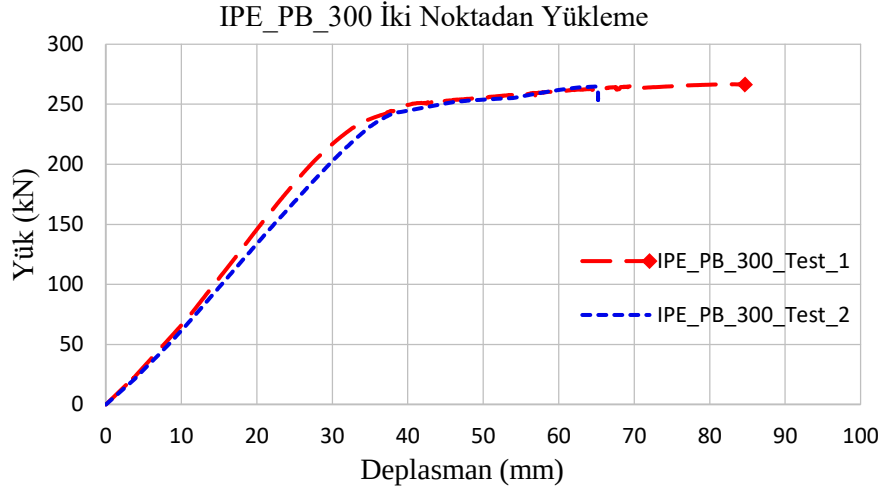
Şekil 4.70. IPE_PB_300; iki noktadan yükleme altında göçme durumu

IPE_PB_300 kirişi üzerinde yapılan ikinci iki noktadan yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasmanlar Şekil 4.71'de verilmiştir.



Şekil 4.71. IPE_PB_300_Test_2; yük-deplasman grafiği

Petek boşluklu kiriş (IPE_PB_300) için iki noktadan yükleme testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 266,71 kN ve 264,28 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.72’de verilmiştir.



Şekil 4.72. IPE_PB_300; iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri

IPE_SB_300 kirişlerinin iki noktadan yük altında deney fotoğrafları Şekil 4.73’te verilmiştir.

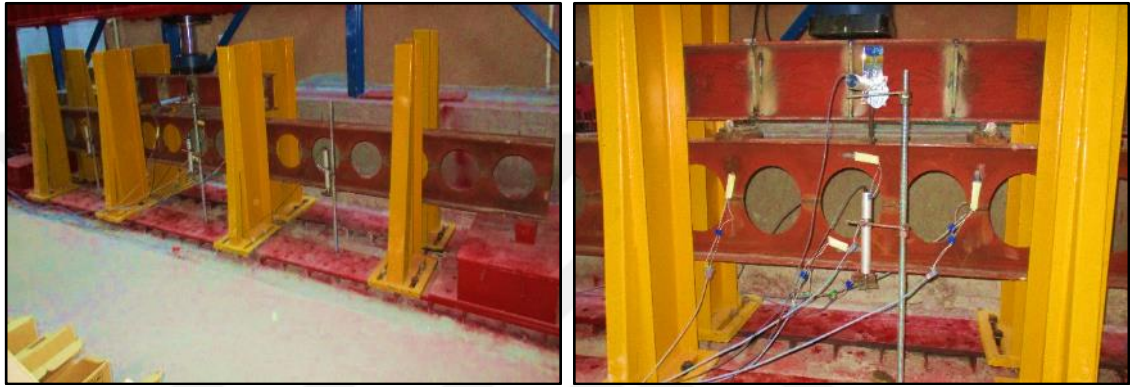


Şekil 4.73. IPE_SB_300 kirişi deney fotoğraflar

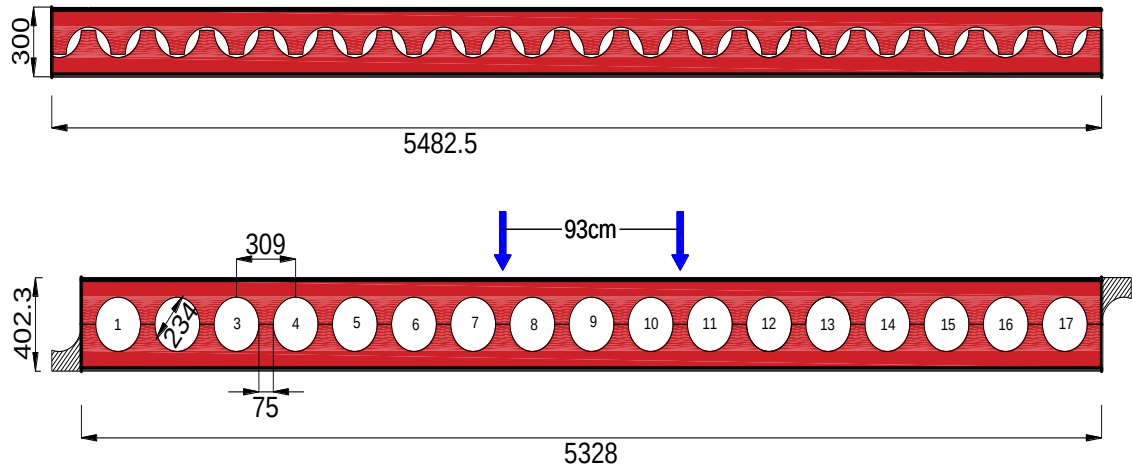
4.3.3. Dairesel boşluklu IPE_300 kirişleri

533 cm uzunluğundaki kirişe noktasal yükler 93 cm aralıkla kirişin orta bölgesine etki ettirilmiştir. Noktasal yükleri ana kirişe aktaracak olan moment aktarmayan çelik plakaların yükleri merkezlerinden ve kiriş başlığına dik olarak aktarabilmesi amacıyla bu plakaların ortasına silindir yerleştirilmiştir. Ayrıca diğer testlerde olduğu gibi IPE_300 testlerinde de plakalar boşluk merkezlerinin ortasına (web-post) yerleştirilmiştir.

Dairesel boşluklu çelik kirişlerin (IPE_DB_300) iki noktadan yük altında yanıl destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.74'te, bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Şekil 4.75'te verilmiştir.



Şekil 4.74. IPE_DB_300; dairese boşluklu kiriş deneyi; iki noktadan yükleme

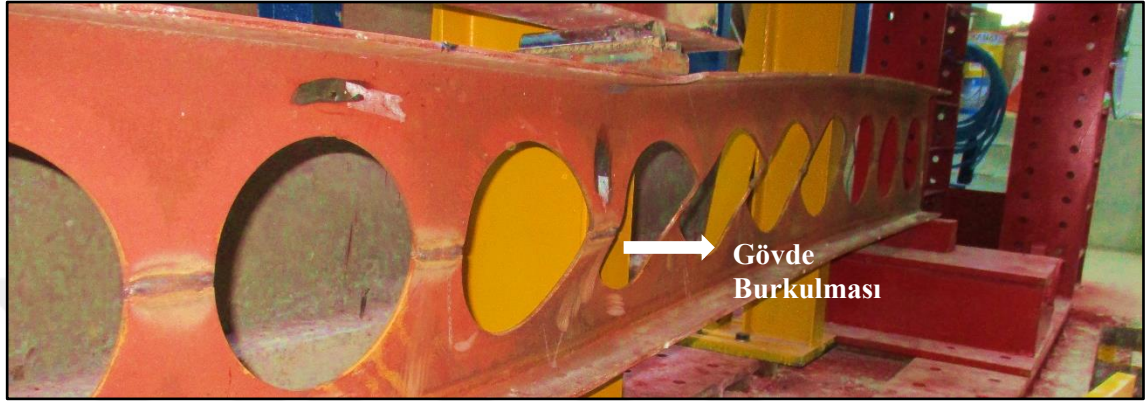


Kiriş İlk Yükseklik	300 mm	Eğri Yatay Uzunluğu	-
Kiriş Son Yükseklik	402,3 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	75 mm
Boşluk Yüksekliği	234 mm	Boşluk Sayısı	17
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	309 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5328 mm

Şekil 4.75. IPE 300 dairese boşluklu çelik kiriş (IPE_DB_300) detayı

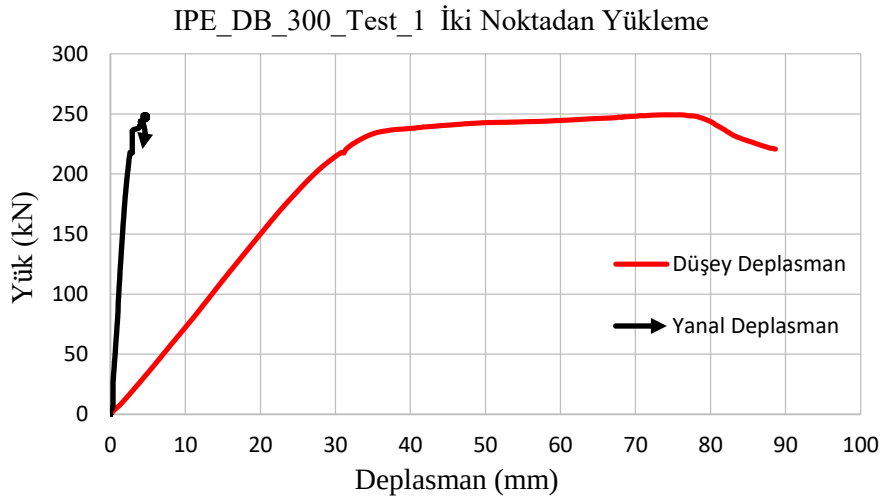
4.3.3.1. IPE_DB_300_Test_1

Geometrik özellikleri Şekil 4.75'te detaylı olarak verilen dairesel boşluklu IPE_DB_300 kirişi iki noktadan yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan IPE_DB_300_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 249,30 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.76'da görüleceği üzere kirişin göçmesi kesme kuvvetlerinin maksimum olduğu kısımlardaki gövdelerin burkulması sonucudur.



Şekil 4.76. IPE_DB_300_Test_1; iki noktadan yükleme altında göçme durumu

IPE_DB_300 kirişi üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testi sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasmanlar Şekil 4.77'de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere deneyin özellikle son kısmındaki yanal deplasman gövde burkulmasına bağlı olarak kirişin biçiminin bozulmasından kaynaklanmıştır. Kirişin göçmesinde hakim mod gövde burkulmasıdır.



Şekil 4.77. IPE_DB_300_Test_1; yük-deplasman grafiği

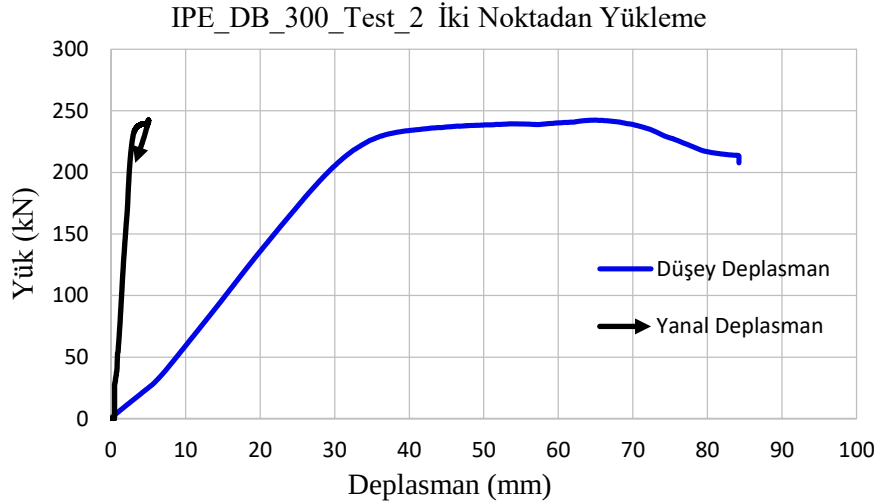
4.3.3.2. IPE_DB_300_Test_2

İki noktadan yük altında IPE_DB_300_Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesi 242,46 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.77’de görüleceği üzere kirişin göçmesi ilk testte olduğu gibi kesme kuvvetlerinin maksimum olduğu kısımlardaki gövdelerin burkulması sonucudur.



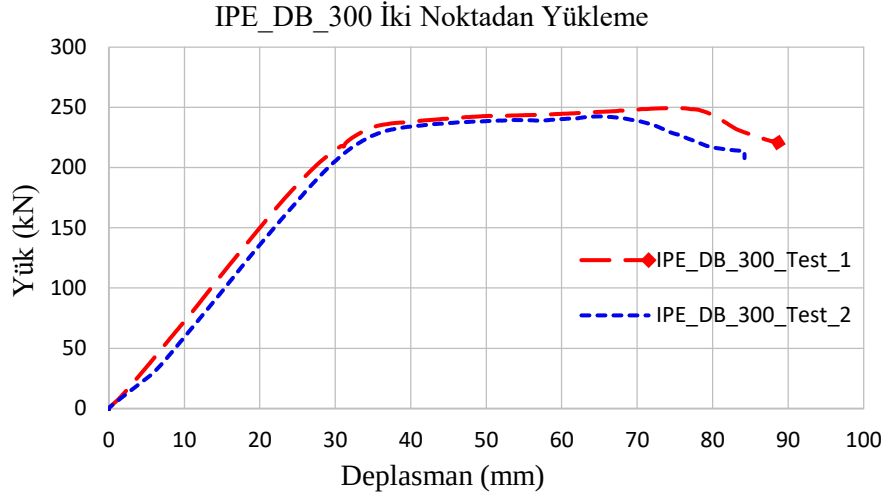
Şekil 4.78. IPE_DB_300_Test_2; iki noktadan yükleme altında göçme durumu

IPE_DB_300 kirişi üzerinde yapılan ikinci iki noktadan yükleme testi sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasmanlar Şekil 4.79’da verilmiştir.



Şekil 4.79. IPE_DB_300_Test_2; yük-deplasman grafiği

Dairesel boşluklu kiriş (IPE_DB_300) için iki noktadan yükleme testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 249,30 kN ve 242,46 kN) düşey deplasman grafikleri Şekil 4.80’de verilmiştir.



Şekil 4.80. IPE_DB_300; iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri

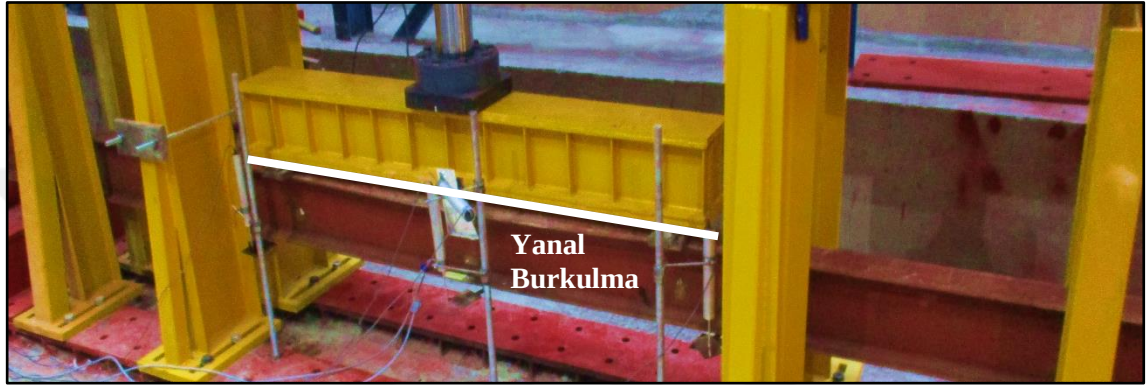
IPE_DB_300 kirişleri iki noktadan yük altında deney fotoğrafları Şekil 4.81’de verilmiştir.



Şekil 4.81. IPE_DB_300 kirişi deney fotoğraflar

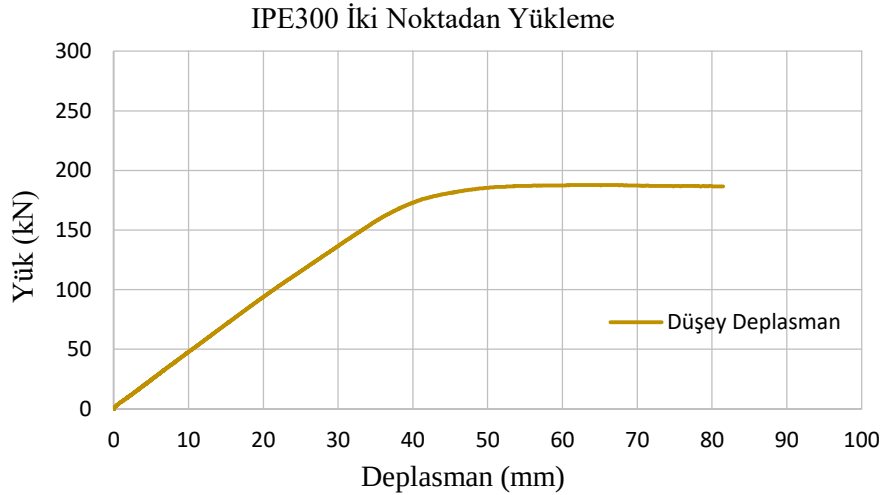
4.3.4. Orijinal IPE300 kirişi

Sinüsoidal, petek, dairesel boşluklu kirişlere ilave olarak GYA kirişlerin atalet momenti artışına bağlı olarak kapasitesindeki artış yüzdesini belirlemek amacıyla bu kirişlerin elde edildiği orijinal profil olan IPE300 kullanılarak iki noktadan yükleme altında testi yapılmıştır. Test sonucunda kirişin kapasitesi 187,77 kN olarak ölçülmüştür. Deney esnasında yanal deplasman ölçerin arıza vermesinden dolayı ölçüm alınamamış olup deney sonrası yapılan ölçümde kirişin 35 mm yanal deplasman yaptığı tespit edilmiştir. Şekil 4.82’de görüleceği üzere kirişin göçme modu yanal burkulma olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.82. IPE300 iki noktadan yükleme altında göçme durumu

IPE300 kirişi üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey deplasman Şekil 4.83’te verilmiştir.



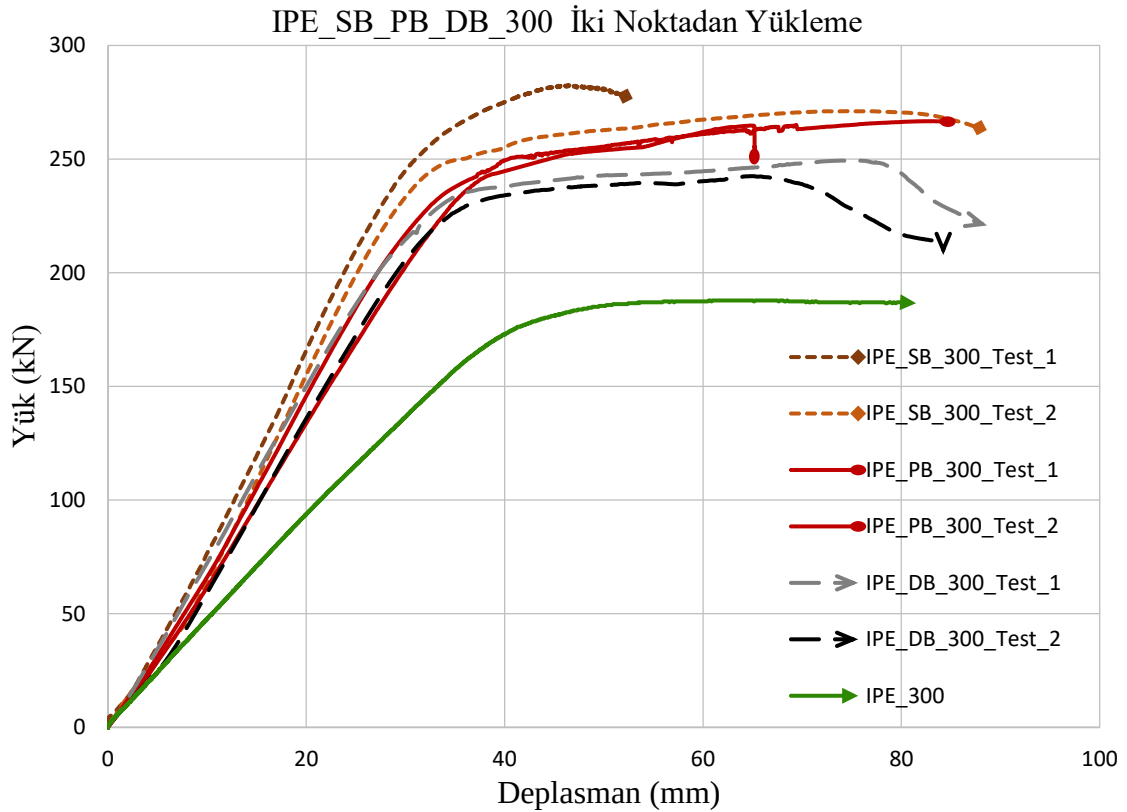
Şekil 4.83. IPE300; iki noktadan yükleme altında yük-deplasman grafiği

4.3.5. IPE_300 kirişlerinin karşılaştırılması

Farklı boşluk geometrik yapılarına sahip IPE_300 eleman bazlı gövde yüksekliği artırılmış kirişler üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testleri sonucunda ortalama dayanım sinüsoidal boşluk olduğu zaman 276,47 petek boşluk olduğu zaman 265,49 kN dairesel boşluk olduğu zaman 245,89 kN orijinal IPE300 olduğu zaman ise 187,77 kN olarak yapılan testlerde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar sinüsoidal boşluğa sahip çelik kirişin dairesel boşluklu kirişe göre %12,4 ve petek boşluklu kirişe göre %4,1 daha fazla dayanımlı olduğunu ve en iyi performansı veren gövde şekli olduğunu göstermektedir.

İki noktadan yükleme altında GYA IPE_300 çelik kirişlerden yapılan 6 (altı) eğilme testi sonucunda kirişlerin taşıma yükleri ortalaması 262,62 kN olarak belirlenmiştir. Bu değer orijinal profilden GYA kiriş yapılması durumunda orijinal profilin dayanımında %39,9 artış olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.9).

Şekil 4.84'te IPE_SB_PB_DB_300 ve orijinal IPE300 kirişleri üzerinde yapılan 7 (yedi) farklı iki noktadan yükleme testleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.9'da ise deneysel veriler özet olarak verilmiştir.



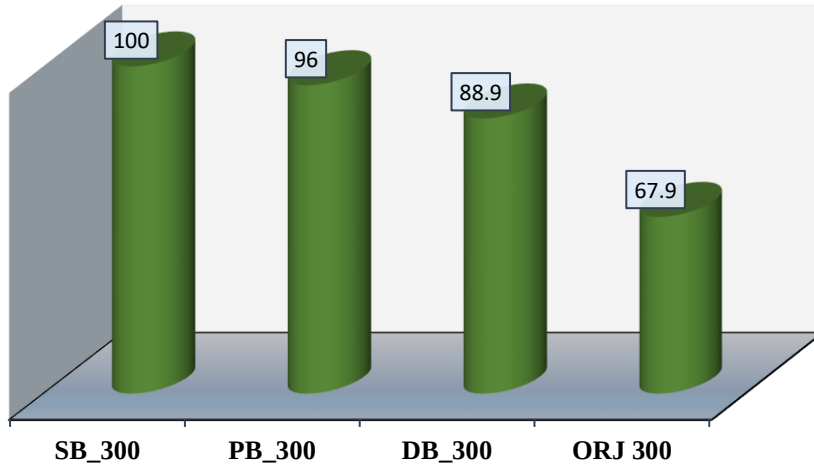
Şekil 4.84. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri yük-deplasman grafikleri

Çizelge 4.9. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri test sonuçları

Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Boşluk Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Modu	Ortalama Dayanım (kN)
SB_300 Test_1	İki Noktadan	Sinüs	282,48	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	276,47
SB_300 Test_2	İki Noktadan	Sinüs	270,46	İkincil Eğilme Yerel Burkulma	
PB_300 Test_1	İki Noktadan	Petek	266,71	İkincil Eğilme	265,49
PB_300 Test_2	İki Noktadan	Petek	264,28	İkincil Eğilme	
DB_300 Test_1	İki Noktadan	Dairesel	249,30	Gövde Burkulması	245,89
DB_300 Test_2	İki Noktadan	Dairesel	242,46	Gövde Burkulması	
GYA Kirişlerin Ortalama Dayanımı					262,62
ORJ 300	İki Noktadan	-	187,77	Yanal Burkulma	187,77
ORJ 300 Kirişinin Dayanım Artışı					%39,9

Şekil 4.85'te ortalama dayanımı en yüksek (SB_300, 276,47 kN) olan kiriş tipine verilen 100 birim üzerinden diğer kirişler normalize edilmiştir.

IPE_300 Kirişlerinin Normalize Edilmesi



Şekil 4.85. IPE_SB_PB_DB_300 kirişleri normalize edilmesi

4.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi

Sinüsoidal boşluklu(SB), petek boşluklu(PB) ve dairesel boşluklu(DB) gövde yüksekliği artırılmış IPE_200_240_300 kirişlerinin tekil, yayılı ve iki noktadan yükleme altında yük taşıma kapasiteleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel veriler ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup her kiriş tipi için deneylerden elde edilen göçme yükü ortalamaları ANSYS-Workbench programında 20 adımda verilerek yük-deplasman grafikleri, eşdeğer gerilmeler (equivalent, von-mises stress), kesme gerilmeleri (shear stress) ve normal gerilmeler (normal stress) hesaplanmış ve bulunan değerler özet olarak verilmiştir. Bunlara ilave olarak, deney sonrası kirişlerin görselleri ile sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen görseller kirişlerin göçme modları ve şekil değiştirmelerine bağlı olarak karşılaştırmalı verilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere IPE_200, IPE_240 ve IPE_300 profilleri için akma gerilmeleri sırasıyla 281 MPa, 285 MPa ve 305 MPa; Elastisite modülü $1,9 \times 10^5$ MPa, tanjant modülü 1443 MPa, poisson oranı ise 0,3 alınmıştır. Ayrıca, analiz için ağ boyutu (mesh size) 25 mm, mesh tipi olarak tetrahedrons kullanılmıştır. (Çizelge 4.10).

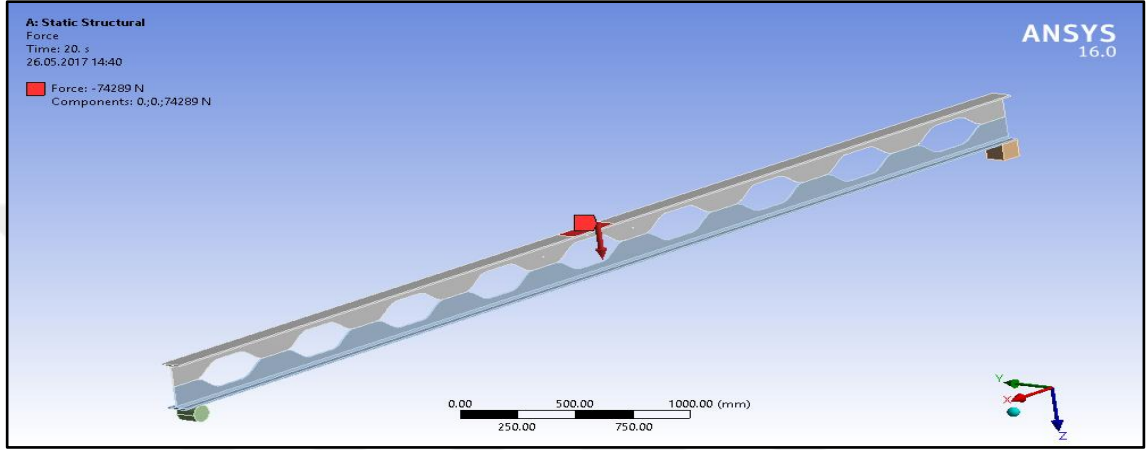
Çizelge 4.10. Sonlu elemanlar analizi girdileri

SEA	Yükleme Tipi	Yük (kN)	Akma Gerilmesi (kN)	Elastisite Modülü (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)	Mesh Boyutu (mm)	Mesh Tipi
IPE_SB 200	Tek Noktadan	74,32	281	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons
IPE_PB 200	Tek Noktadan	66,09	281	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons
IPE_DB 200	Tek Noktadan	65,73	281	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons
IPE_SB 240	Yayılı	132,80	285	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons
IPE_PB 240	Yayılı	126,18	285	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons
IPE_DB 240	Yayılı	124,53	285	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons
IPE_SB 300	İki Noktadan	276,47	305	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons
IPE_PB 300	İki Noktadan	265,49	305	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons
IPE_DB 300	İki Noktadan	245,89	305	$1,9 \times 10^5$	1443	25	Tetrahedrons

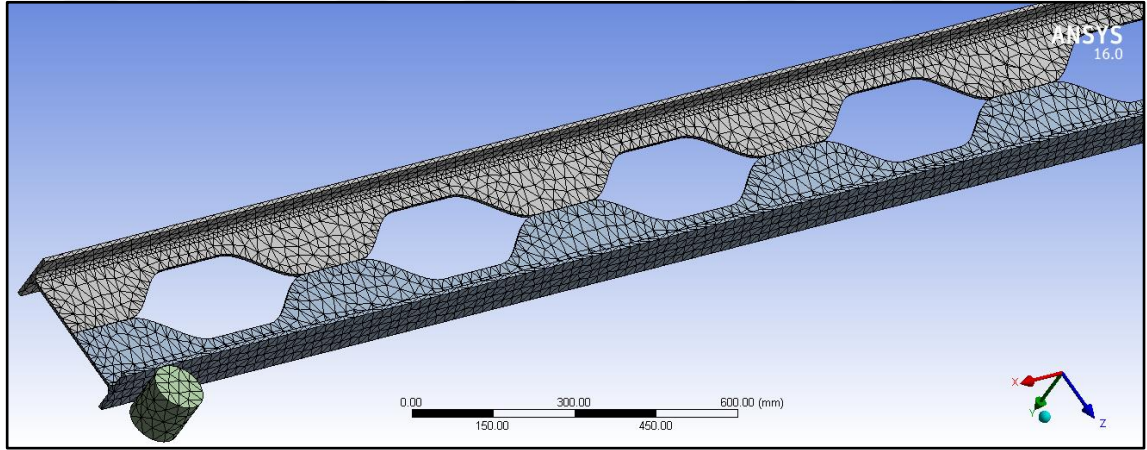
4.4.1. IPE 200 profilleri SEA (tekil yükleme)

4.4.1.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_200 kirişi

Deneyisel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 74,32 kN kuvvet kirişin üst başlığının orta bölgesine uygulanmıştır (Şekil 4.86). Kuvvetin uygulandığı alan deneyisel çalışmada yük hücresinin kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 20 adımda uygulanmıştır. Şekil 4.87’de Tetrahedrons metodu ile kirişin parçalara bölünmüş hali verilmiştir (maksimum 25 mm).

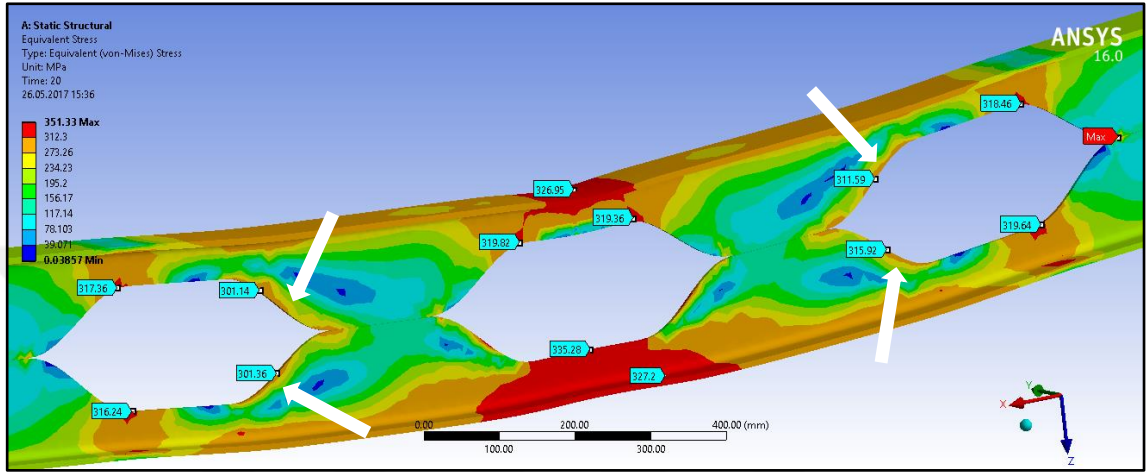


Şekil 4.86. Sinüsoidal boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; tekil yükleme durumu

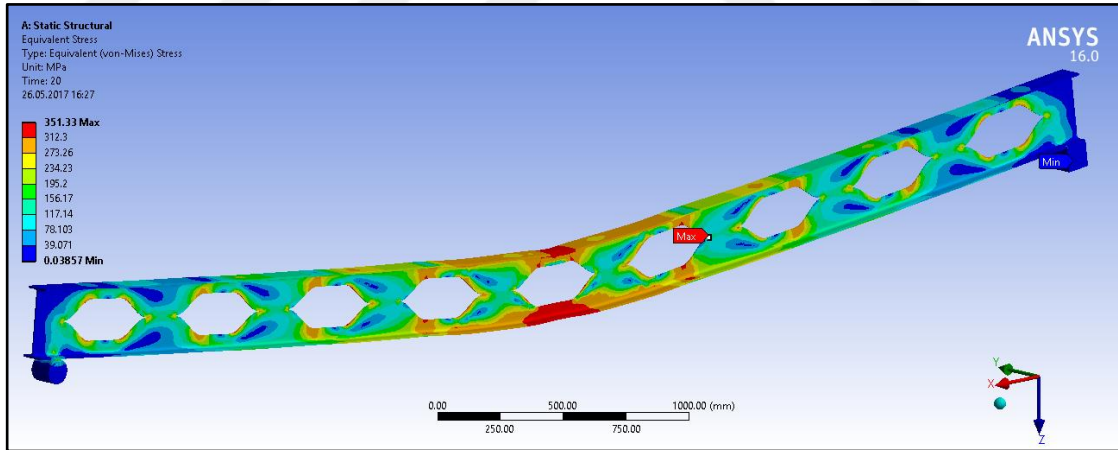


Şekil 4.87. Sinüsoidal boşluklu IPE_200 kirişinin ağırlara ayrılması

Deneyisel çalışmalardan elde edilen 74,32 kN ortalama göçme yükü kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman eşdeğer gerilme maksimum 311,33 MPa olarak meydana gelmiştir. Tekil yükleme durumu göz önüne alındığında Şekil 4.88’de görüleceği üzere yüksek gerilmelerin özellikle orta bölgedeki başlıklarda yoğunlaştığı ve genel olarak bakıldığında boşlukların sinüs eğrisi formu ile yatay kısmının kesişimlerinde kümelenerek noktasal olarak meydana gelmiştir. Sinüs eğrisi şeklinde olan kısımlarda ise gerilmelerin noktasal olarak kümelenmediği aksine sinüs eğrisi formuna bağlı olarak yayvan şekilde dağıldığı (oklarla belirtilen kısımlar) tespit edilmiştir.

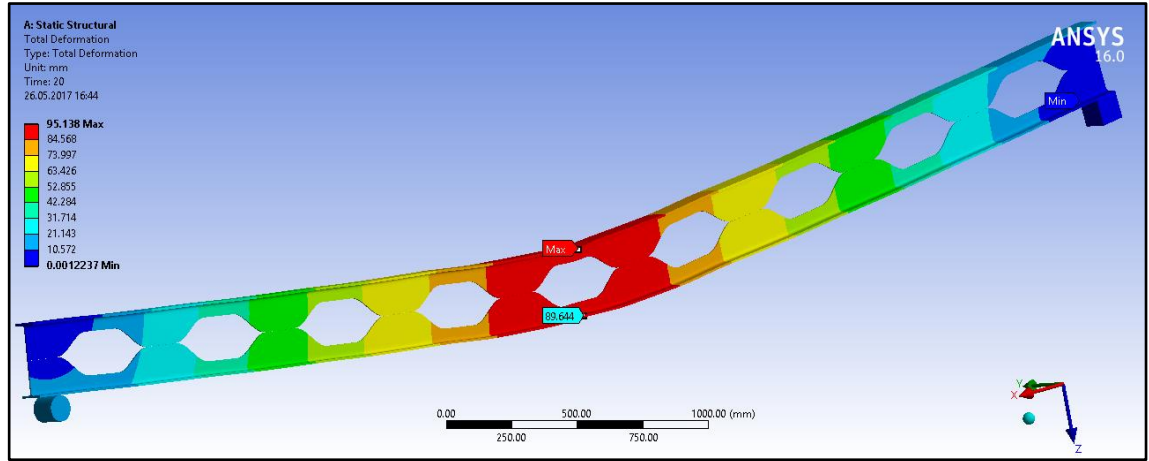


Şekil 4.88. IPE_SB_200 kirişi SEA orta bölgesi gerilme dağılımı

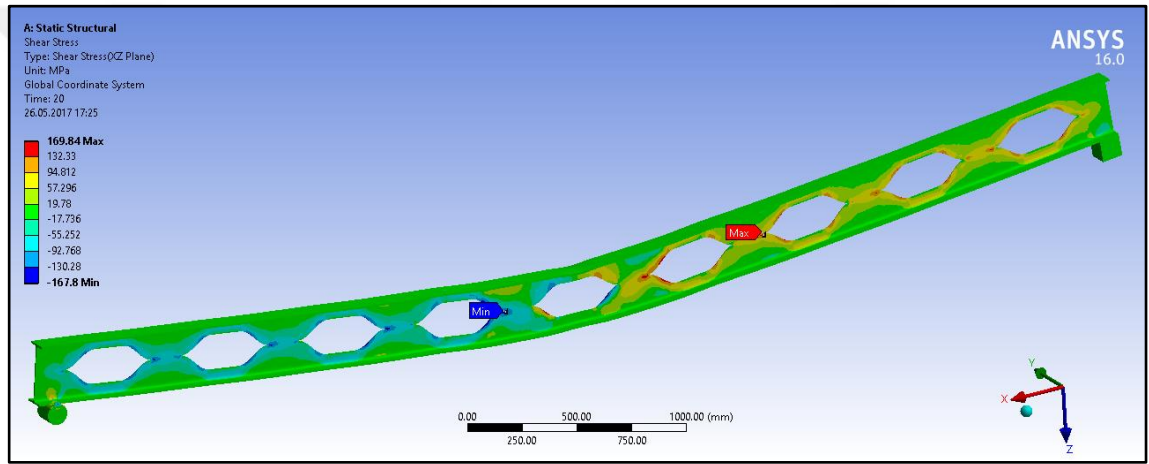


Şekil 4.89. IPE_SB_200 kirişi SEA gerilme dağılımı

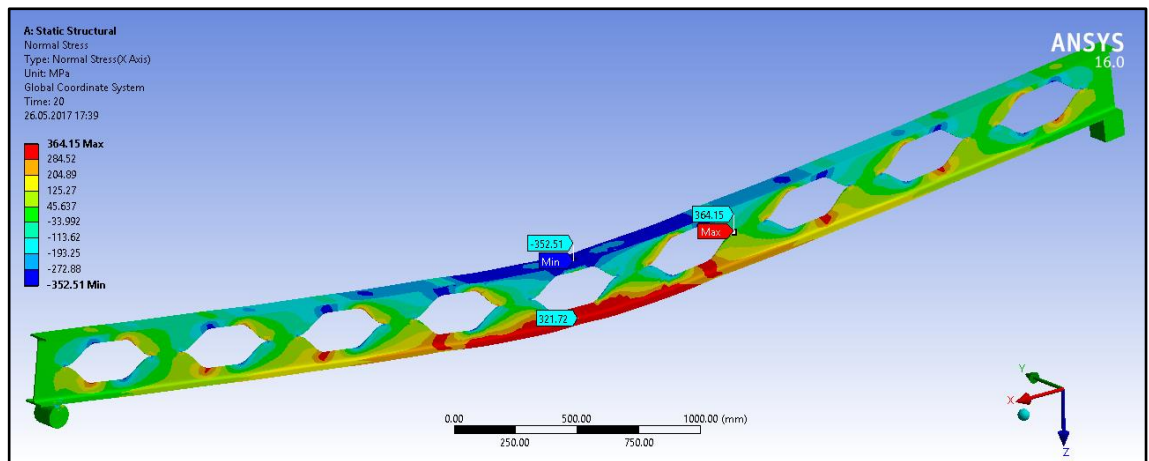
Deneyisel çalışmadan elde edilen 74,32 kN ortalama göçme yükü kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman 95.14 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir. Deneyisel çalışmada deplasman ölçerler alt başlığın ortasına yerleştirildiği için ANSYS sonuçlarında da alt başlıktaki 89.64 mm deplasman dikkate alınmıştır (Şekil 4.90). Kesme gerilmesi ve normal gerilme değerleri ise sırasıyla maksimum 169,84 MPa ve 364,15 MPa’dır (Şekil 4.91, Şekil 4.92).



Şekil 4.90. IPE_SB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında deplasmanlar

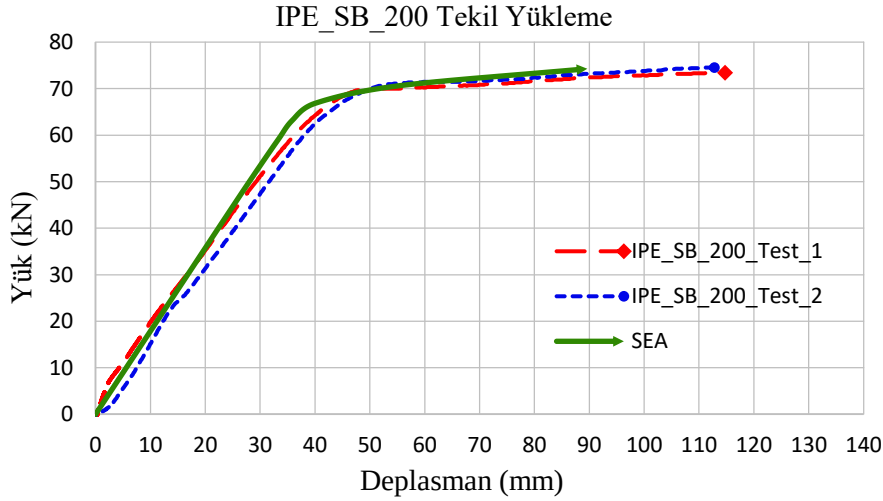


Şekil 4.91. IPE_SB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri



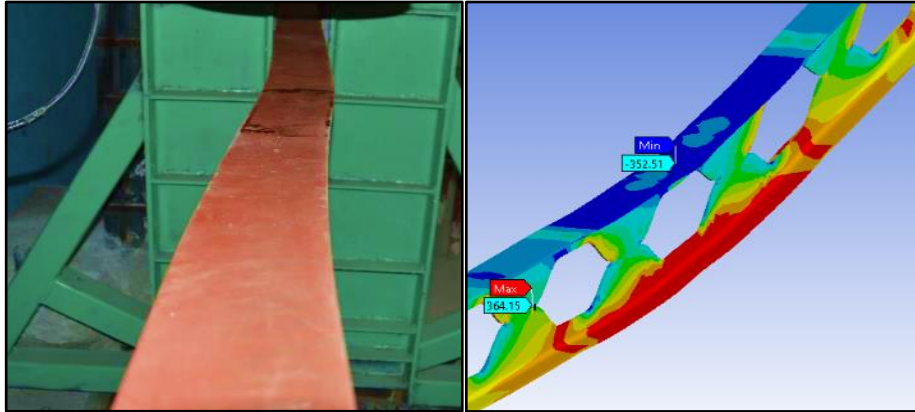
Şekil 4.92. IPE_SB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler

Deneyisel çalışmadan elde edilen veriler ile ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. IPE_SB_200 kirişi üzerine tekil yük uygulandığı zaman kiriş orta bölgesi alt başlığında deneyisel çalışmadan elde edilen deplasmanlar IPE_SB_200_Test_1 için; 114,75 mm ve IPE_SB_200_Test_2 için; 112,81 mm olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi aynı yükü 20 adımda uygulandığında kiriş alt başlığında 89,64 mm olarak hesaplamıştır. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri kıyaslaması Şekil 4.93'te verilmiştir.



Şekil 4.93. IPE_SB_200 kirişleri SEA ve deneyisel yük-deplasman grafikleri

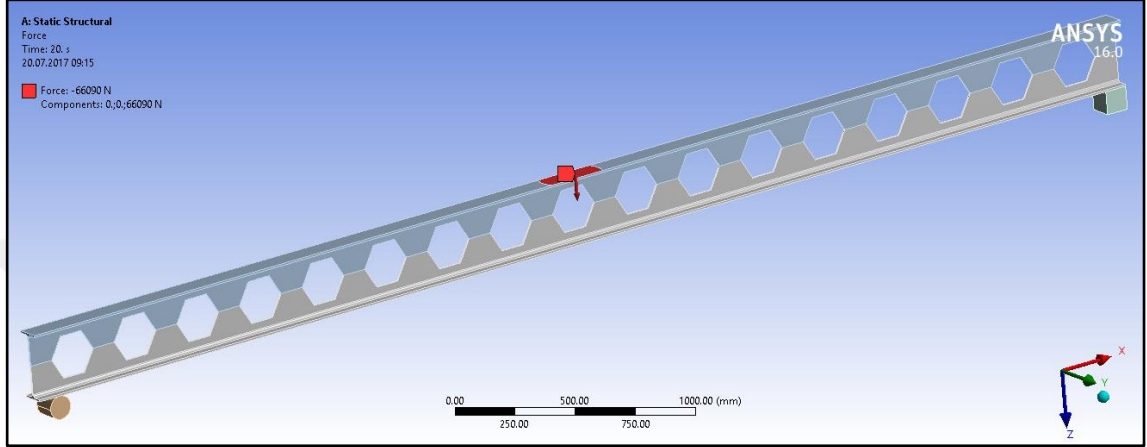
Şekil 4.95'te normal basınç gerilmeleri etkisiyle kirişte meydana gelen yanal burkulma durumu ve sonlu elemanlar analizden elde edilen normal gerilme dağılımı görsel olarak karşılaştırılmıştır.



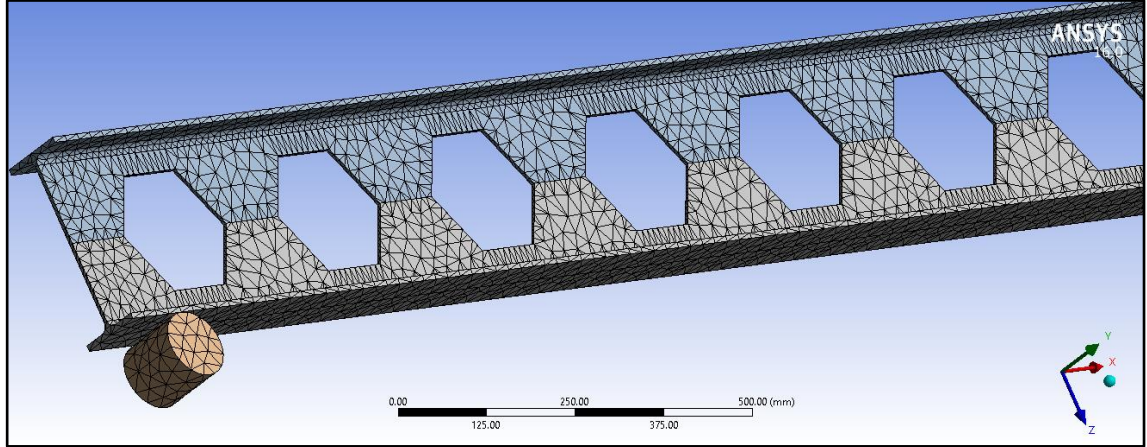
Şekil 4.94. IPE_SB_200 kirişleri deneyisel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.1.2. Petek boşluklu IPE_200 kirişi

Petek boşluklu IPE_200 kirişleri üzerinde yapılan deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 65,29 kN kirişin üst başlığının orta bölgesine uygulandığında kirişin lineer olmayan bölgeye geçemediği gözlemlenmiştir. Bu kuvvet yerine IPE_PB_200_Test_1'in göçme yükü olan 66,09 kN uygulanmıştır (Şekil 2.95). Şekil 4.96'da ise tetrahedrons metodu ile kirişin parçalara bölünmüş hali verilmiştir.

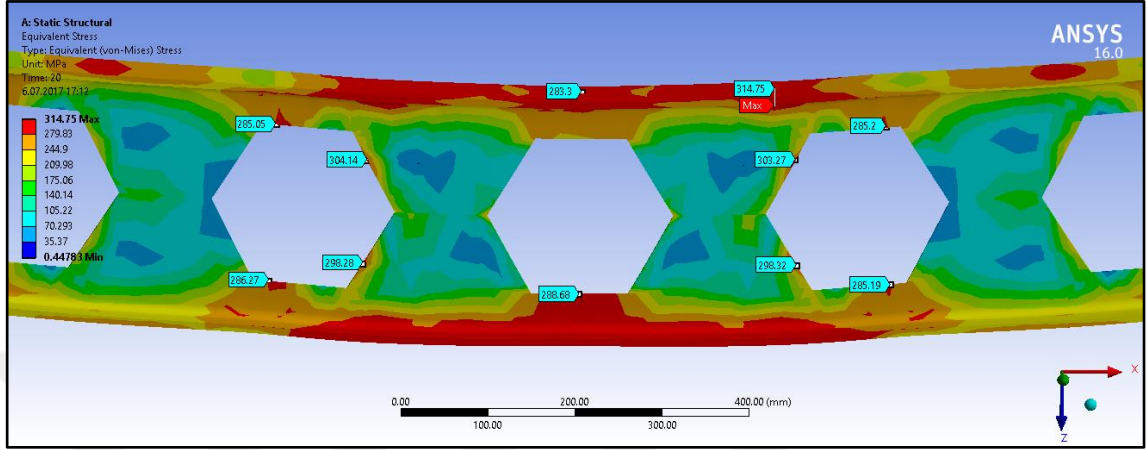


Şekil 4.95. Petek boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; tekil yükleme durumu

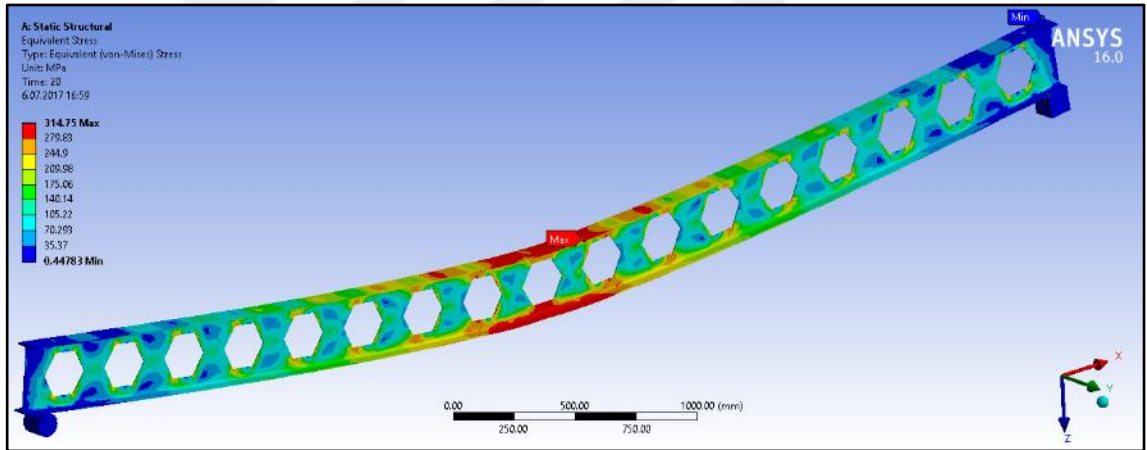


Şekil 4.96. Petek boşluklu IPE_200 kirişinin ağırlara ayrılması

Deneyisel çalışmadan elde edilen 66,09 kN göçme yükü kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman eşdeğer gerilme maksimum 314,75 MPa'dır. Tekil yükleme altında yapılan bu analizde başlıklardaki gerilmelerin yayvan şekilde dağıldığı görülmektedir. Boşluk çevrelerinde ve altıgen köşe bölgelerinde ise yüksek gerilmelerin yoğunlaştığı görülmektedir. (Şekil 4.97, Şekil 4.98).

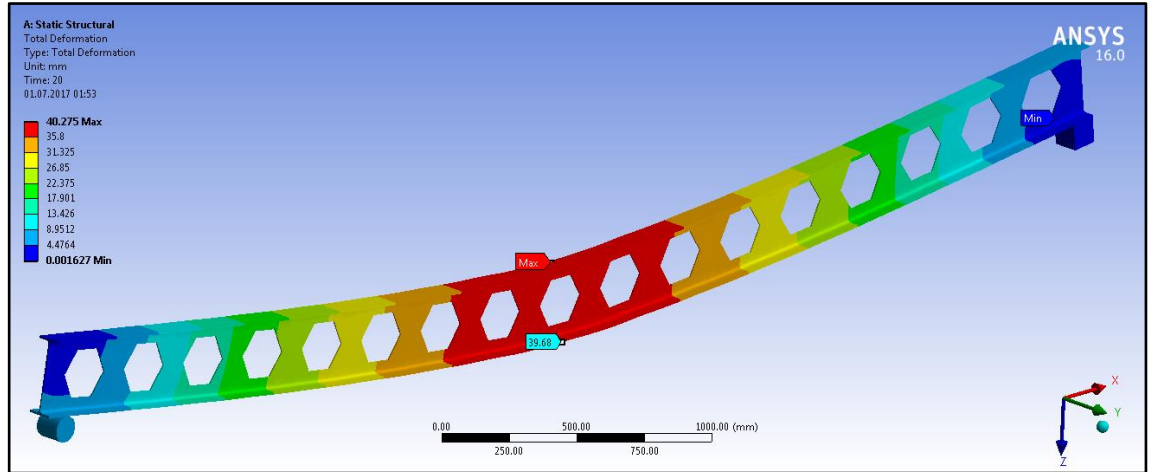


Şekil 4.97. IPE_PB_200 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

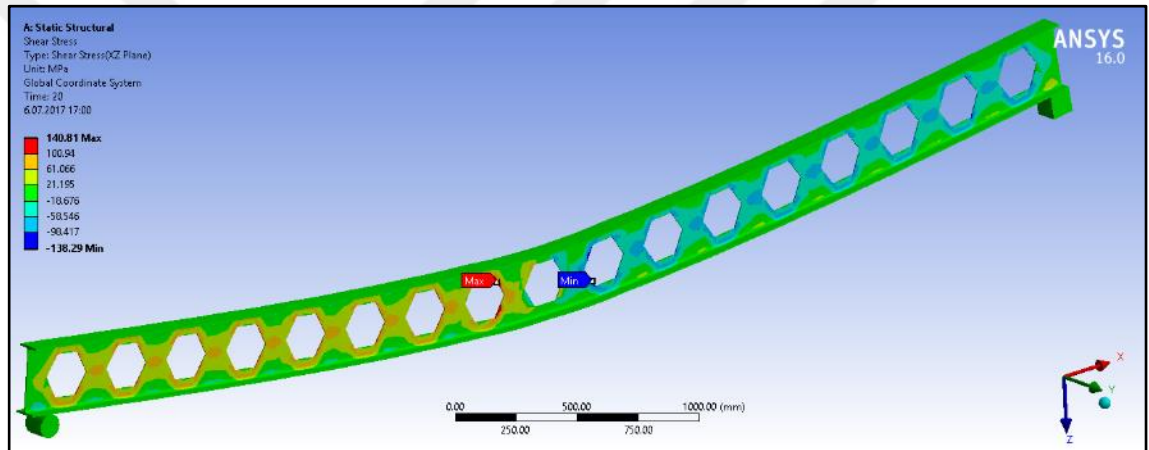


Şekil 4.98. IPE_PB_200 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

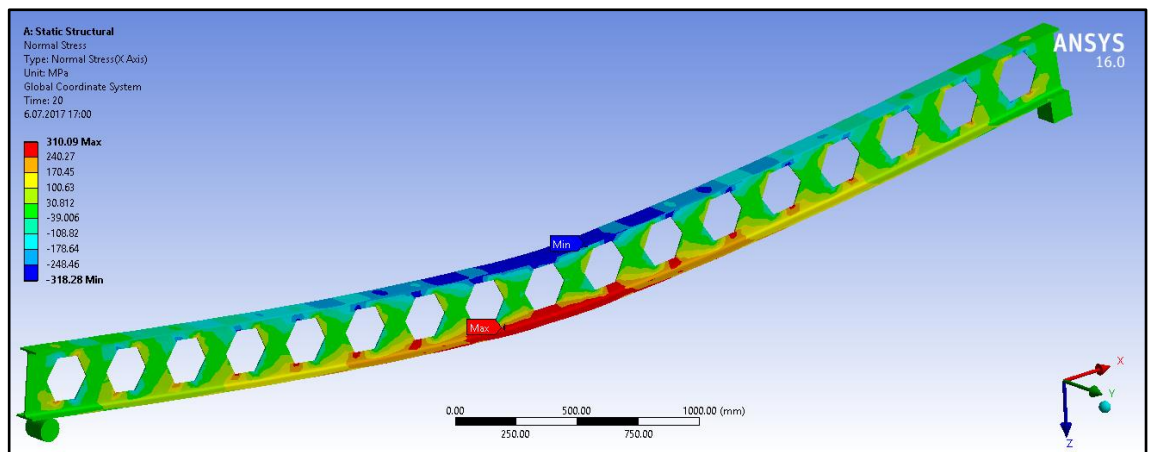
Deneyisel çalışmadan elde edilen 66,09 kN göçme yükü kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman 40,3 mm maksimum deplasman meydana gelmiştir. Kiriş alt başlığının ortasındaki deplasman ise 39,68 mm olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.99). Kesme gerilmesi ve normal gerilme değerleri ise sırasıyla maksimum 140,81 MPa ve 318,28 MPa'dır (Şekil 4.100, Şekil 4.101).



Şekil 4.99. IPE_PB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman

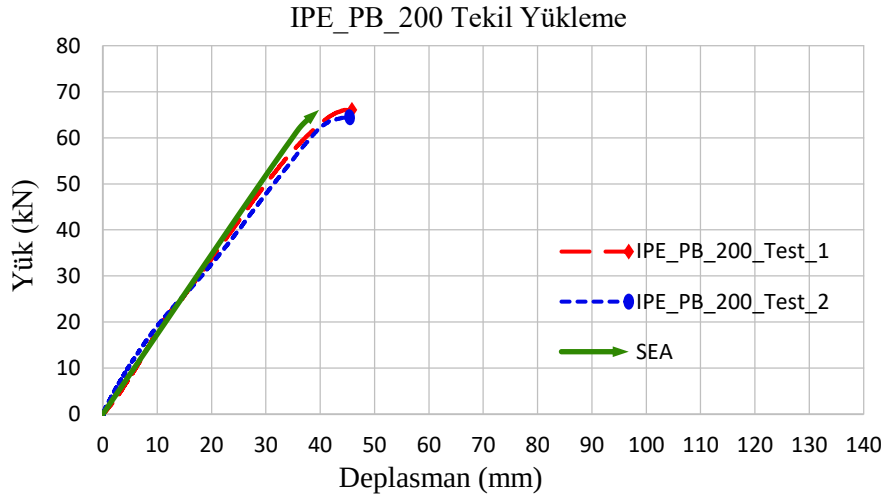


Şekil 4.100. IPE_PB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri



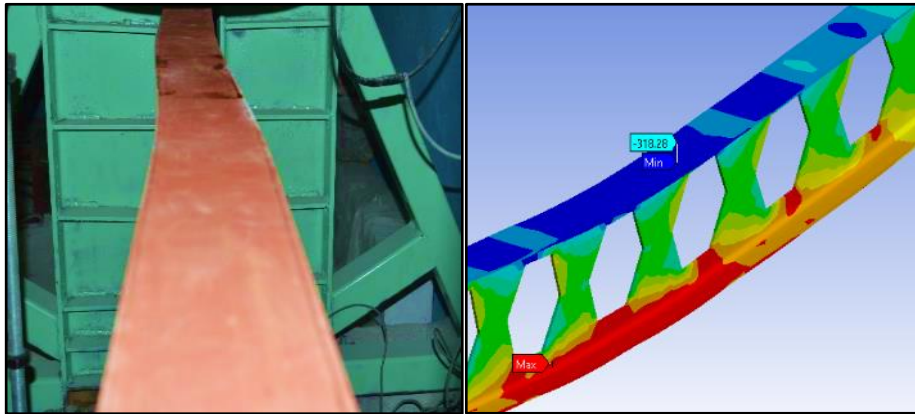
Şekil 4.101. IPE_PB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler

IPE_PB_200 kirişi üzerine tekil yük uygulandığı zaman kiriş orta bölgesi alt başlığında deneysel çalışmadan elde edilen göçme yüküne karşılık gelen deplasman IPE_DB_200_Test_1 için; 45,8 mm ve IPE_DB_200_Test_2 için; 45,4 mm olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi ile aynı yükü 20 adımda uygulandığında kiriş orta bölgesi alt başlığında 39,7 mm olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen göçme yüküne kadar olan yük-deplasman grafikleri ANSYS-Workbench sonlu elemanlar analizinden elde edilen yük-deplasman grafiği ile kıyaslanması Şekil 4.102’de verilmiştir.



Şekil 4.102. IPE_PB_200 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri

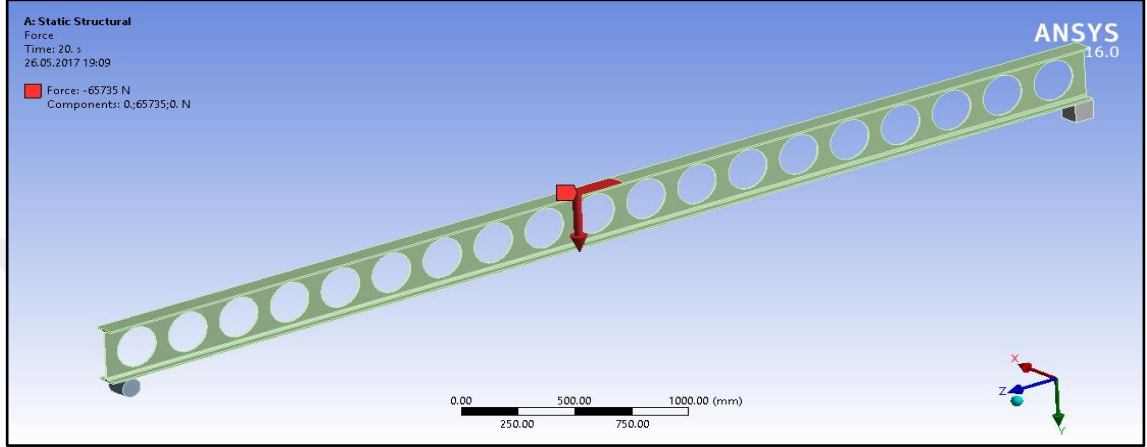
Şekil 4.103’te normal basınç gerilmeleri etkisiyle kiriş üst başlığında meydana gelen yanal burkulma durumu ve sonlu elemanlar analizden elde edilen normal gerilme dağılımı görsel olarak karşılaştırılmıştır.



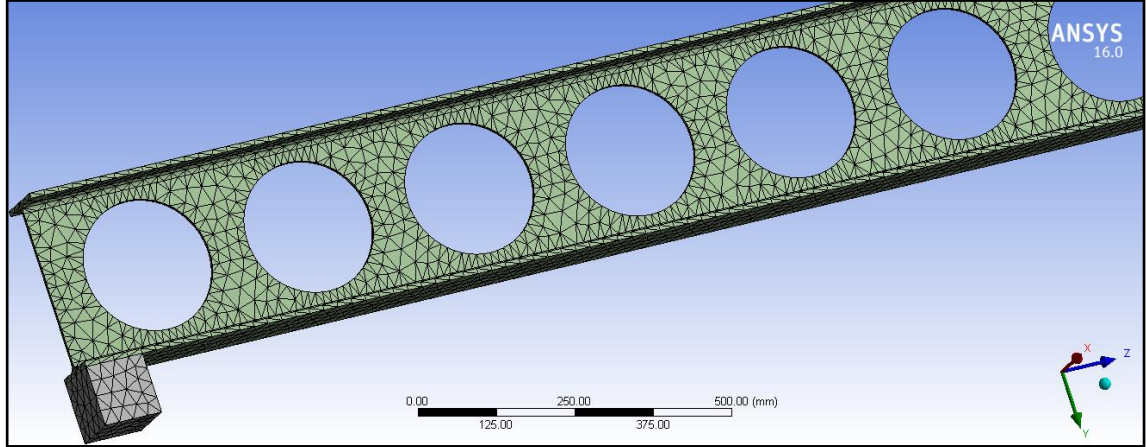
Şekil 4.103. IPE_PB_200 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.1.3. Dairesel boşluklu IPE_200 kirişi

Dairesel boşluklu IPE_200 kirişleri üzerinde yapılan deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 63,83 kN kirişin üst başlığının orta bölgesine uygulandığında kirişin lineer olmayan bölgeye geçemediği gözlemlenmiştir. Bu kuvvet yerine IPE_DB_200_Test_1'in göçme yükü olan 65,73 kN uygulanmıştır (Şekil 4.104). Şekil 4.105'te tetrahedrons metodu ile kirişin parçalara bölünmüş hali verilmiştir.

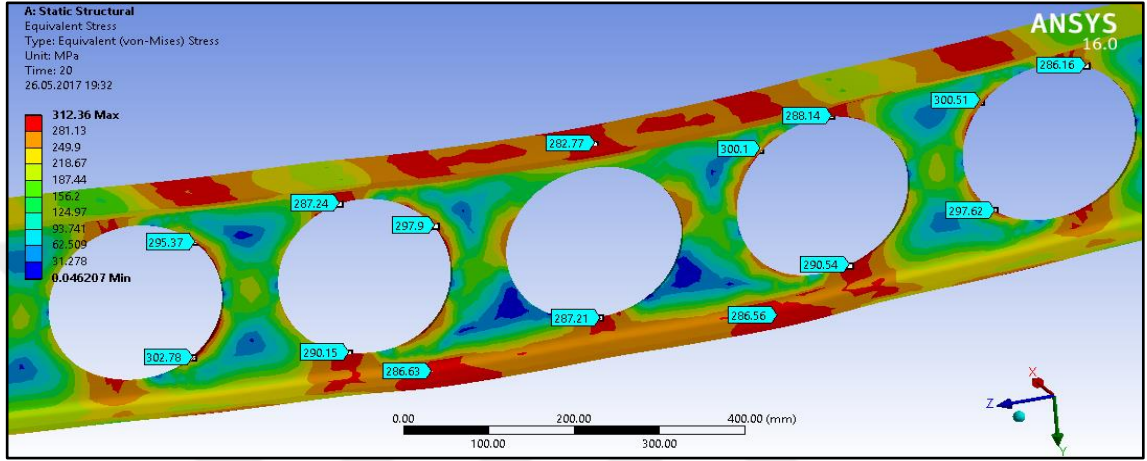


Şekil 4.104. Dairesel boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; tekil yükleme durumu

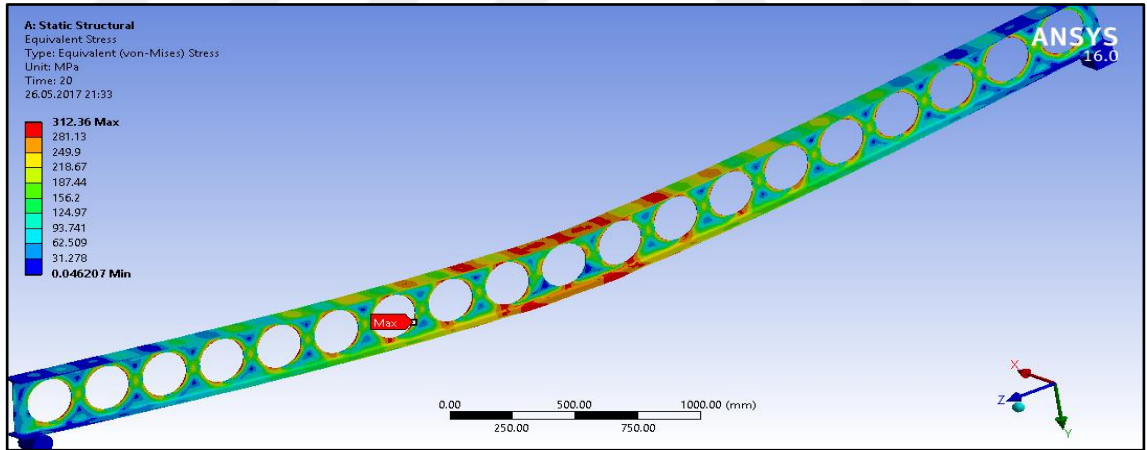


Şekil 4.105. Dairesel boşluklu IPE_200 kirişinin ağırlara ayrılması

Deneyisel çalışmadan elde edilen 65,73 kN göçme yükü kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman eşdeğer gerilme maksimum 312,36 MPa çıkmıştır. Dairesel boşluklu kirişin tekil yükleme altında yapılan analizi neticesinde yüksek gerilmelerin bölgesel olarak yer yer meydana geldiği görülmektedir. Boşluk çevrelerinde ise dairesel forma bağlı olarak yüksek gerilmeler bölgesel olarak yoğunlaşmayıp halka etrafında dağılım göstermektedir. Kiriş gövdesinin (web-post) sinüsoidal ve petek boşluklu kirişlerin gövdesine göre küçük olmasından dolayı bu bölgedeki gerilmeler diğer kirişlerde çıkan değerlere göre fazla çıkmıştır (Şekil 4.106, Şekil 4.107).

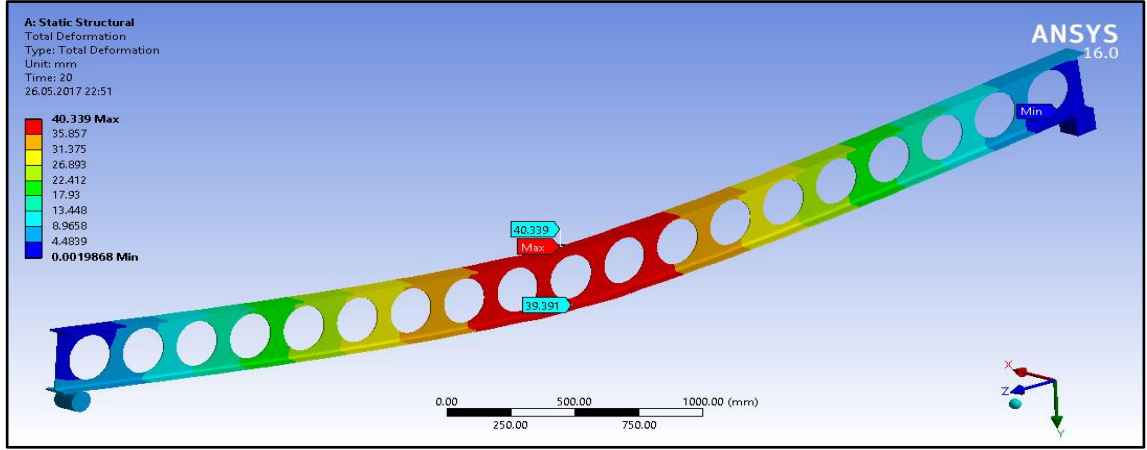


Şekil 4.106. IPE_DB_200 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

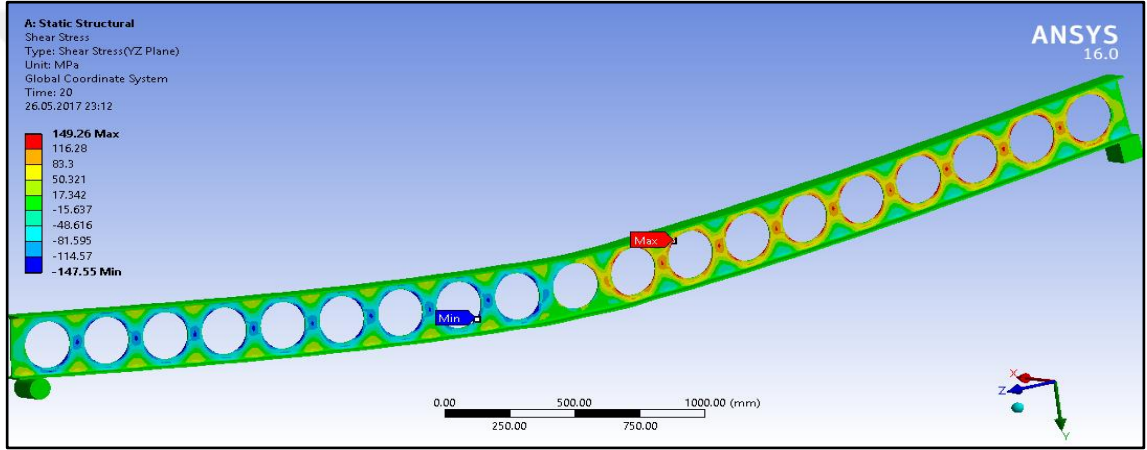


Şekil 4.107. IPE_DB_200 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

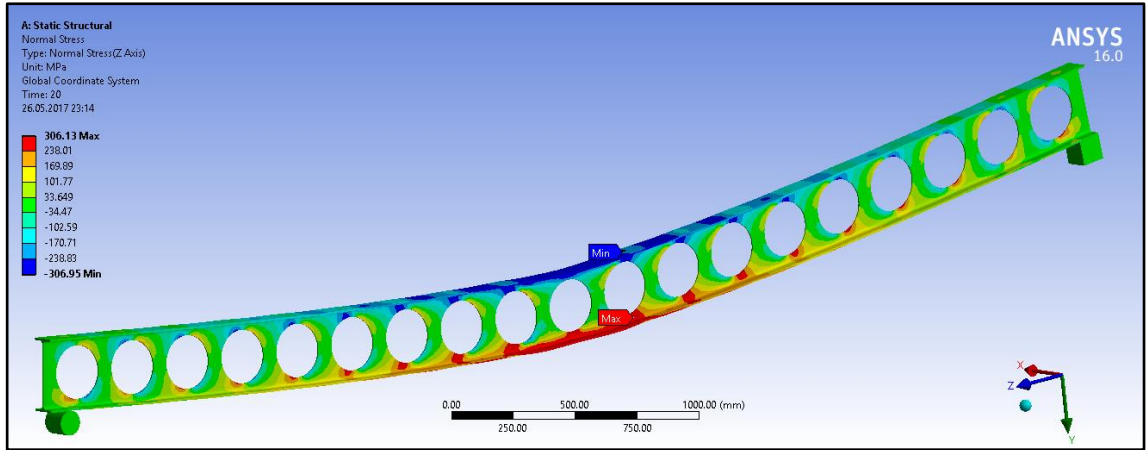
Deneyisel çalışmadan elde edilen 65,73 kN göçme yükü kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman 40,34 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.108). Deneyisel çalışmada deplasman ölçerler alt başlığa yerleştirildiği için SEA sonuçlarında da alt başlıktaki 39,4 mm deplasman dikkate alınmıştır. Kesme gerilmesi ve normal gerilme değerleri ise sırasıyla maksimum 149,26 MPa ve 306,95 MPa'dır (Şekil 4.109, Şekil 4.110).



Şekil 4.108. IPE_DB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman

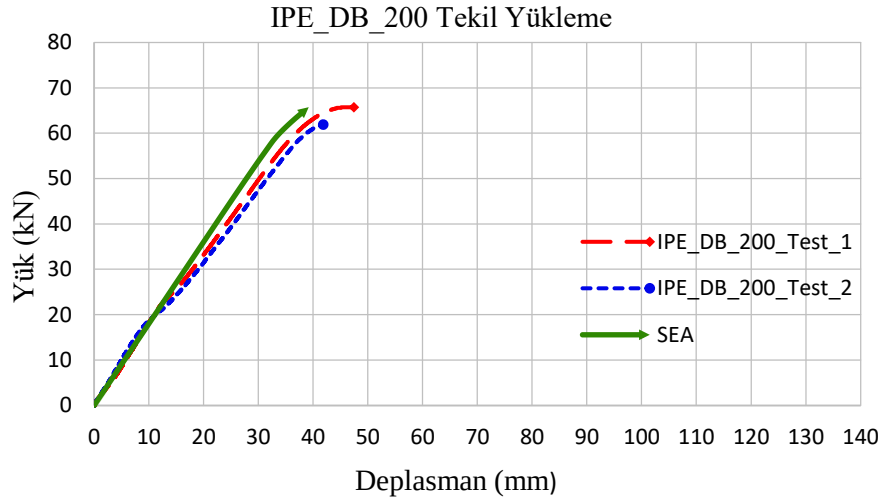


Şekil 4.109. IPE_DB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri



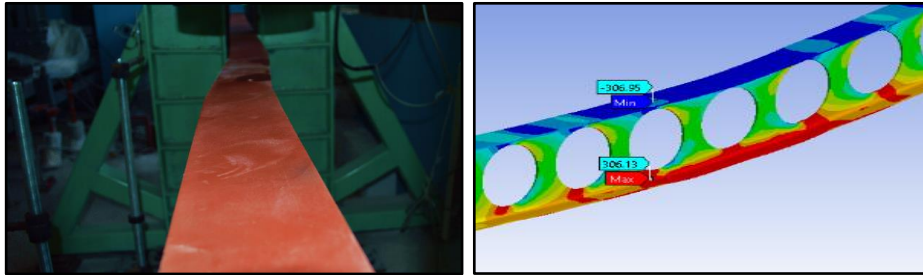
Şekil 4.110. IPE_DB_200 kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler

Deneyel çalışmadan elde edilen göçme yüküne kadar olan yük-deplasman grafiği ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen yük-deplasman grafiği ile kıyaslaması Şekil 4.111’de verilmiştir. IPE_DB_200 kirişi üzerine tekil yük uygulandığı zaman kiriş orta bölgesi alt başlığında deneyel çalışmadan elde edilen göçme yüküne karşı gelen deplasmanlar IPE_DB_200_Test_1 için; 47,5 mm ve IPE_DB_200_Test_2 için; 41,9 mm olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi ile aynı yükü 20 adımda uygulandığında 39,4 mm olarak hesaplamıştır.



Şekil 4.111. IPE_DB_200 kirişleri SEA ve deneyel yük-deplasman grafikleri

Şekil 4.112’de normal basınç gerilmeleri etkisiyle kiriş üst başlığında meydana gelen yanal burkulma durumu ve sonlu elemanlar analizden elde edilen normal gerilme dağılımı görsel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.112. IPE_DB_200 kirişleri deneyel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.1.4. IPE_200 kirişlerinin karşılaştırılması

GYA IPE_200 kirişlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi sonucunda elde edilen gerilme ve deplasmanlar Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. IPE_200 kirişleri sonlu elemanlar analizi sonuçları

SEA	Yüklemeye Tipi	Yük (kN)	Maksimum Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	Maksimum Eşdeğer Gerilme (MPa)	Maksimum Kesme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Normal Gerilme (MPa)
SB_200	Tekil	74,32	89,64	351,33	169,84	364,15
PB_200	Tekil	66,09	39,68	314,75	140,81	318,28
DB_200	Tekil	65,73	39,39	312,36	149,26	306,95

Çizelge 4.12’de deneysel çalışmadan elde edilen maksimum göçme yüküne karşılık gelen deplasmanlar ve SEA sonucunda elde edilen deplasmanlar verilmiştir.

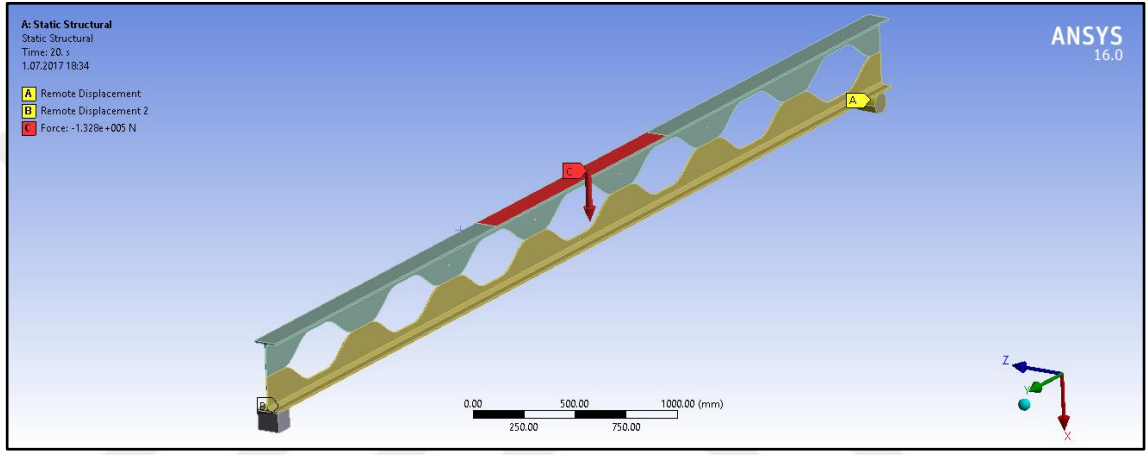
Çizelge 4.12. IPE_200 kirişleri deneysel ve SEA verileri karşılaştırılması

TEST	Yüklemeye Tipi	(Deneysel) Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	(Deneysel) Ort. Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	(SEA) Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	Hata Payı (%)
SB_200 Test_1	Tekil	114,75	113,78	89,64	21,2
SB_200 Test_2	Tekil	112,81			
PB_200 Test_1	Tekil	45,80	45,7	39,68	13,2
PB_200 Test_2	Tekil	45,60			
DB_200 Test_1	Tekil	47,50	44,7	39,39	11,9
DB_200 Test_2	Tekil	41,90			

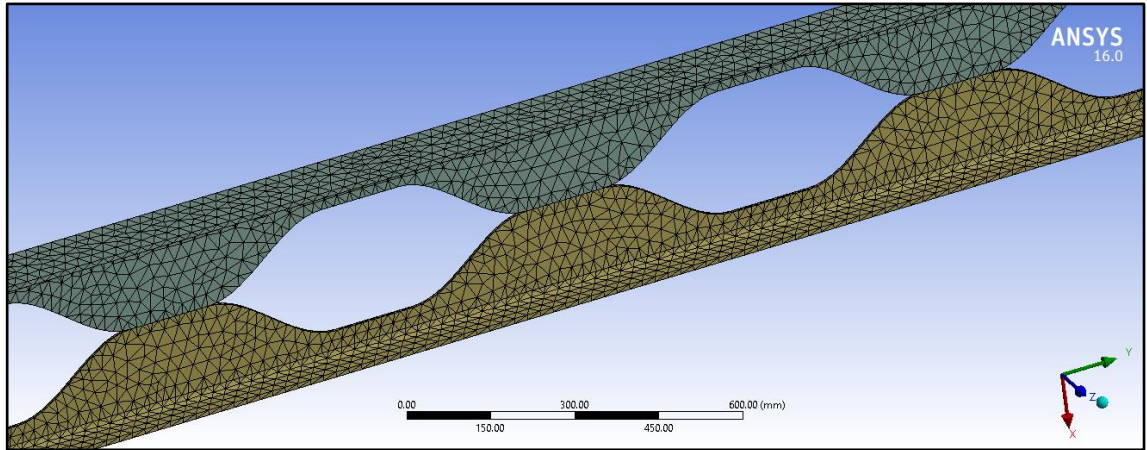
4.4.2. IPE 240 profilleri SEA (yayıllı yükleme)

4.4.2.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_240 kirişi

Deneyisel çalışmada yayılı yük altında elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 132,80 kN kirişin üst başlığının orta bölgesine uygulanmıştır. Kuvvet deneyisel çalışmada yük hücresinin altına yerleştirilen 153 cm uzunluğundaki ara kiriş ile sinüs boşluklu kirişlere aktarılmış olup ansys modelinde de ara kirişin sinüs boşluklu kirişe temas ettiği yüzey alanı kadar alan birebir tanımlanmış ve kuvvet 20 adımda uygulanmıştır (Şekil 4.113). Tetrahedrons metodu ile kirişin parçalara bölünmüş hali (maksimum 25 mm) Şekil 4.114’te verilmiştir.

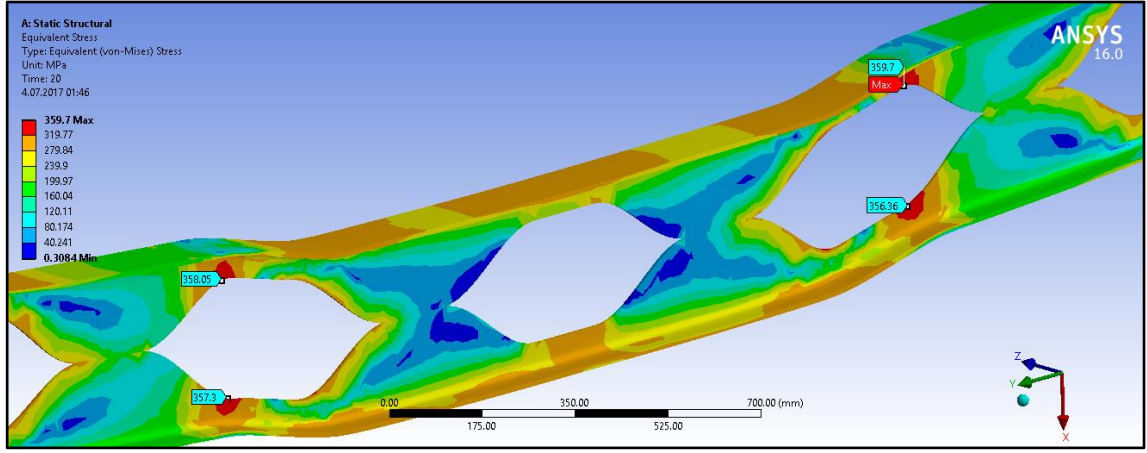


Şekil 4.113. Sinüsoidal boşluklu kiriş SEA; yayılı yükleme durumu

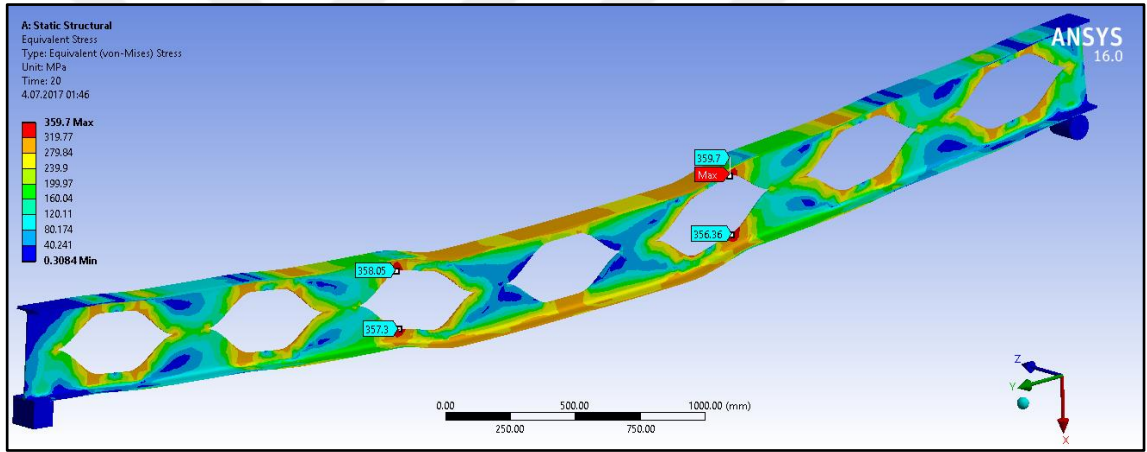


Şekil 4.114. Sinüsoidal boşluklu IPE_240 kirişinin ağlara ayrılması

Deneyisel çalışmadan elde edilen 132,80 kN ortalama göçme yükü kirişe etki ettirildiği zaman eşdeğer gerilme maksimum 359,7 MPa'dır (Şekil 4.115, Şekil 4.116).

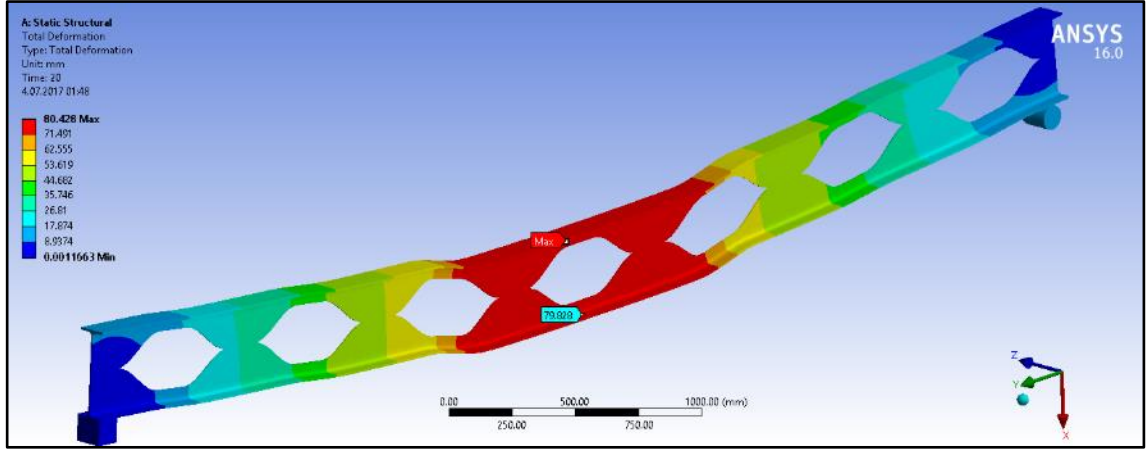


Şekil 4.115. IPE_SB_240 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

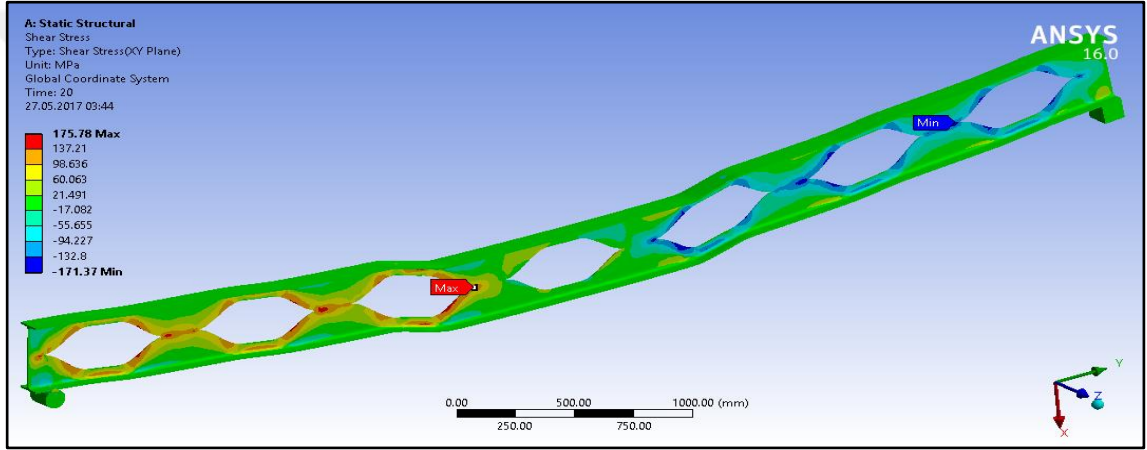


Şekil 4.116. IPE_SB_240 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

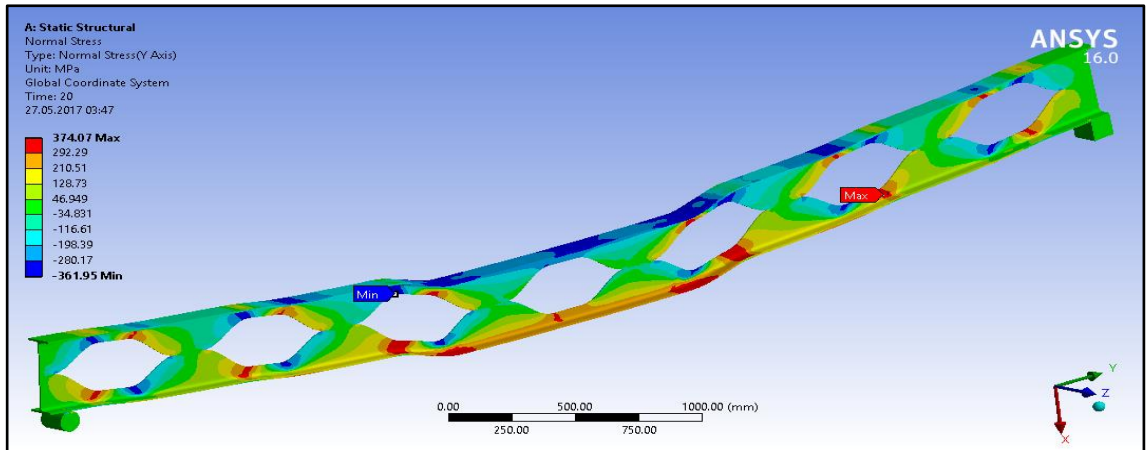
Deneyisel çalışmadan elde edilen 132,80 kN göçme yükü kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman alt başlık ortasındaki maksimum deplasman 79,83 mm olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.117). Kesme gerilmesi ve normal gerilme değerleri sırasıyla maksimum 175,78 MPa ve 374,07 MPa'dır (Şekil 4.118, Şekil 4.119).



Şekil 4.117. IPE_SB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman

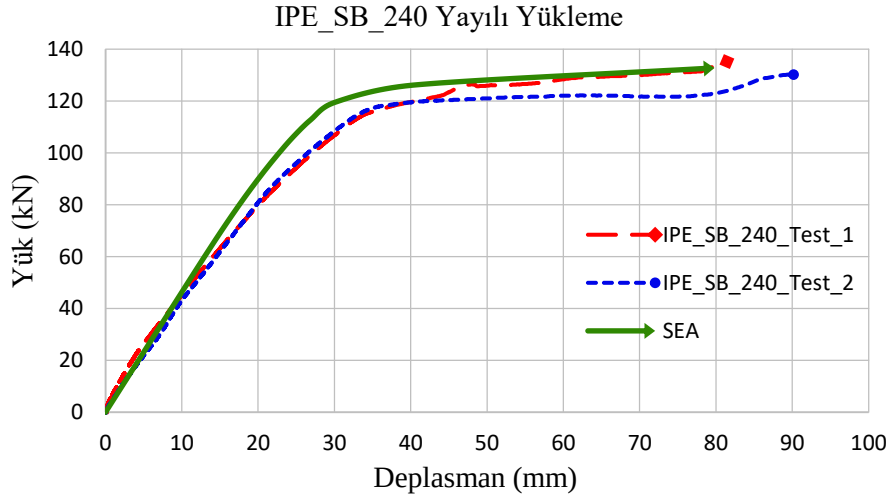


Şekil 4.118. IPE_SB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmeleri

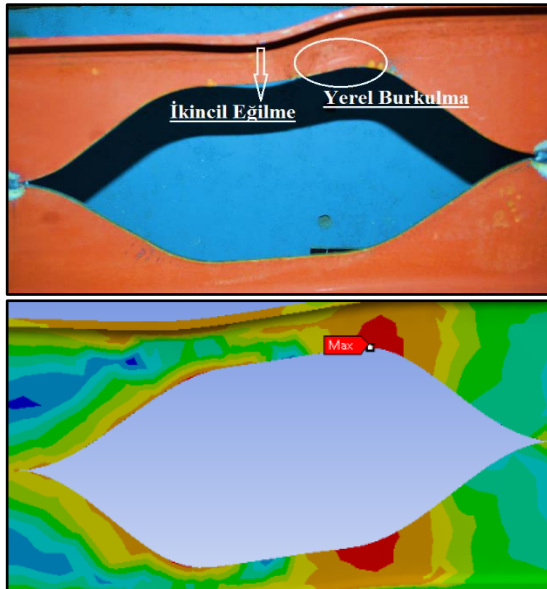


Şekil 4.119. IPE_SB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında normal gerilmeler

Deneyisel çalışmadan elde edilen veriler ile ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. IPE_SB_240 kirişi üzerine yayılı yük uygulandığı zaman kiriş orta bölgesi alt başlığında deneyisel çalışmadan elde edilen göçme yüküne karşılık gelen deplasmanlar IPE_SB_240_Test_1 için; 81,43 mm ve IPE_SB_240_Test_2 için; 90,17 mm olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi aynı yükü 20 adımda uygulandığında kiriş orta bölgesi alt başlığında 79,83 mm olarak hesaplamıştır. Deneylerden elde edilen yük- deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri kıyaslaması Şekil 4.120’de görsel olarak ise Şekil 4.121’de verilmiştir.



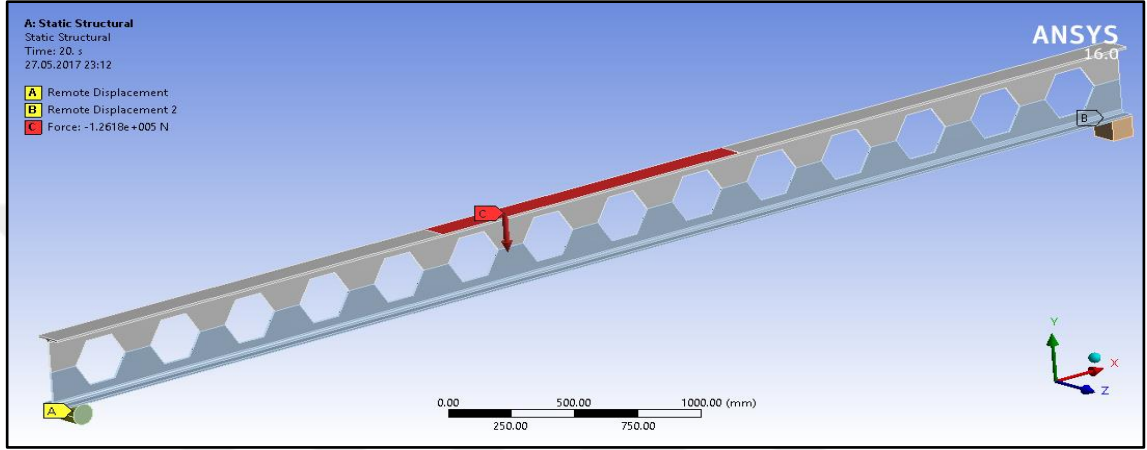
Şekil 4.120. IPE_SB_240 kirişleri SEA ve deneyisel yük-deplasman grafikleri



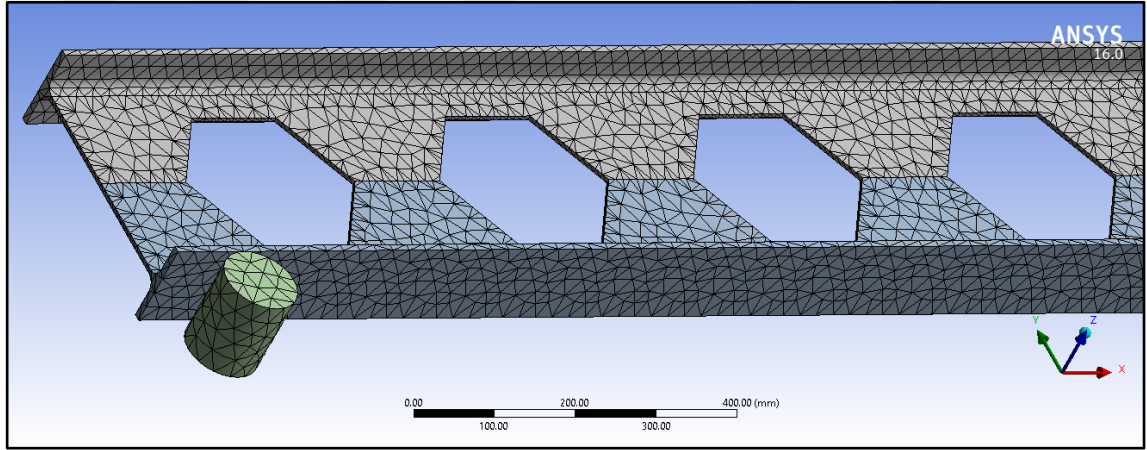
Şekil 4.121. IPE_SB_240 kirişleri deneyisel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.2.2. Petek boşluklu IPE_240 kirişi

Deneyisel çalışmada yayılı yük altında elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 126,18 kN kirişin üst başlığının orta bölgesine yayılı olarak uygulanmıştır. Kuvvet deneysel çalışmada yük hücresinin altına yerleştirilen 153 cm uzunluğundaki ara kiriş ile petek boşluklu kirişlere aktarılmış olup ansys modelinde de ara kirişin petek boşluklu kirişe temas ettiği yüzey alanı kadar alan birebir olacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 4.122). Tetrahedrons metodu ile kirişin parçalara bölünmüş hali (maksimum 25 mm) Şekil 4.123'te verilmiştir.

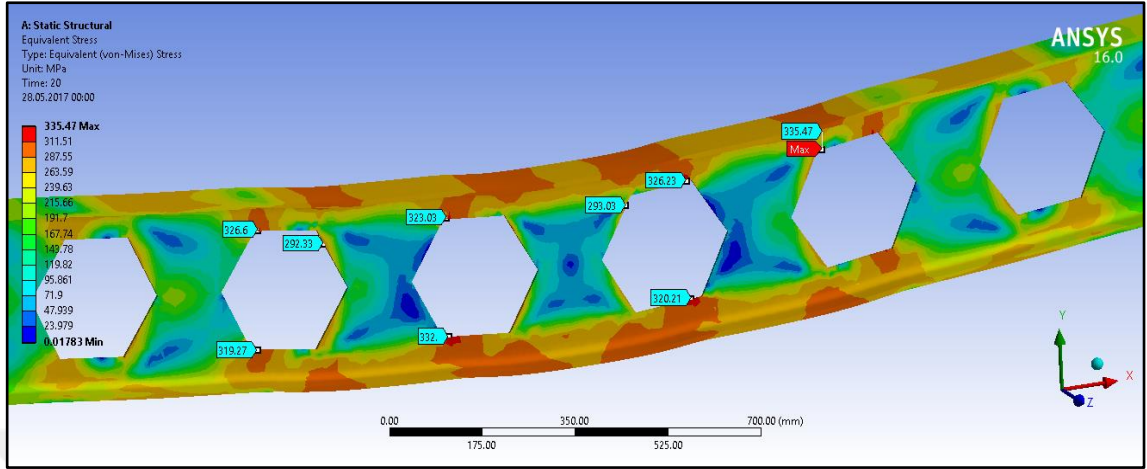


Şekil 4.122. Petek boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; yayılı yükleme durumu

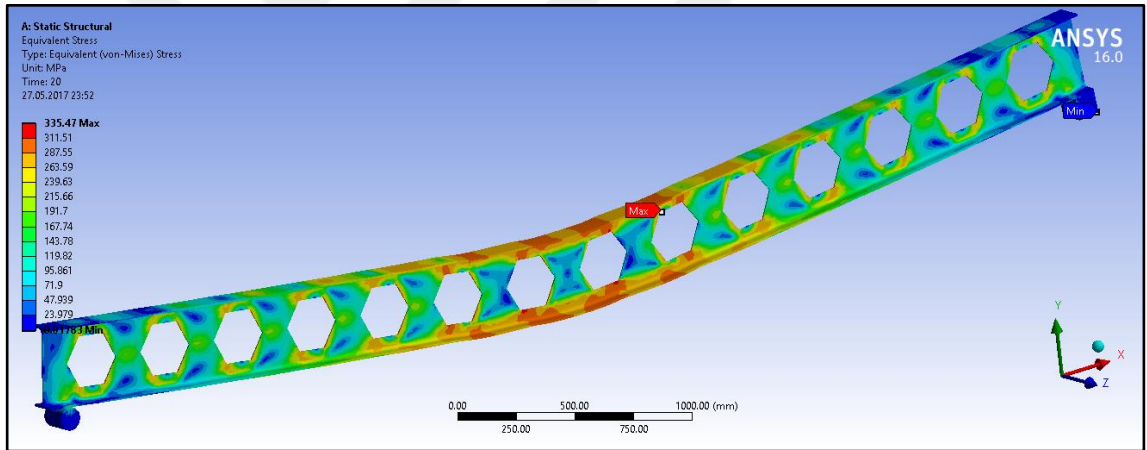


Şekil 4.123. Petek boşluklu IPE_240 kirişinin ağırlara ayrılması

Deneyisel çalışmadan elde edilmiş olan 126,18 kN ortalama göçme yükü kirişe etki ettirildiği zaman maksimum eşdeğer gerilme 335,47 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.124, Şekil 4.125).

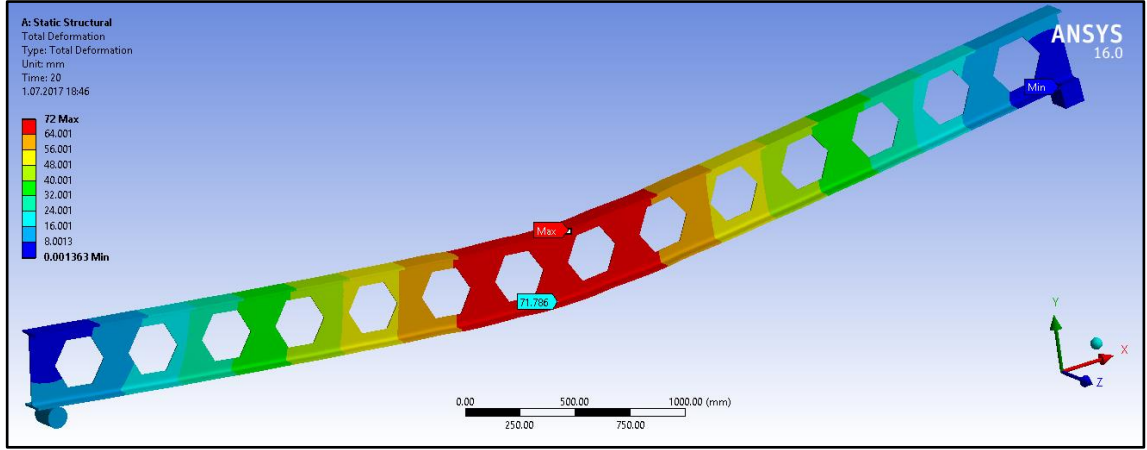


Şekil 4.124. IPE_PB_240 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

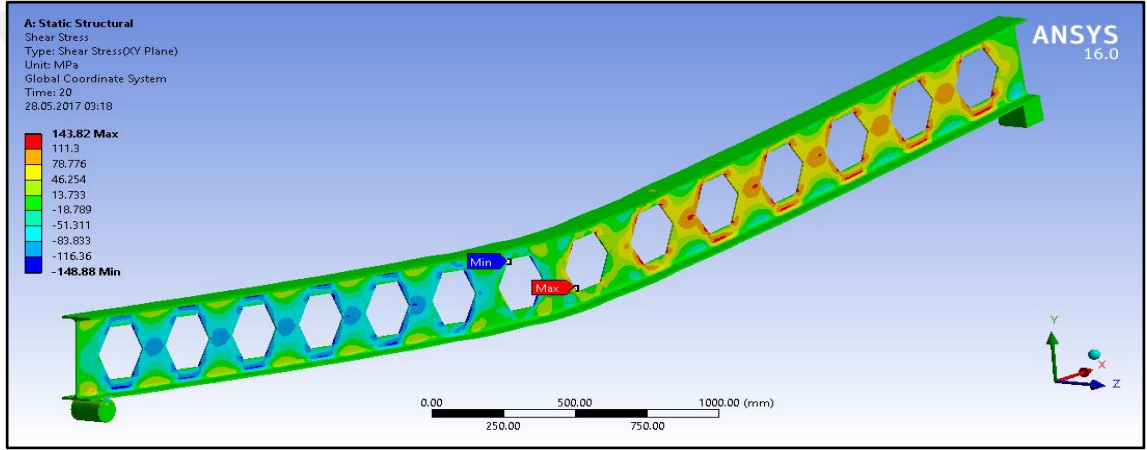


Şekil 4.125. IPE_PB_240 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

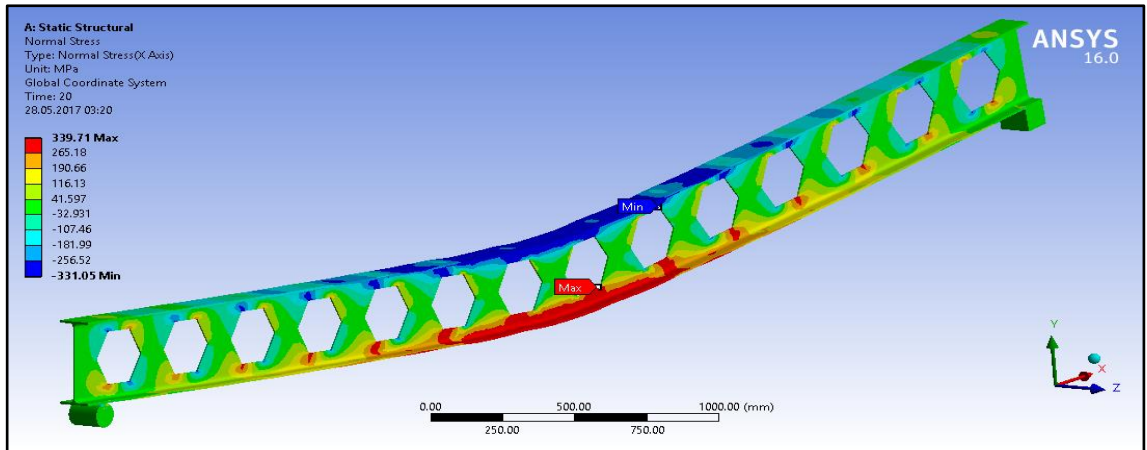
Deneyisel çalışmadan elde edilen 126,18 kN ortalama göçme yükü kirişin orta bölgesine yayılı olarak etki ettirildiği zaman alt başlığın ortasındaki maksimum deplasman 71,79 mm olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.126). Kesme gerilmesi ve normal gerilmeler sırasıyla maksimum 148,88 MPa ve 339,71 MPa'dır (Şekil 4.127, Şekil 4.128).



Şekil 4.126. IPE_PB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman

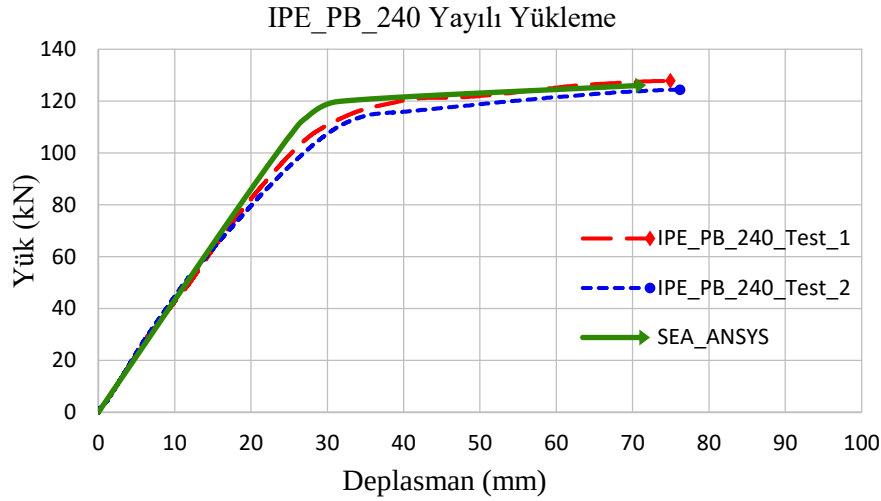


Şekil 4.127. IPE_PB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmeleri.



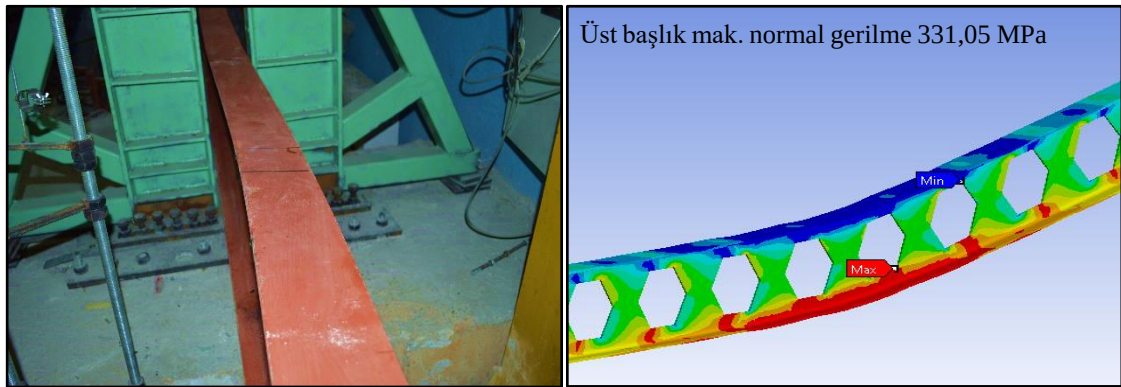
Şekil 4.128. IPE_PB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında normal gerilmeler

Deneysel çalışmadan elde edilen göçme yüküne kadar olan yük-deplasman grafiği ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen yük-deplasman grafiği ile kıyaslanmıştır (Şekil 4.129). IPE_PB_240 kirişi üzerine yayılı yük uygulandığı zaman kiriş orta bölgesi alt başlığında deneysel çalışmadan elde edilen göçme yüküne karşı gelen deplasmanlar IPE_PB_240_Test_1 için; 74,95 mm ve IPE_PB_240_Test_2 için; 76,21 mm olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi aynı yükü 20 adımda uygulandığında kiriş orta bölgesi alt başlığında 71,78 mm olarak hesaplamıştır.



Şekil 4.129. IPE_PB_240 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri

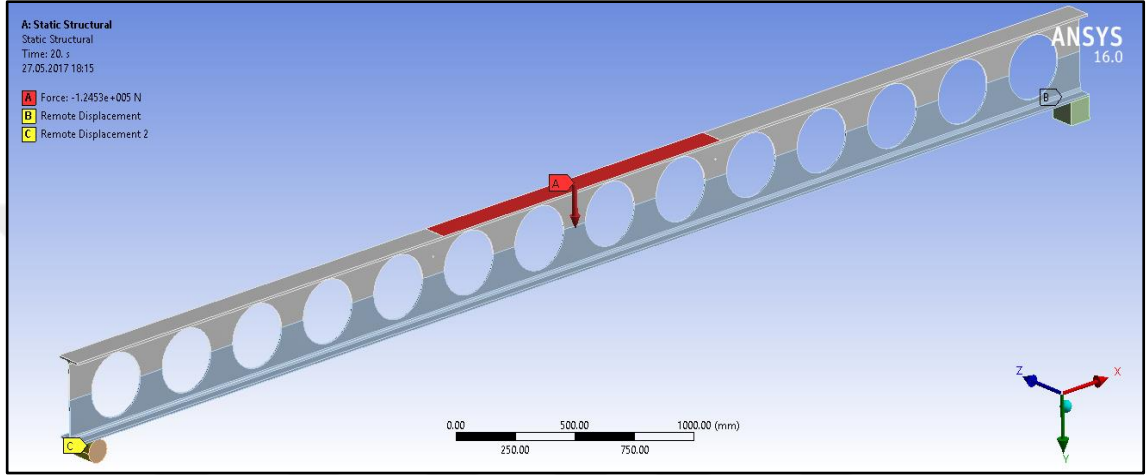
Şekil 4.130'da normal basınç gerilmeleri etkisiyle kiriş üst başlığında meydana gelen yanal burkulma durumu ve sonlu elemanlar analizden elde edilen normal gerilme dağılımı görsel olarak karşılaştırılmıştır.



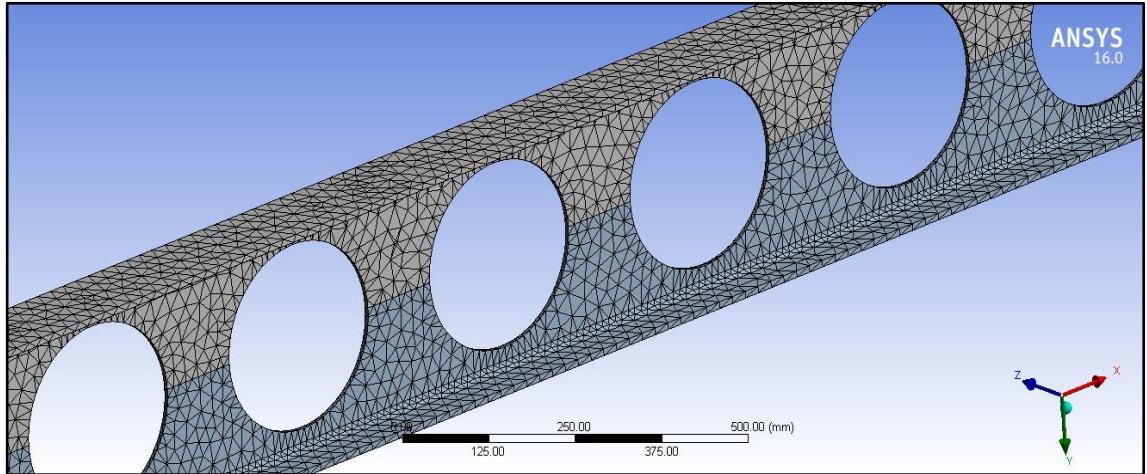
Şekil 4.130. IPE_PB_240 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.2.3. Dairesel boşluklu IPE_240 kirişi

Deneyssel çalışmada yayılı yük altında elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 124,53 kN kirişin üst başlığının orta bölgesine yayılı olarak uygulanmıştır. Kuvvet deneyssel çalışmada yük hücresinin altına yerleştirilen 153 cm uzunluğundaki ara kiriş ile dairessel boşluklu kirişe aktarılmış olup ansys modelinde de ara kirişin dairessel boşluklu kirişe temas ettiği yüzey alanı kadar alan birebir olacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 4.131). Tetrahedrons metodu ile kirişin parçalara bölünmüş hali (maksimum 25 mm) Şekil 4.132’de verilmiştir.

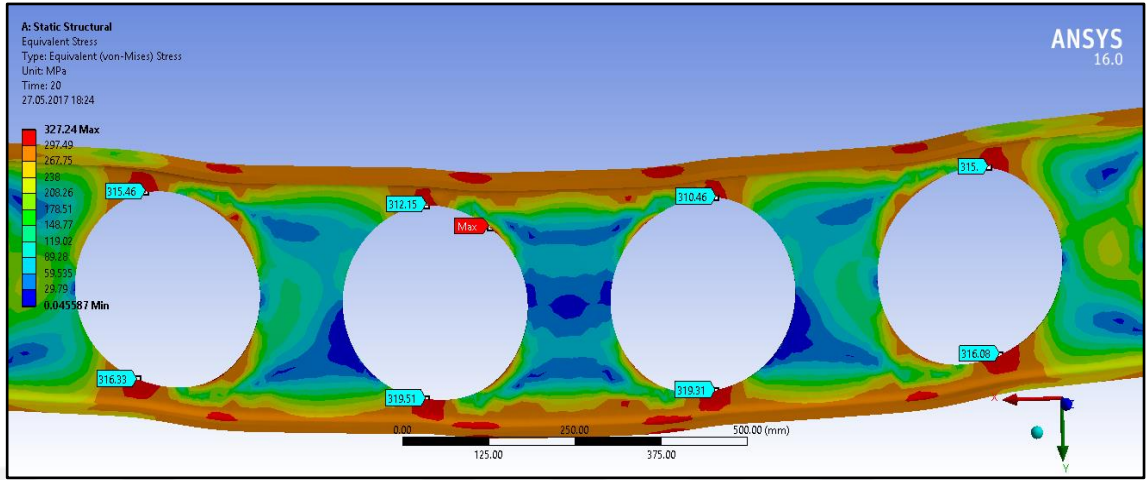


Şekil 4.131. Dairesel boşluklu kiriş sonlu elemanlar analizi; yayılı yükleme durumu

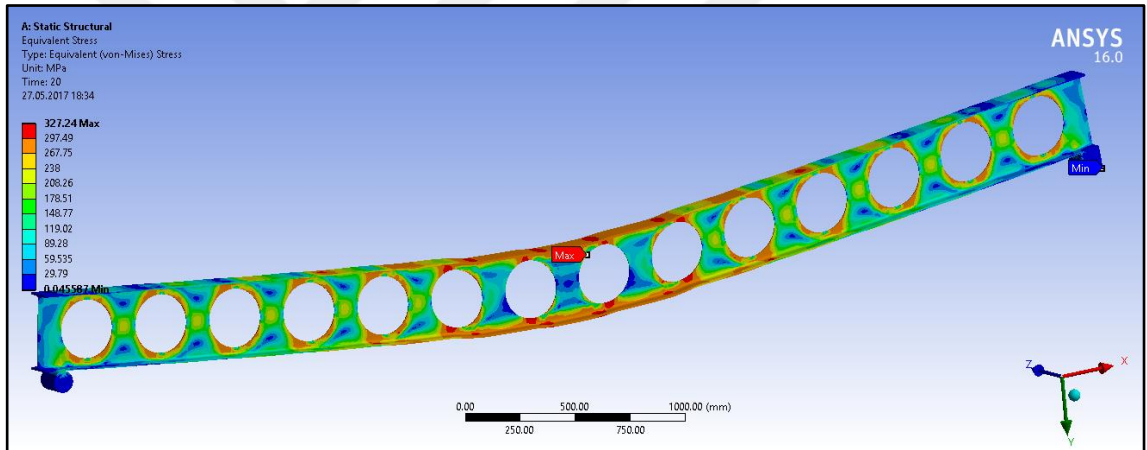


Şekil 4.132. Dairesel boşluklu IPE_240 kirişinin ağırlara ayrılması

Deneyisel çalışmadan elde edilen 124,53 kN ortalama göçme yükü kirişe etki ettirildiği zaman maksimum eşdeğer gerilme 327,24 MPa'dır (Şekil 4.133, Şekil 4.134).

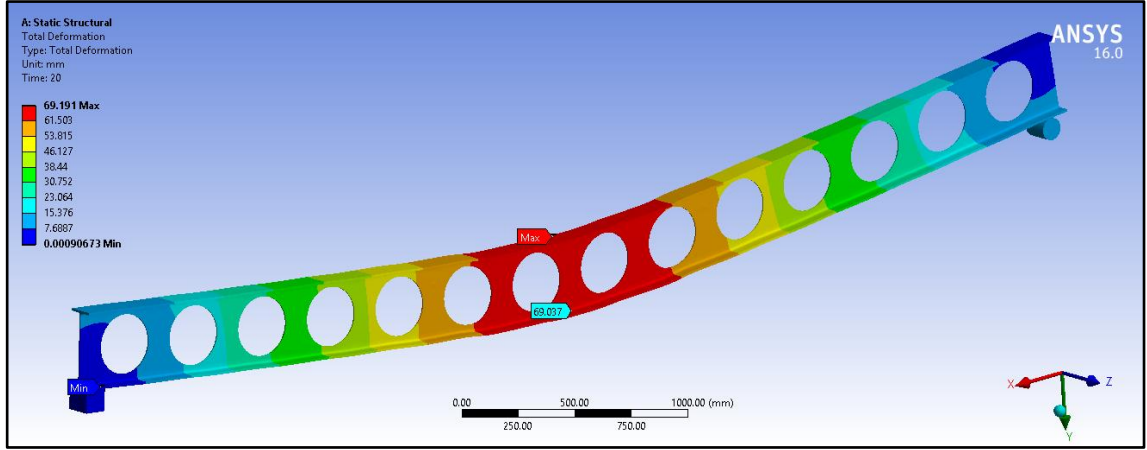


Şekil 4.133. IPE_DB_240 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

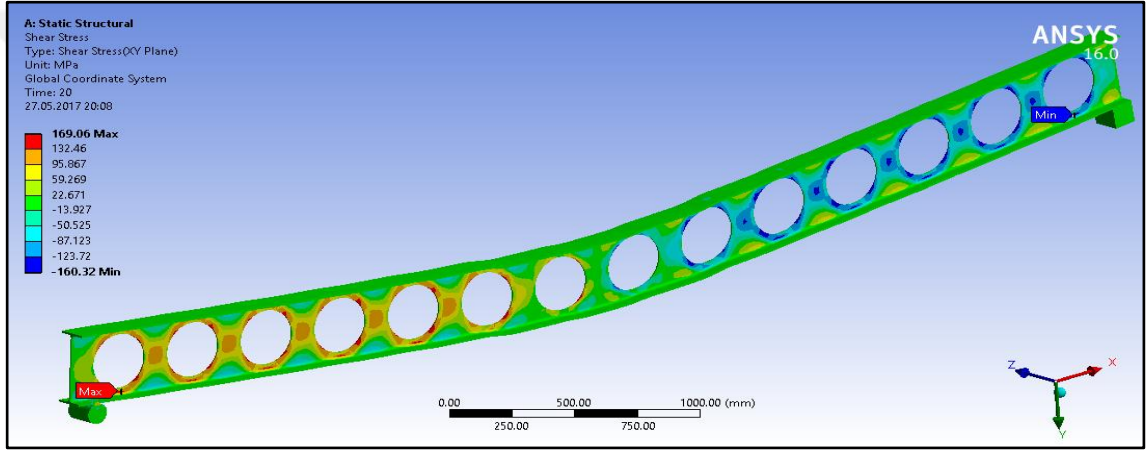


Şekil 4.134. IPE_DB_240 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

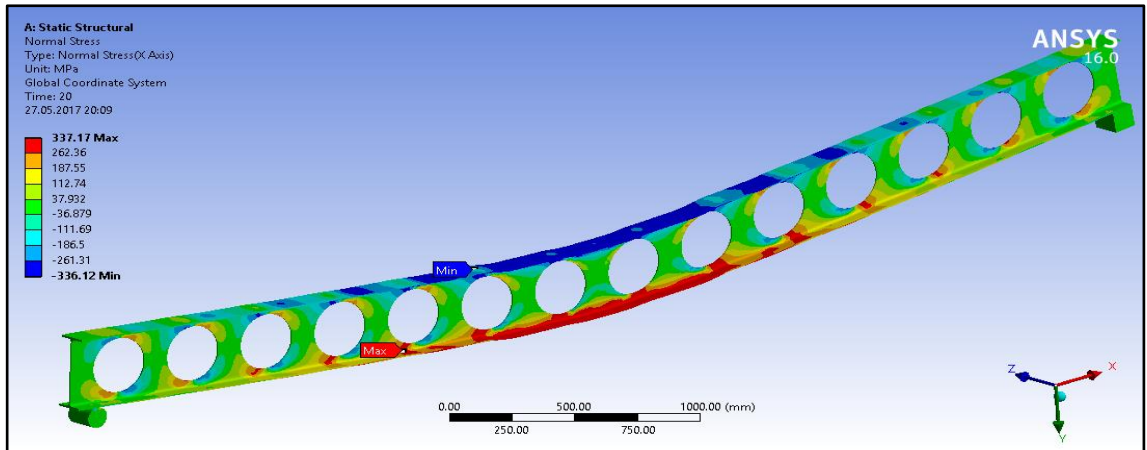
Deneyisel çalışmadan elde edilen 124,53 kN ortalama göçme yükü yayılı olarak kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman kiriş alt başlığının ortasındaki maksimum deplasman 69,04 mm olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.135). Kesme gerilmesi ve normal gerilme değerleri sırasıyla maksimum 169,06 MPa ve 337,17 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.136, Şekil 4.137).



Şekil 4.135. IPE_DB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman

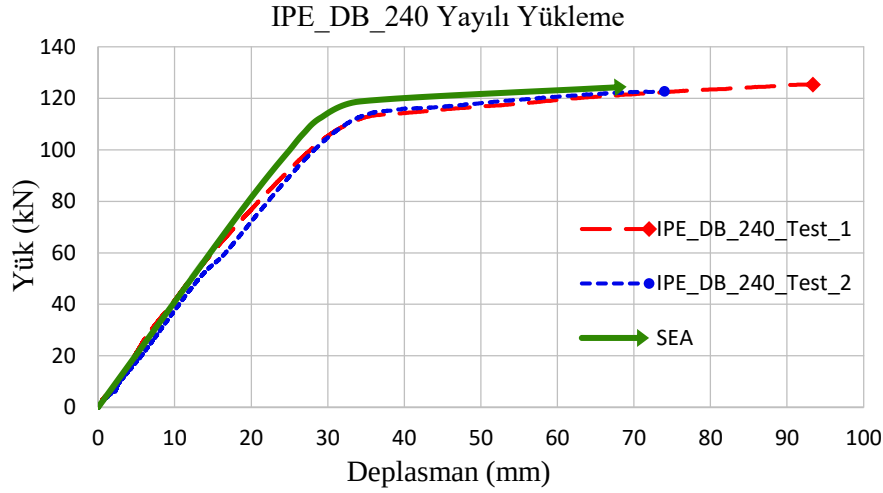


Şekil 4.136. IPE_DB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmeleri

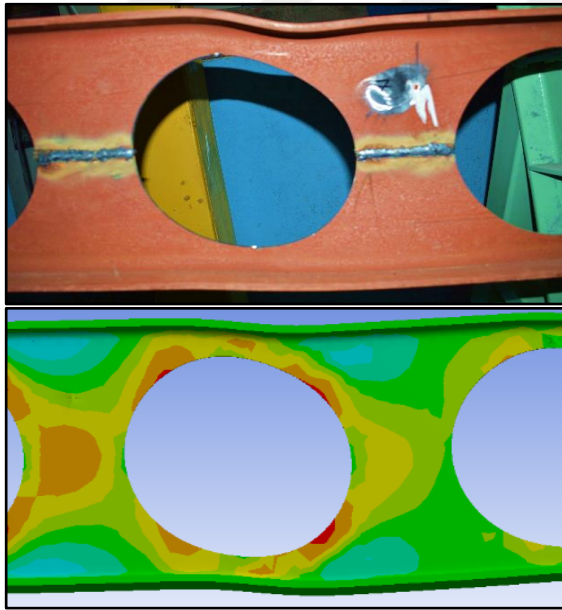


Şekil 4.137. IPE_DB_240 kirişi üzerindeki yayılı yük altında normal gerilmeler

IPE_DB_240 kirişi üzerine yayılı yük uygulandığı zaman kiriş orta bölgesi alt başlığında deneylerden elde edilen göçme yüküne karşı gelen deplasmanlar IPE_DB_240_Test_1 için; 93,38 mm ve IPE_DB_240_Test_2 için; 74 mm olarak ölçülürken SEA ile aynı bölgede 69,04 mm olarak hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri kıyaslaması Şekil 4.138’de görsel olarak ise Şekil 4.139’da verilmiştir.



Şekil 4.138. IPE_DB_240 kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri



Şekil 4.139. IPE_DB_240 kirişleri deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.2.4. IPE_240 kirişlerinin karşılaştırılması

GYA IPE_240 kirişlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi sonucunda elde edilen gerilme ve deplasmanlar veriler Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4.13. IPE_240 kirişleri sonlu elemanlar analizi sonuçları

SEA	Yükleme Tipi	Yük (kN)	Maksimum Düşey Deplasman (mm) (alt başlık)	Maksimum Eşdeğer Gerilme (MPa)	Maksimum Kesme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Normal Gerilme (MPa)
SB_240	Yayılı	132,80	79,83	359,7	175,78	374,07
PB_240	Yayılı	126,18	71,78	335,47	148,88	339,71
DB_240	Yayılı	124,53	69,04	327,24	169,06	337,17

Çizelge 4.14'te deneysel çalışmadan elde edilen maksimum göçme yüküne karşılık gelen deplasmanlar ve SEA sonucunda elde edilen deplasmanlar verilmiştir.

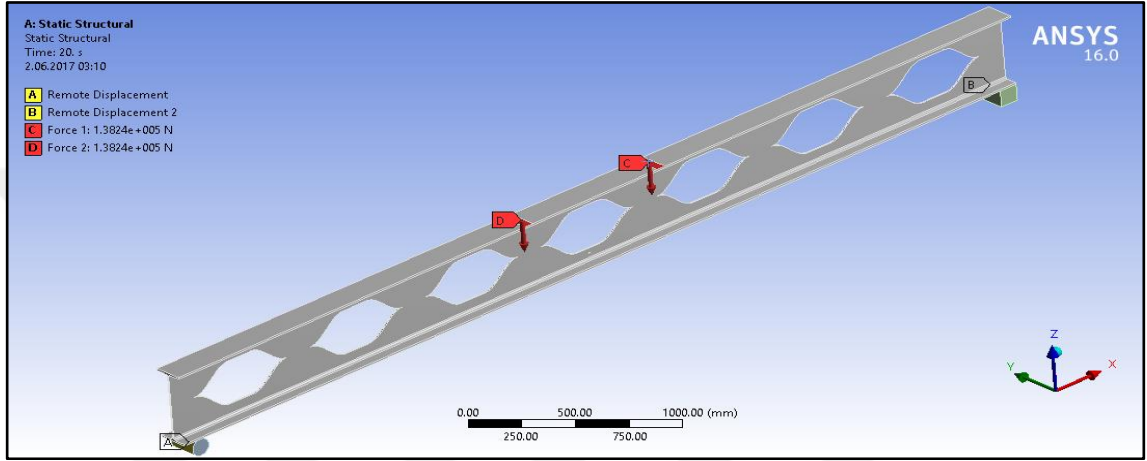
Çizelge 4.14. IPE_240 kirişleri deneysel ve SEA verileri karşılaştırılması

TEST	Yükleme Tipi	(Deneysel) Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	(Deneysel) Ort. Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	(SEA) Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	Hata Payı (%)
SB_240 Test_1	Yayılı	81,43	85,8	79,83	6,96
SB_240 Test_2	Yayılı	90,17			
PB_240 Test_1	Yayılı	74,95	75,58	71,78	5,02
PB_240 Test_2	Yayılı	76,21			
DB_240 Test_1	Yayılı	93,38	83,69	69,04	5,90 (Test_2)
DB_240 Test_2	Yayılı	74			

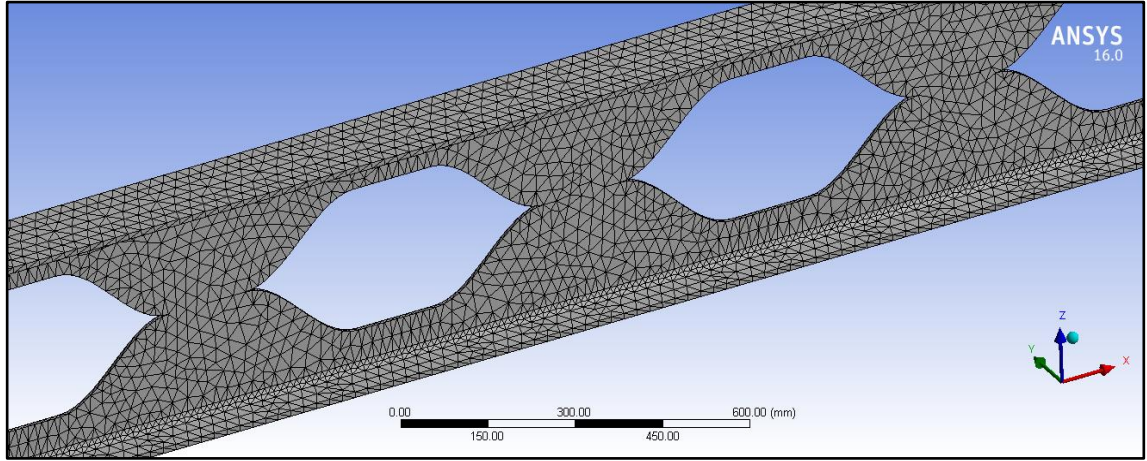
4.4.3. IPE 300 profilleri SEA (iki noktadan yükleme)

4.4.3.1. Sinüsoidal boşluklu IPE_300 kirişi

Deneyisel çalışmada iki noktadan yükleme altında elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 276,47 kN kuvvet Şekil 4.140'ta gösterildiği gibi uygulanmıştır. Kuvvet yük hücresinin altına yerleştirilen ara kiriş yardımıyla ana kirişe aktarılmış olup ansys modelinde de 10x15 cm ebatlarında tanımlanan yüzeye 20 adımda etki ettirilmiştir. Tetrahedrons metodu ile kirişin parçalara bölünmüş hali (maksimum 25 mm) Şekil 4.141'de verilmiştir.

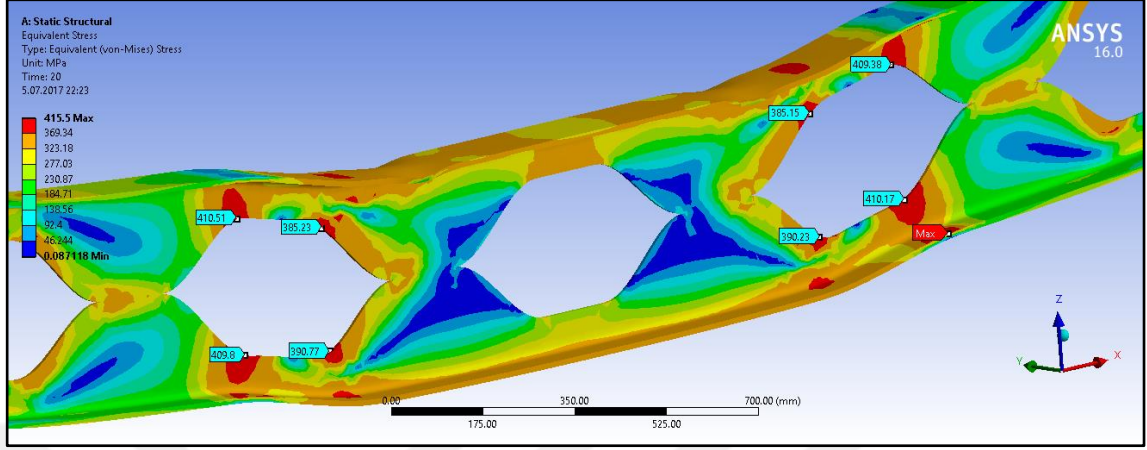


Şekil 4.140. Sinüsoidal boşluklu kiriş SEA; iki noktadan yükleme durumu

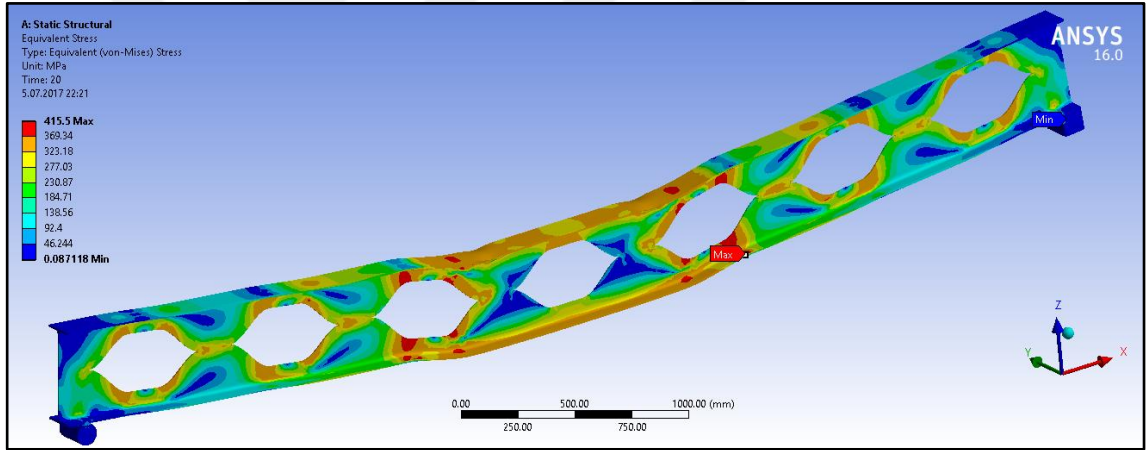


Şekil 4.141. Sinüsoidal boşluklu IPE_300 kirişinin ağırlara ayrılması

Deneyisel çalışmadan elde edilen 276,47 kN ortalama göçme yükü kirişe etki ettirildiği zaman maksimum eşdeğer gerilme 415,5 MPa olarak meydana gelmiştir. Şekil 4.142 ve Şekil 4.143'te kiriş üzerindeki gerilme dağılımları gösterilmiştir.

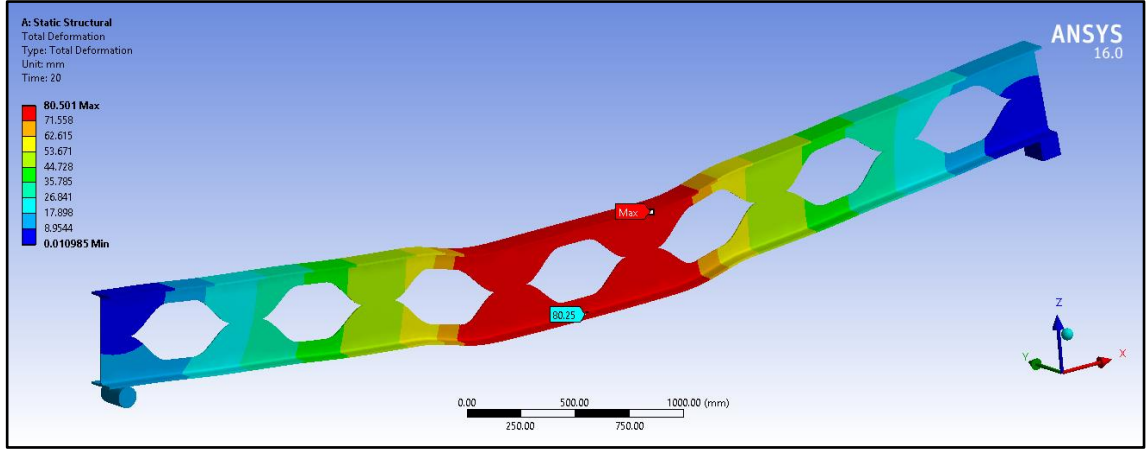


Şekil 4.142. IPE_SB_300 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

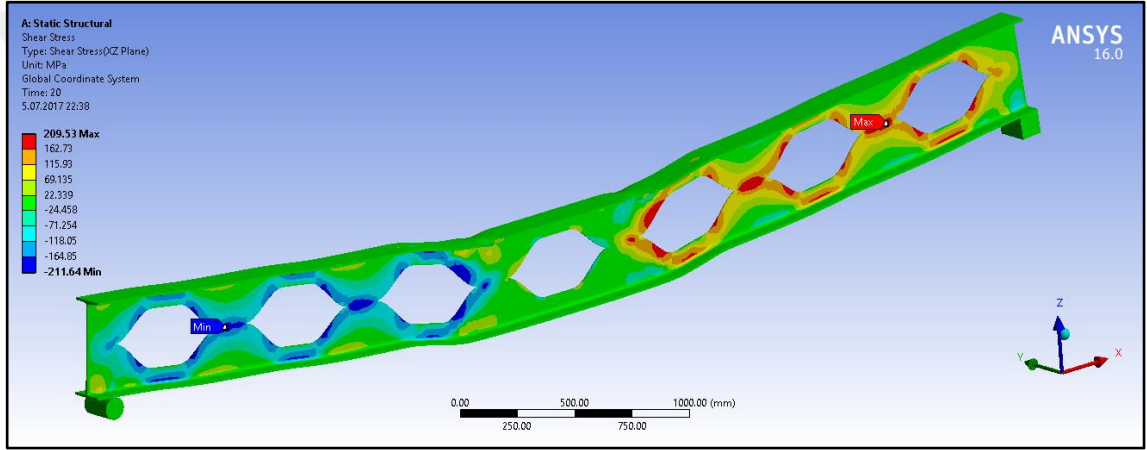


Şekil 4.143. IPE_SB_300 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

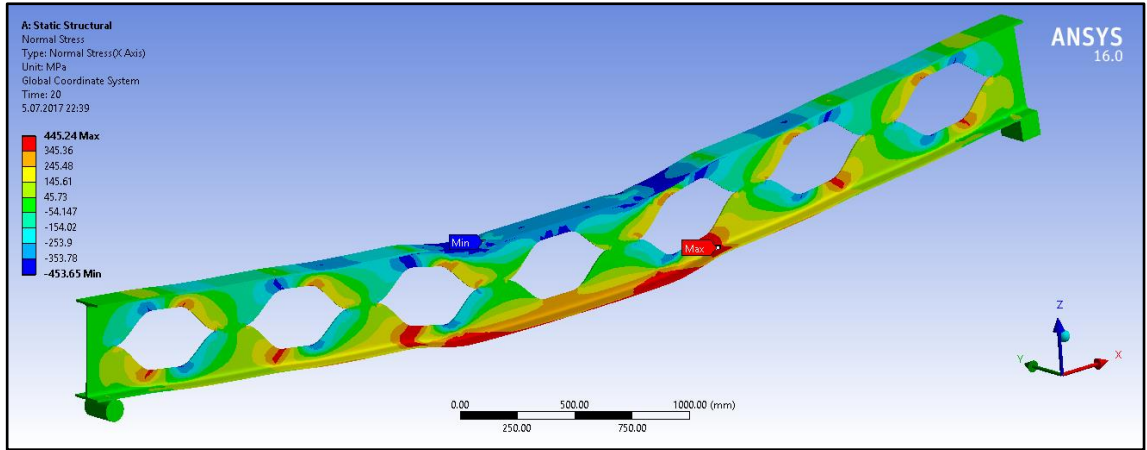
Deneyisel çalışmadan elde edilen 276,47 kN ortalama göçme yükü kirişe iki noktadan etki ettirildiği zaman kirişin alt başlığının ortasındaki deplasman 80,25 mm olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.144). Kesme gerilmesi ve normal gerilme değerleri ise sırasıyla maksimum 211,64 MPa ve 453,65 MPa'dır (Şekil 4.145, Şekil 4.146).



Şekil 4.144. IPE_SB_300 kirişi maksimum deplasman

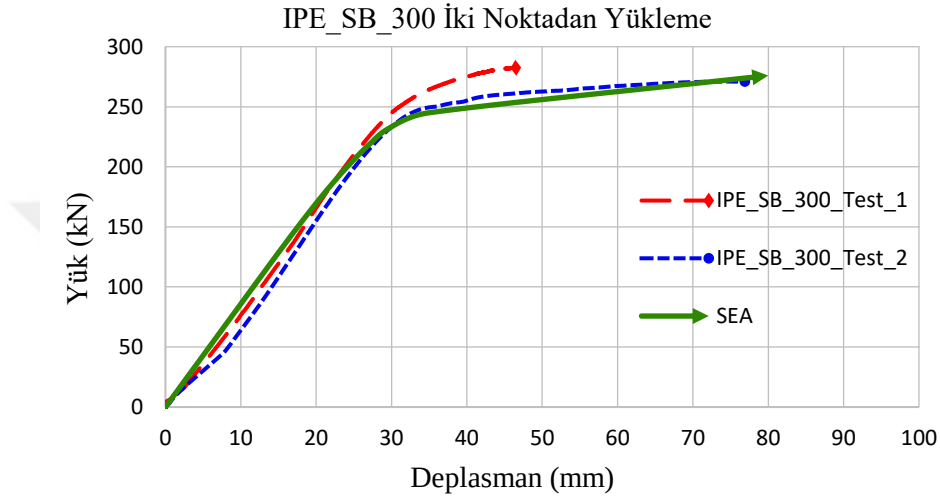


Şekil 4.145. IPE_SB_300 kirişi üzerindeki kesme gerilmeleri.

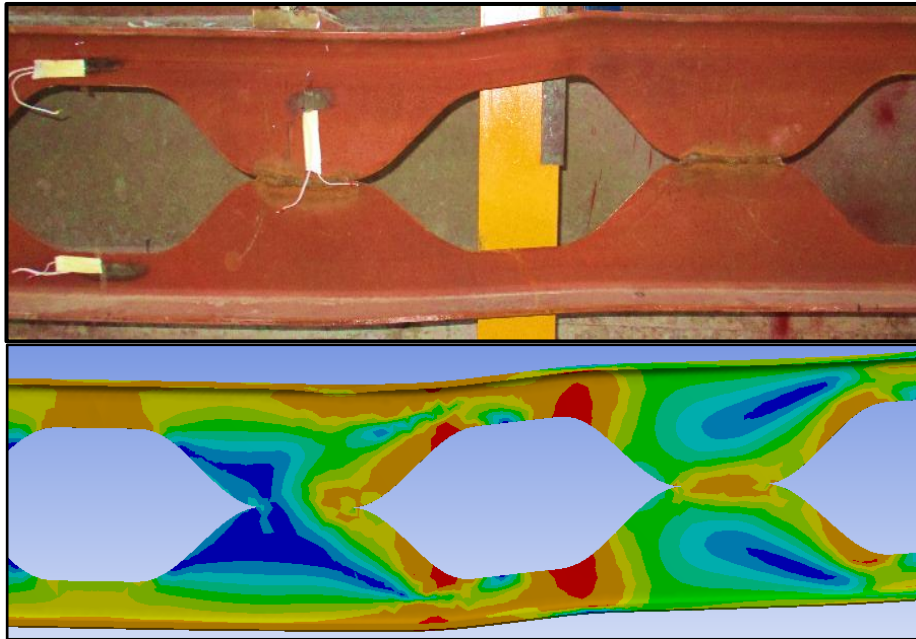


Şekil 4.146. IPE_SB_300 kirişi üzerindeki normal gerilmeler

Deneyisel çalışmadan elde edilen veriler ile ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen veriler kıyaslanmıştır. IPE_SB_300 kirişi üzerine iki noktadan uygulandığı zaman kiriş orta bölgesi alt başlığında deneyisel çalışmadan elde edilen göçme yüküne karşı gelen deplasmanlar IPE_SB_300_Test_1 için; 46,50 mm ve IPE_DB_200_Test_2 için; 76,90 mm olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi aynı yükü 20 adımda uygulandığında kiriş orta bölgesi alt başlığında 80,25 mm olarak hesaplamıştır. Deneylerden elde edilen yük- deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri kıyaslaması Şekil 4.147’de görsel olarak ise Şekil 4.148’de verilmiştir.



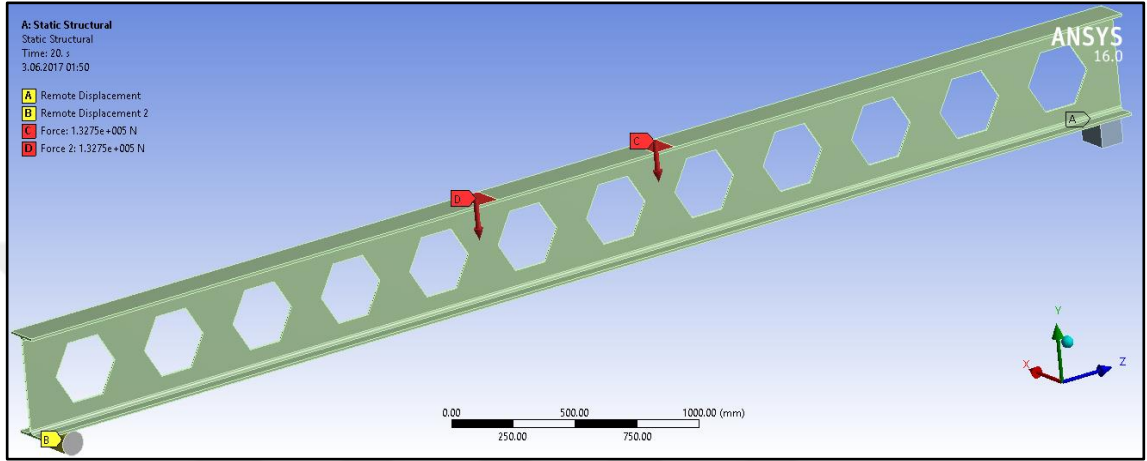
Şekil 4.147. IPE_SB_300 kirişleri SEA ve deneyisel yük-deplasman grafikleri



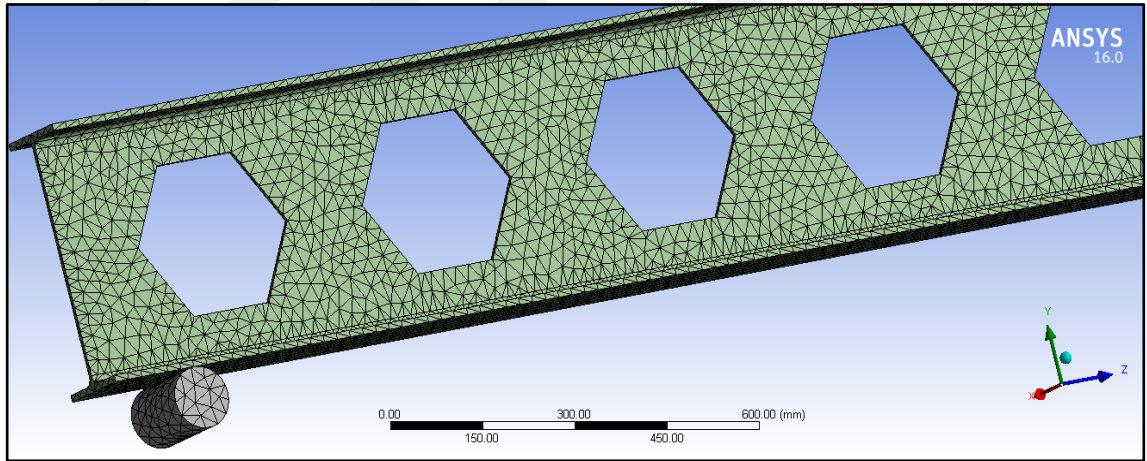
Şekil 4.148. IPE_SB_300 kirişleri deneyisel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.3.2. Petek boşluklu IPE_300 kirişi

Deneyisel çalışmada iki noktadan yükleme altında elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 265,49 kN kuvvet Şekil 4.149'da gösterildiği gibi kirişin gövdelerin merkezine gelecek şekilde uygulanmıştır. Deneyisel çalışmada kuvvet yük hücresinin altına yerleştirilen ara kiriş yardımıyla ana kirişe aktarılmış olup ansys modelinde de 10x15 cm ebatlarında tanımlanan yüzeye 20 adımda etki ettirilmiştir. Tetrahedrons metodu ile kirişin parçalara bölünmüş hali Şekil 4.2150'de verilmiştir.

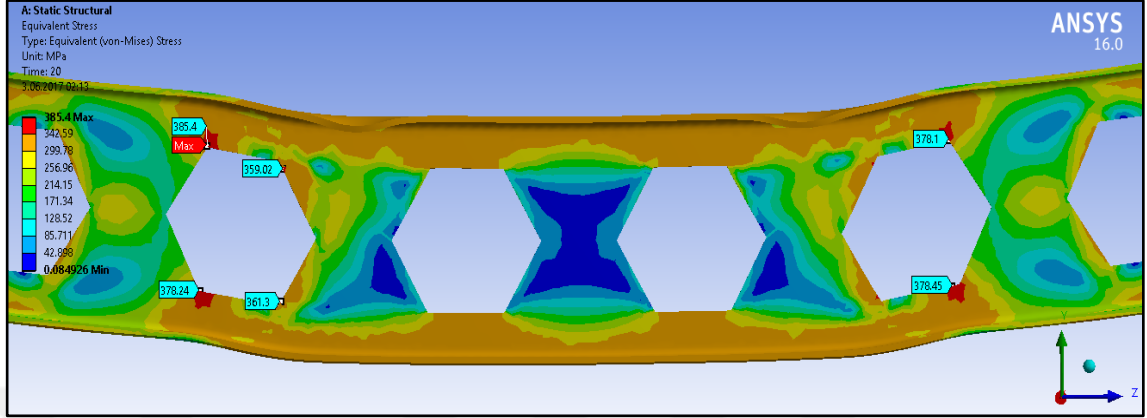


Şekil 4.149. Petek boşluklu kiriş SEA; iki noktadan yükleme durumu

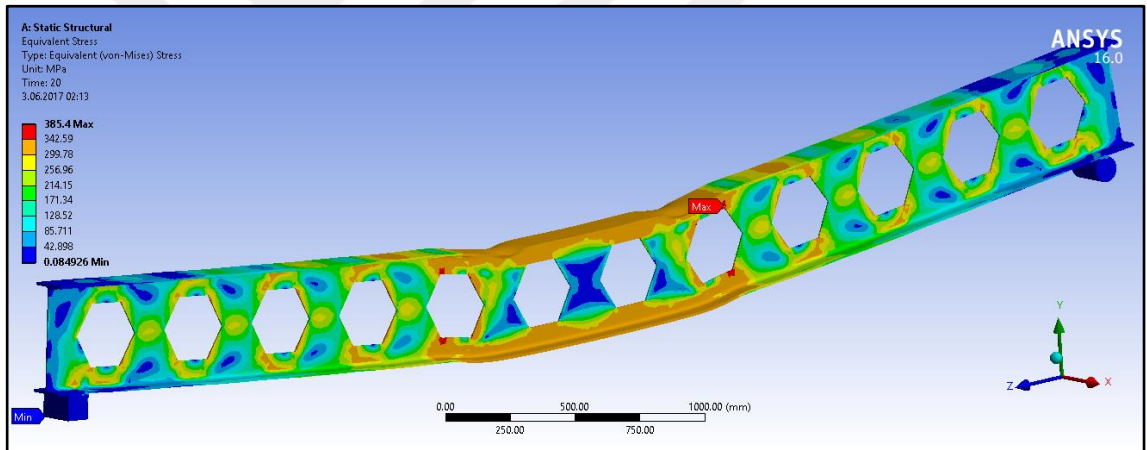


Şekil 4.150. Petek boşluklu IPE_300 kirişinin ağırlara ayrılması

Deneysel çalışmadan elde edilen 265,49 kN ortalama göçme yükü kirişe iki noktadan etki ettirildiği zaman eşdeğer gerilme dağılımları Şekil 4.151 ve Şekil 4.152’de gösterilmiştir. Maksimum eşdeğer gerilme 385,4 MPa olarak boşluk köşesinde meydana gelmiştir.

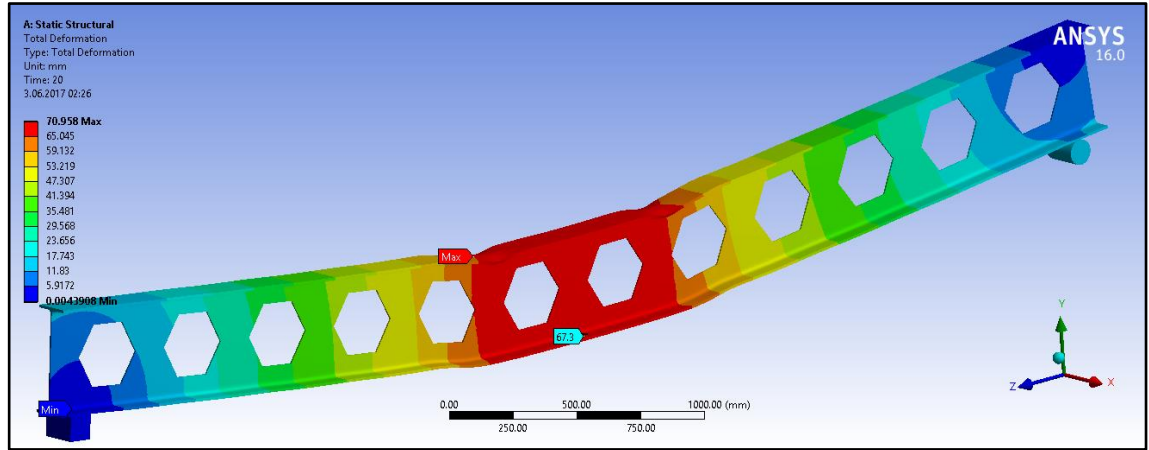


Şekil 4.151. IPE_PB_300 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

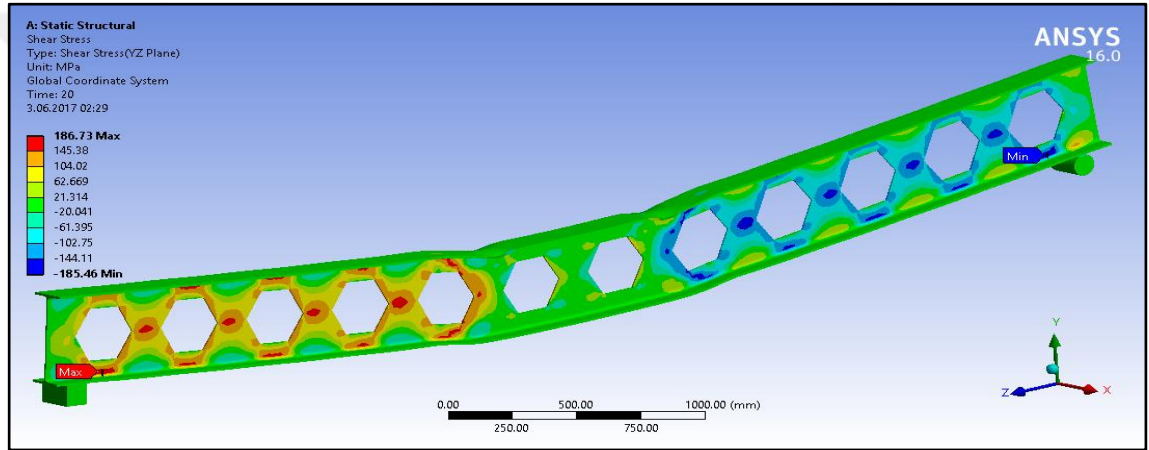


Şekil 4.152. IPE_PB_300 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

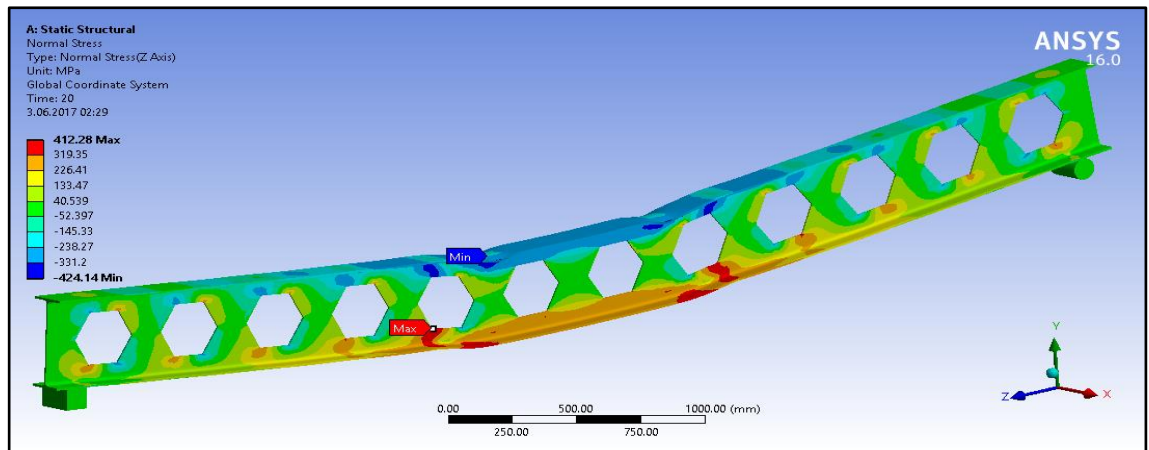
Deneysel çalışmadan elde edilen 265,49 kN göçme yükü iki noktadan kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman kirişin alt başlığının ortasındaki maksimum deplasman 67,30 mm olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.153). Kesme gerilmesi ve normal gerilmeler ise sırasıyla maksimum 186,73 MPa ve 424,14 MPa’dır (Şekil 4.154 ve Şekil 4.155).



Şekil 4.153. IPE_PB_300 kirişi maksimum deplasman

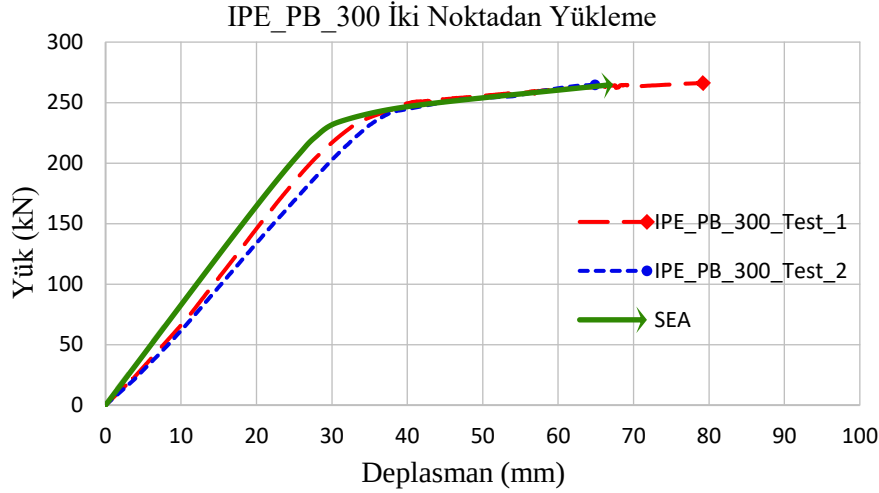


Şekil 4.154. IPE_PB_300 kirişi üzerindeki kesme gerilmeleri.

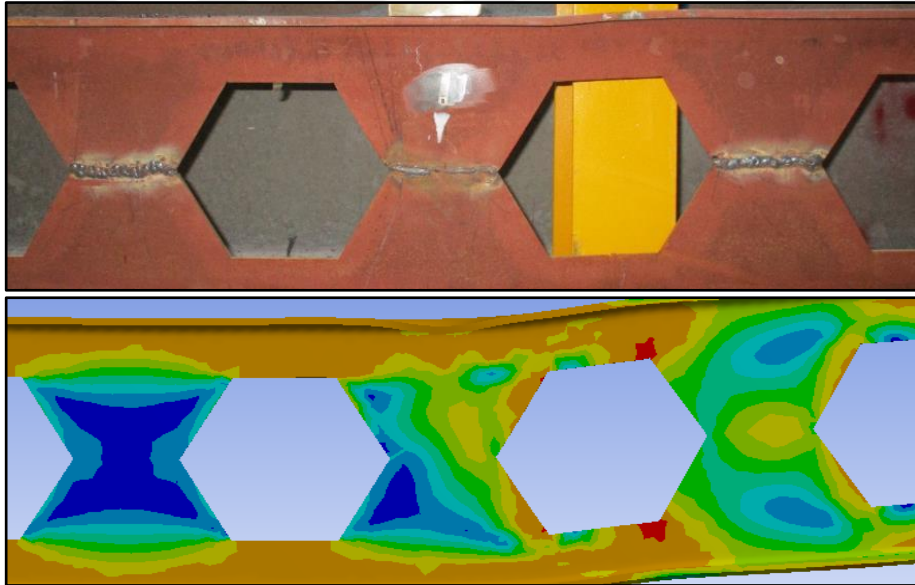


Şekil 4.155. IPE_PB_300 kirişi üzerindeki normal gerilmeler

Deneyisel çalışmadan elde edilen veriler ile ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen veriler kıyaslanmıştır. IPE_PB_300 kirişi üzerine kuvvet iki noktadan uygulandığı zaman deneyisel çalışmadan elde edilen göçme yüküne karşı gelen deplasmanlar IPE_SB_300_Test_1 için; 79,20 mm ve IPE_DB_200_Test_2 için; 64,88 mm olarak ölçülürken SEA ile aynı yükü 20 adımda uygulandığında kiriş orta bölgesi alt başlığında 67,30 mm olarak hesaplamıştır. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri kıyaslaması Şekil 4.156'da görsel olarak ise Şekil 4.157'de verilmiştir.



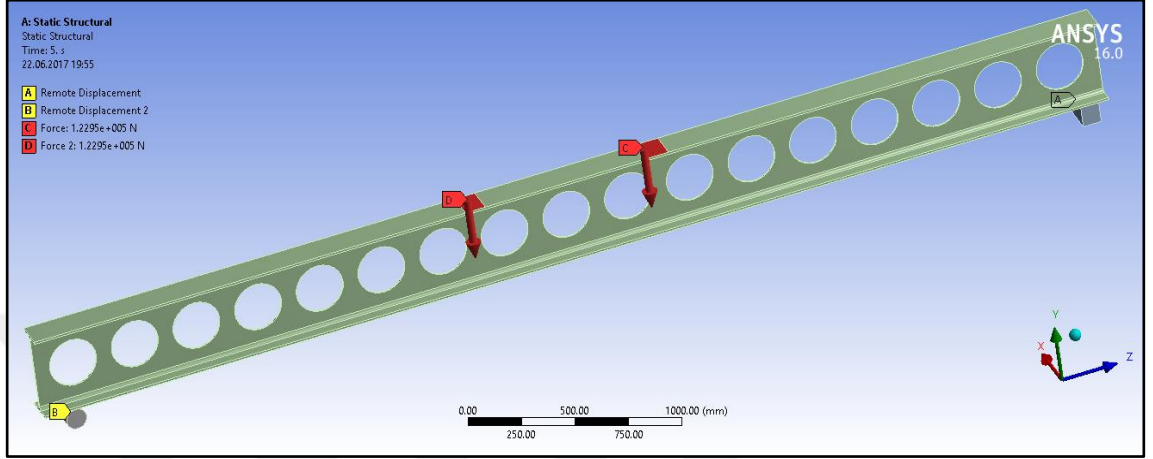
Şekil 4.156. IPE_PB_300 kirişleri SEA ve deneyisel yük-deplasman grafikleri



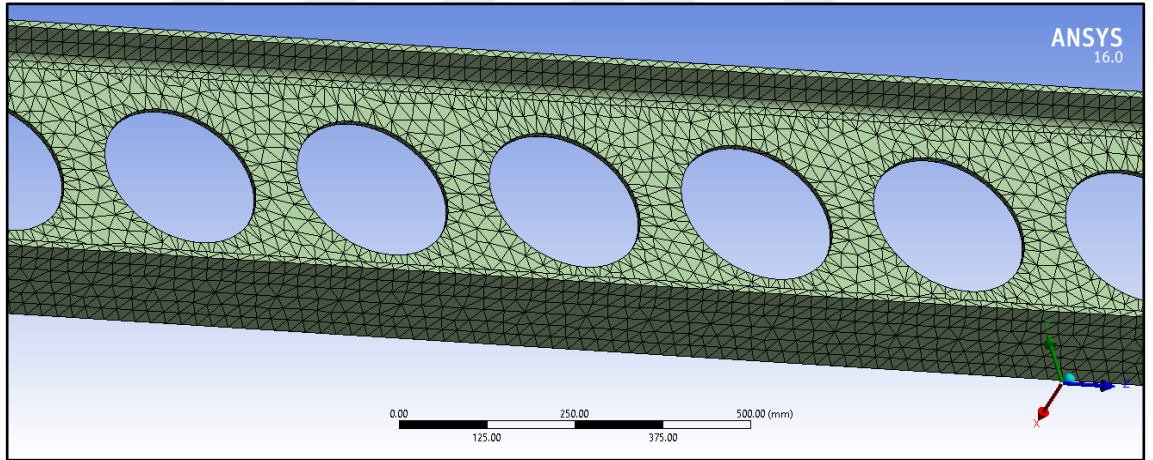
Şekil 4.157. IPE_PB_300 kirişleri deneyisel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.3.3. Dairesel boşluklu IPE_300 kirişi

Deneyisel çalışmada iki noktadan yükleme altında elde edilen göçme yüklerinin ortalaması olan 245,89 kN Şekil 4.158’de gösterildiği gibi uygulanmıştır. Kuvvet yük hücresinin altına yerleştirilen ara kiriş yardımıyla ana kirişe aktarılmış olup ansys modelinde de 10x15 cm ebatlarında tanımlanan yüzeye 20 adımda etki ettirilmiştir.

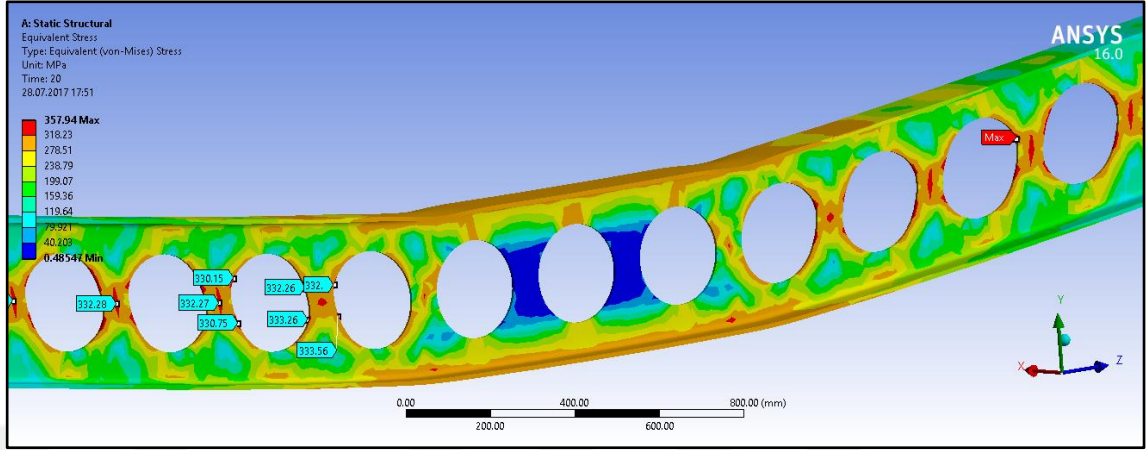


Şekil 4.158. Dairesel boşluklu kiriş SEA; iki noktadan yükleme durumu

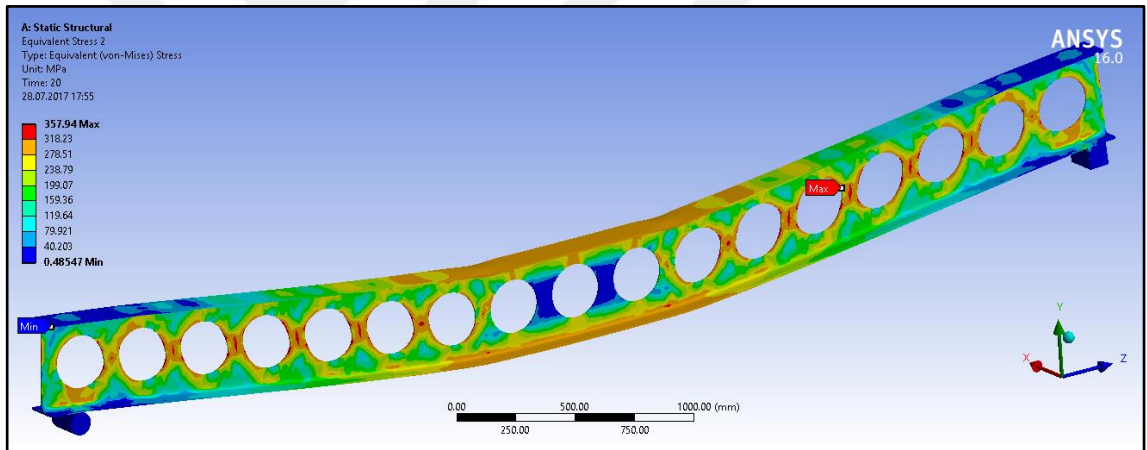


Şekil 4.159. Dairesel boşluklu IPE_300 kirişinin ağırlara ayrılması

Deneysel çalışmadan elde edilen 245,89 kN ortalama göçme yükü kirişe etki ettirildiği zaman maksimum eşdeğer gerilme 357,94 MPa olarak meydana gelmiştir. Eşdeğer gerilme dağılımları Şekil 4.160 ve Şekil 4.161’de gösterilmiştir.

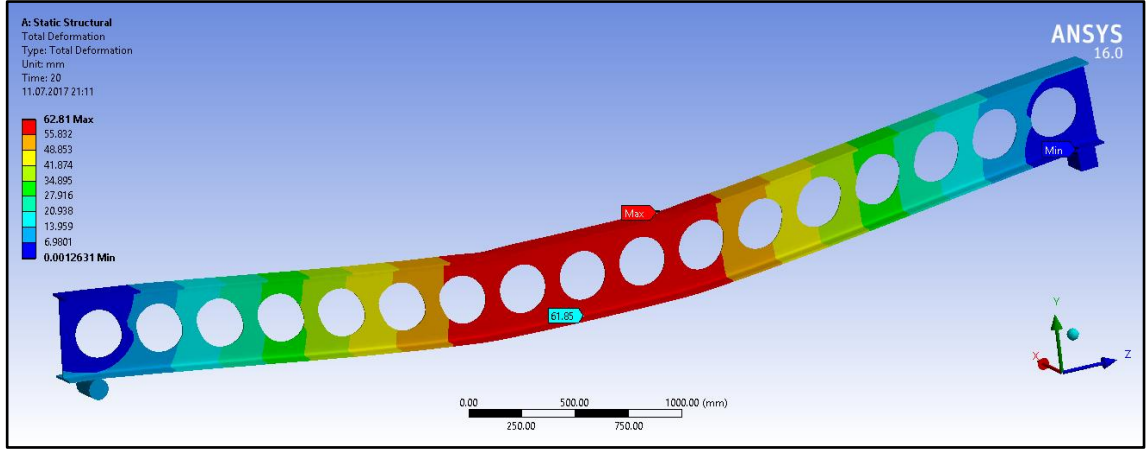


Şekil 4.160. IPE_DB_300 kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

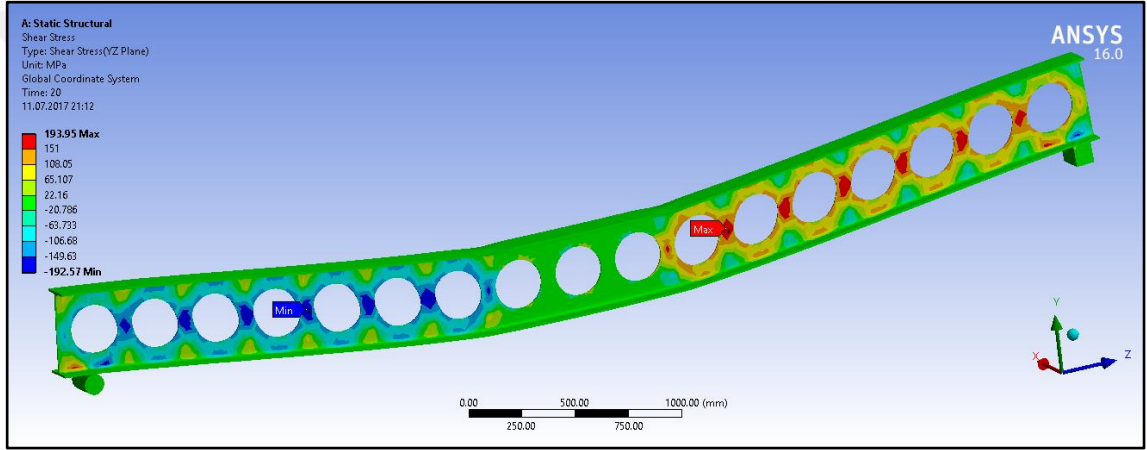


Şekil 4.161. IPE_DB_300 kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı

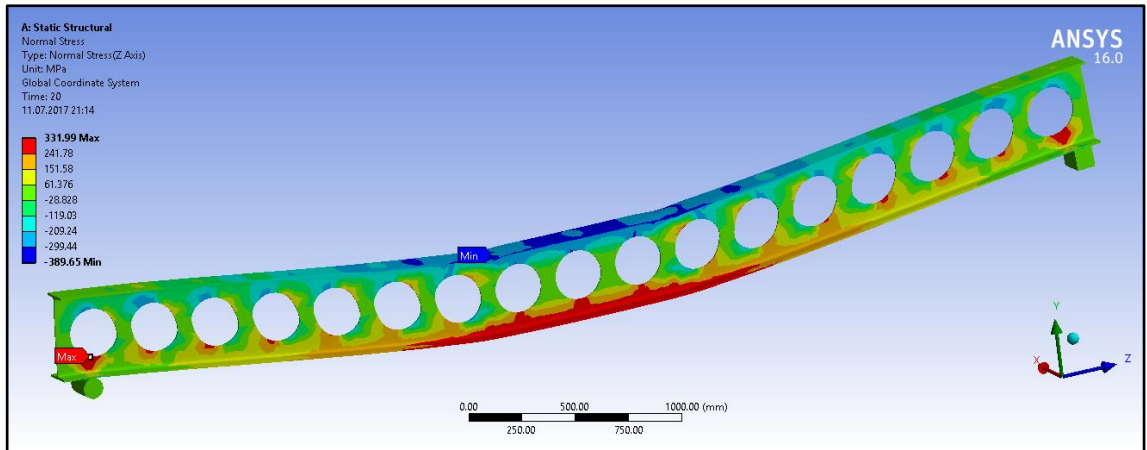
245,89 kN ortalama göçme yükü kirişe iki noktadan etki ettirildiği zaman kirişin alt başlığının ortasındaki deplasman 61,85 mm olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.162). Kesme gerilmesi ve normal gerilme değerleri ise sırasıyla maksimum 193,95 MPa ve 389,65 MPa’dır (Şekil 4.163, Şekil 4.164).



Şekil 4.162. IPE_DB_300 kirişi maksimum deplasman

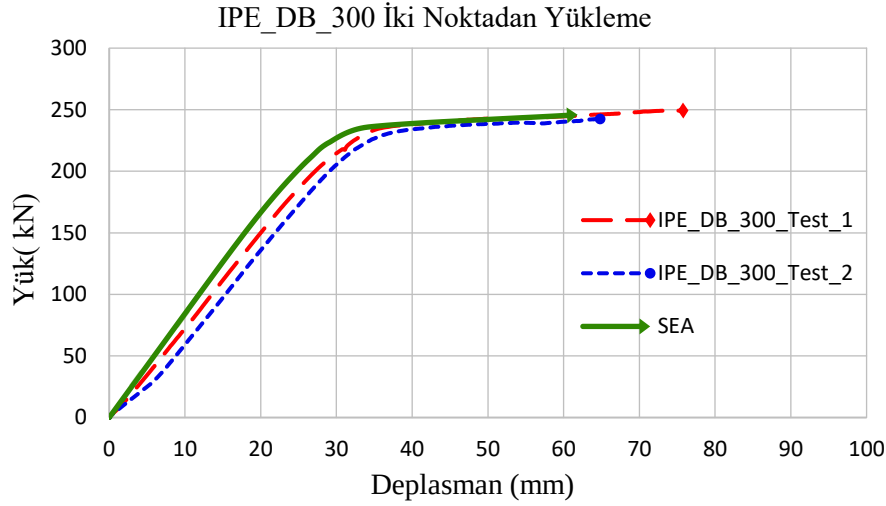


Şekil 4.163. IPE_DB_300 kirişi üzerindeki kesme gerilmeleri.

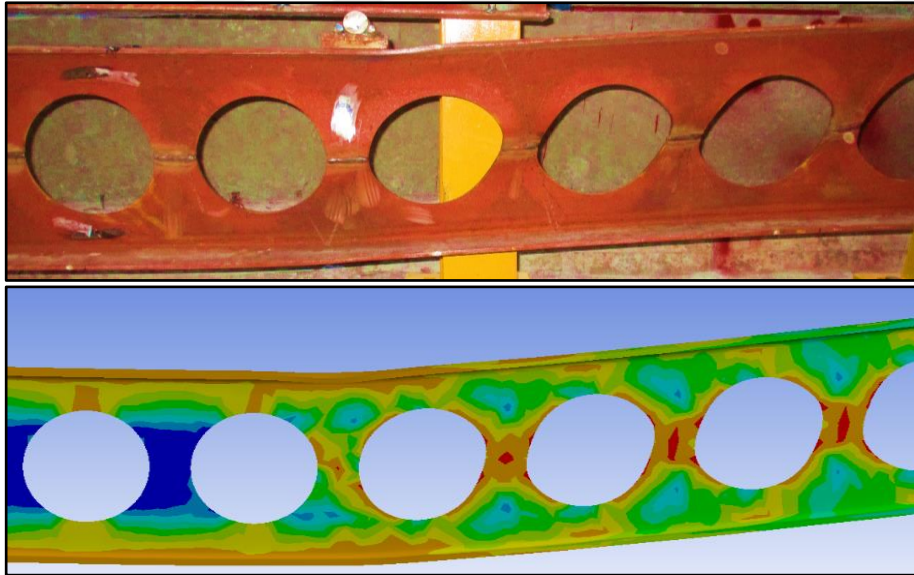


Şekil 4.164. IPE_DB_300 kirişi üzerindeki normal gerilmeler

Deneyisel çalışmadan elde edilen veriler ile ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen veriler kıyaslanmıştır. IPE_DB_300 kirişi üzerine iki noktadan yük uygulandığı zaman kiriş orta bölgesi alt başlığında deneyisel çalışmadan elde edilen göçme yüküne karşı gelen deplasmanlar IPE_DB_300_Test_1 için; 75,78 mm ve IPE_DB_200_Test_2 için; 64,82 mm olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi ile aynı yük uygulandığında kiriş orta bölgesi alt başlığında 61,85 mm hesaplamıştır. Deneylerden elde edilen yük- deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri kıyaslaması Şekil 4.165'te görsel olarak ise Şekil 4.166'da verilmiştir.



Şekil 4.165. IPE_DB_300 kirişleri SEA ve deneyisel yük-deplasman grafikleri



Şekil 4.166. IPE_DB_300 kirişleri deneyisel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

4.4.3.4. IPE_300 kirişlerinin karşılaştırılması

GYA IPE_300 kirişlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi sonucunda elde edilen gerilme ve deplasmanlar veriler Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4.15. IPE _300 kirişleri sonlu elemanlar analizi sonuçları

SEA	Yükleme Tipi	Yük (kN)	Maksimum Düşey Deplasman (mm) (alt başlık)	Maksimum Eşdeğer Gerilme (MPa)	Maksimum Kesme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Normal Gerilme (MPa)
SB_300	İki Noktadan	276,47	80,25	415,50	211,64	453,65
PB_300	İki Noktadan	265,49	67,30	385,40	186,73	424,14
DB_300	İki Noktadan	245,89	61,94	357,95	193,99	389,15

Çizelge 4.16'da deneysel çalışmadan elde edilen maksimum göçme yüküne karşılık gelen deplasmanlar ve SEA sonucunda elde edilen deplasmanlar verilmiştir.

Çizelge 4.16. IPE _300 kirişleri deneysel ve SEA verileri karşılaştırılması

TEST	Yükleme Tipi	(Deneysel) Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	(Deneysel) Ort. Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	(SEA) Düşey Deplasman (alt başlık) (mm)	Hata Payı (%)
SB_300 Test_1	İki Noktadan	46,50	61,7	80,25	4,35 (Test_2)
SB_300 Test_2	İki Noktadan	76,90			
PB_300 Test_1	İki Noktadan	79,20	72	67,3	6,6
PB_300 Test_2	İki Noktadan	64,88			
DB_300 Test_1	İki Noktadan	75,78	70,3	61,85	12
DB_300 Test_2	İki Noktadan	64,82			

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında, farklı geometrik yapılara sahip GYA çelik kirişlerin yapı optimizasyonu yöntemleri ile en ekonomik olarak tasarlanabilmeleri, bu kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve bunun sonucu olarak da ülkemizdeki mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, petek, dairesel ve sinüs eğrisi şeklinde boşluklara sahip gövde açıklıklı çelik kirişlerin optimum boyutlandırma problemleri formüle edilerek elde edilen ayırık değişkenli optimizasyon probleminin çözümü, geliştirilmiş olan harmoni arama ve parçacık sürü meta bulgusal optimizasyon teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu kirişlerin optimum tasarımları kapsamında, IPE profil kesitleri, kiriş geometrisi ve boşluklar arası mesafe ile ilgili detaylar tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Harmoni arama algoritması kullanılarak minimum ağırlık ile maksimum yük taşıyacak olan optimum boyutlara daha hızlı ve etkili şekilde ulaşılmıştır. Bu sistemlerin tasarım kriterleri için BS (British Standart) şartnamesinde öngörülen hükümler esas alınmıştır.

Çalışmanın ikinci aşaması olan deneysel süreçte; ilk kısımda optimizasyonu yapılan çelik IPE_200, IPE_240 ve IPE_300 GYA kirişlerin yükleme çerçevesinde 1000 kN kapasiteye sahip hidrolik piston ile tekil, yayılı ve iki noktadan yük uygulanarak yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. GYA kirişlerde gövdesi boyunca kesilip elde edilen alt ve üst parçalarının kaydırılarak kaynakla yeniden birleştirilmesi sonucunda kirişin yüksekliği buna bağlı olarak da kesit katsayısı ve atalet momenti artmasına karşın kirişin ilk haline oranla yanal burkulma riski daha fazla olur. Bu durumdan dolayı IPE_200, IPE_240 ve IPE_300 GYA çelik kirişler üzerinde yapılan deneylerde yanal burkulmayı önlemek amacıyla belirli aralıklarla yanal destek payandaları yerleştirilerek kiriş dayanımları hesaplanmıştır. Gövde boşluklu kirişler özellikle tekil ve iki noktadan yüke maruz kaldıklarında I-kesitli profilin gövde kısmının kesmedeki zayıflığı verimliliklerini azaltır. Çalışmada boşluk çevrelerinin yerel burkulma ve moment-kesme aktarımı değerlendirmelerine bağlı olarak optimizasyonu yapılan kirişlerin boşluk tiplerinin yük taşıma kapasitelerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca, üretilen bu optimum boyutlandırılmış çelik kirişlerin göçme modları incelenmiştir.

Farklı boşluk geometrik yapılarına sahip IPE_200 eleman bazlı GYA kirişler üzerinde yapılan testlerde ortalama dayanım tekil yük altında dairesel boşluk olduğu zaman 63,83 kN, petek boşluk olduğu zaman 65,29 kN ve sinüsoidal boşluk olduğu zaman 74,32 kN olarak yapılan testlerde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar sinüsoidal boşluğa sahip çelik kirişin dairesel boşluklu kirişe oranla %16,4 ve petek boşluklu kirişe oranla %13,8 daha fazla dayanımlı olduğunu göstermektedir. IPE_240 tabanlı kirişler üzerinde yapılan testlerde ise ortalama dayanım düzgün yayılı yük altında dairesel boşluk olduğu zaman 124,53 kN, petek boşluk olduğu zaman %1,3 dayanım artışıyla 126,18 ve sinüsoidal boşluk olduğu zaman ise %6,6 dayanım artışıyla 132,80 kN olarak yapılan testlerde gözlemlenmiştir. Son aşamada, IPE_300 tabanlı kiriş testlerinde ise ortalama dayanım iki noktadan yük altında dairesel boşluk olduğu zaman en düşük dayanıma sahip olarak 245,89 kN, petek boşluk dairesel boşluğa oranla %7,9 dayanım artışıyla 265,49 kN ve sinüsoidal boşluklu kiriş ise dairesel boşluğa oranla %12,4 dayanım artışıyla 276,47 kN olarak en yüksek kapasiteye sahip kiriş olduğu ve yük altında en iyi kiriş performansı veren gövde şekli olduğu yapılan testlerde gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.1’de deneysel verilerden, Çizelge 5.2’de sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

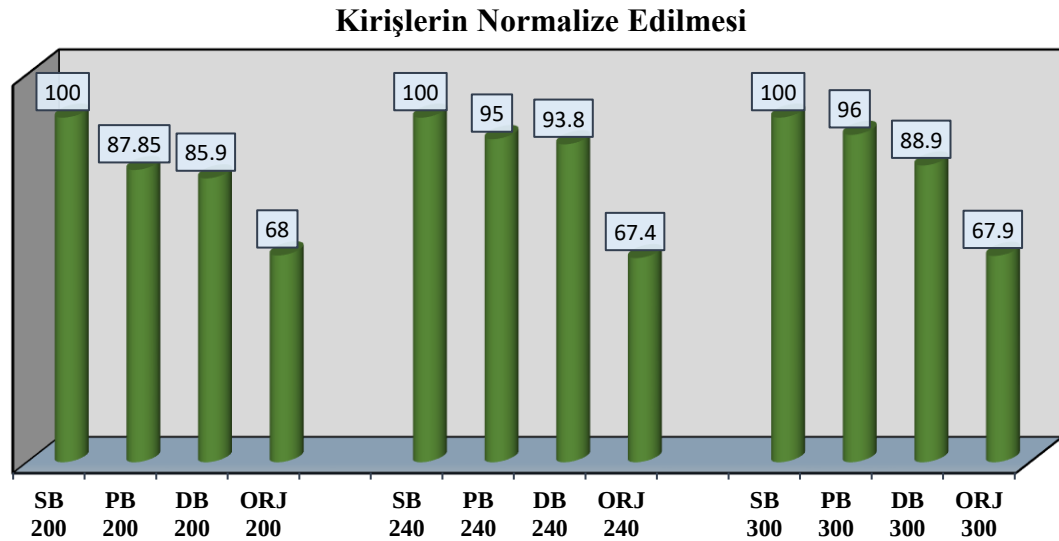
Çizelge 5.1. IPE_SB_PB_DB_200_240_300 kirişleri test sonuçları genel özeti

TEST	Yükleme Tipi	Gövde Boşluk Tipi	Göçme Yüğü(kN)	Göçme Modu	Ortalama Dayanım (kN)
SB_200 Test_1	Tek Noktadan	Sinüs	73,58	Yanal Burkulma	74,32
SB_200 Test_2	Tek Noktadan	Sinüs	75,05	Yanal Burkulma	
PB_200 Test_1	Tek Noktadan	Petek	66,09	Yanal Burkulma Yerel Burkulma	65,29
PB_200 Test_2	Tek Noktadan	Petek	64,50	Yanal Burkulma Yerel Burkulma	
DB_200 Test_1	Tek Noktadan	Dairesel	65,73	Yanal Burkulma Yerel Burkulma	63,83
DB_200 Test_2	Tek Noktadan	Dairesel	61,93	Yanal Burkulma Yerel Burkulma	
ORJ 200	Tek Noktadan	-	50,53	Basit Eğilme	50,53
SB_240 Test_1	Yayılı	Sinüs	135,25	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	132,80
SB_240 Test_2	Yayılı	Sinüs	130,34	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	
PB_240 Test_1	Yayılı	Petek	127,98	Yanal Burkulma	126,18
PB_240 Test_2	Yayılı	Petek	124,38	Yanal Burkulma	
DB_240 Test_1	Yayılı	Dairesel	126,25	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	124,53
DB_240 Test_2	Yayılı	Dairesel	122,80	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	
ORJ 240	Yayılı	-	89,48	Yanal Burkulma	89,48
SB_300 Test_1	İki Noktadan	Sinüs	282,48	İkincil Eğilme Gövde Burkulması	276,47
SB_300 Test_2	İki Noktadan	Sinüs	270,46	İkincil Eğilme Yerel Burkulma	
PB_300 Test_1	İki Noktadan	Petek	266,71	İkincil Eğilme	265,49
PB_300 Test_2	İki Noktadan	Petek	264,28	İkincil Eğilme	
DB_300 Test_1	İki Noktadan	Dairesel	249,30	Gövde Burkulması	245,89
DB_300 Test_2	İki Noktadan	Dairesel	242,46	Gövde Burkulması	
ORJ 300	İki Noktadan	-	187,77	Yanal Burkulma	187,77

Çizelge 5.2. IPE_SB_PB_DB_200_240_300 kirişleri SEA sonuçları genel özeti

SEA	Yükleme Tipi	Yük (kN)	Maksimum Düşey Deplasman (mm) (alt başlık)	Maksimum Eşdeğer Gerilme (MPa)	Maksimum Kesme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Normal Gerilme (MPa)
SB_200	Tek Noktadan	74,32	89,64	351,33	169,84	364,15
PB_200	Tek Noktadan	66,09	39,68	314,75	140,81	318,28
DB_200	Tek Noktadan	65,73	39,39	312,36	149,26	306,95
SB_240	Yayılı	132,80	79,83	359,7	175,78	374,07
PB_240	Yayılı	126,18	71,79	335,47	148,88	339,71
DB_240	Yayılı	124,53	69,04	327,24	169,06	337,17
SB_300	İki Noktadan	276,47	80,25	415,50	211,64	453,65
PB_300	İki Noktadan	265,49	67,30	385,40	186,73	424,14
DB_300	İki Noktadan	245,89	61,94	357,95	193,99	389,15

. Her profil tipi için ayrı ayrı olmak üzere maksimum ortalama dayanıma sahip kiriş tiplerine verilen 100 birim üzerinden diğer kirişler normalize edilmiştir (Şekil 5.1)



Şekil 5.1. IPE_200_240_300 kirişlerinin normalize edilmesi

6. KAYNAKLAR

- ALTIFILLISCH, M.D., Cooke B.R. and Toprac A.A. 1957. An investigation of open web-expanded beams, *Welding Research Council Bulletin*, 47, 77-88.
- ASTM E8 / E8M-16a. 2016. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- BRITISH STANDARDS. BS 5950. 2000. *Structural Use of Steelworks in Building, Part 1. Code of Practice for Design in Simple and Continuous construction, hot rolled sections*, British Standard Institution, London, U.K.
- BRITISH STANDARDS. BS 5950. 1988. *Structural Use of Steelworks in Building, Part 3.1. Code of Practice for the design of composite beams*, British Standard Institution, London, U.K.
- BRITISH STANDARDS. BS 5950. 1990. London, UK: British Standart Instititution.
- COELLO, C.A.C. 2002. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191, 1245-1287.
- DESIGN GUIDE 2x. 2012. *Design of Castellated and Cellular Beams*, AISC, American Institutes of Steel Construction.
- DIONISIO, M.C., Hoffman, R.M. Yost, J.R., Diehard, D.W. and Gross, S.P. 2004. Determination of Critical Location for Service Load Bending Stresses in Non-Composite Cellular Beams. 17th ASCE Engineering Mechanics Conference. Newark, DE.
- DOUGHERY, B.K. 1993. *Castelleted Beams: A State of Art Report*. J. SA Inst. Civ. Eng.
- DORIGO, M. and Stützle, T. 2004. *Ant Colony Optimization*, A Bradford Book, Massachusetts Institute of Technology.
- DOĞAN, E. and Saka M.P. 2012. Optimum design of unbraced steel frames to LRFD-AISC using particle swarm optimization, *Advances in Engineering Software*, 46(1), 27-34.
- DREO, J., Petrowski, P. and Taillard, E. 2006. *Meta-Heuristics for Hard Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- DURİF, S., Bouchaïr, A. and Vassart, O. 2013. Validation of an Analytical Model for Curved and Tapered Cellular Beams at Normal and Fire Conditions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57/1, 83–95, Doi: 10.3311/PPci.2144.

- ERDAL, F. and Saka, M.P. 2013. Ultimate Load Carrying Capacity of Optimally Designed Steel Cellular Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 355-368.
- ERDAL, F. and Saka M.P. 2009. Optimum design of grillage systems using harmony search algorithm. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, 38(1), 25-41.
- ERDAL, F., Doğan, E. and Saka M.P. 2011. Optimum Design of Cellular Beams Using Harmony Search and Particle Swarm Optimizers, *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (2), 237-247.
- ERDAL, F., Tunca, O., Taş, S., Çarbaş, S. 2016. Nonlinear Finite Element Analysis of Optimally Designed Steel Angelina™ Beams, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* Vol:10, No:10.
- ERDAL, F., Taş, S., Tunca, O. and Çarbaş, S. 2016. Effect of Random Number Sequences On The Optimum Design of Castellated Beams With Improved Harmony Search Method, *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)* Vol.8, Issue 3, 25-39.
- ERDAL F., Tunca, O. and Taş, S. 2016. Nonlinear finite element analysis of optimally designed steel cellular beams. *Research on Engineering Structures and Materials*, 2(2), 59-66, Doi: 10.17515/resm2015.22me0903.
- ERDAL F., Doğan, E., Tunca, O. and Taş, S. 2016. Optimum Design of Corrugated Web Beams Using Stochastic Search Techniques. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1(3), 104-108.
- ERDAL, F. 2011. Ultimate Load Capacity of Optimally Designed Cellular Beams. PhD Thesis, Middle East Technical University, 136 p
- GLOVER, F. 1989. Tabu Search-Part I, *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190-206.
- GOLDBERG, D.E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing.
- HALLEUX, P. 1967. Limit Analysis of Castellated Steel Beams, *Acier-StahlSteel*, No.3
- HESTENES, M.R. 1969. Multiplier and Gradient Methods, *Optimition Theory and Applications* 4, 303-320.
- HUSAIN, M.U. and Speirs W.G. 1971. Failure of castellated beams due to rupture of welded joints, *Acier-Stahl-Steel*, 1.

- KERDAL, D. and Nethercot, A. 1982. Lateral-torsional buckling of castellated steel beams, *Journal of The Institution of Structural Engineers*, Part A Design and Construction, 60B, 53-61.
- KIRKPATRICK, S., Gerlatt, C.D. and Vecchi, M. P. 1983. Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220, 671-680.
- KNOWLESS, P.R. 1985. Design of Cellular Beams. The Steel Construction Institute.
- KOCHENBERGER, G.A. and Glover, F. 2003. Handboook of Meta-Heuristics. *Kluwer Academic Publishers*.
- LAWSON, R.M. 1985. Design for Openings in Web of Composite Beams. The Steel Construction Institute.
- LEE, K.S. and Geem Z.W. 2004. A New Structural Optimization Method Based on the Harmony Search Algorithm, *Computers and Structures*, 82, 781-798.
- LRFD-AISC. 1986. Manual of Steel Construction-Load and Resistance Factor Design. SA.
- NETO, A.B., Calenzani, A. F. G. And Ferreira, W.G. 2015. Study of methods for the design of cellular composite steel and concrete beams. *IBRACON Structures and Materials Journal*, Volume 8, Number 6, p. 827-859.
- MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION, Allowable Stress Design, 9th edition, AISC, American Institutes of Steel Construction. 1989. Inc, Chicago, Illinois, USA.
- OFTADEH, R., Mahjoob, M.J. and Shariatpanahi, M. 2010. A Novel Meta-heuristic Optimization Algorithm Inspired by Group Hunting of Animals: Hunting Search. *Computers Mathematics with Applications*, 60, 2087-2098.
- PEREZ, R.E. and Behdinan, K. 2007. Particle Swarm Approach for Structural Design Optimization, *Computers and Structures*, 85 (19-20), 1579-1588.
- PEZESHK, S. and Camp C.V. 2002. State of the Art on the Use of Genetic Algorithms in Design of Steel Structures, Recent Advances in Optimal Structural Design, Ed; S.A. Burns, ASCE, 55-80.
- ROZAKDEMİR. 2010. petek kirişlerin avantajları pdf. <http://www.rozakdemir.com/08%20%20PETEK%20K%C4%B0R%C4%B0%C5%9ELER%20-%201006.pdf> (son erişim tarihi: 02.06.2017).
- SHERBOURNE, A.N. 1966. The plastic behavior of castellated beams, Proc. 2nd Commonwealth Welding Conference. Inst. Of Welding, London, pp:1-5.
- SHOWKATI, H., Ghanbari Ghazijahani, T., Noori, A. and Zirakian, T. 2012. Experiments on Elastically Braced Castellated Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 77, 163–172, Doi: 10.1016/j.jcsr.2012.05.008.

STEELWORK DESIGN GUIDE TO BS 5950. 1990. Part 1, Section Properties, Member Capacities, Vol.1, 4th edition, The Steel Construction Institute, U.K.

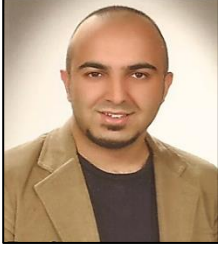
TSAVDARİDİS, K.D. and D'Mello, C. 2011. Finite Element Investigation on Web-Post Buckling of Perforated Steel Beams with Various Web Opening Shapes subjected under different shear-moment interaction. Paper presented at the 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, Hungary.

VENKAYYA, V.B., Khot, N.S. and Berke, L. 1973. Application of Optimality Criteria Approaches to Automated Design of Large Practical Structures, Second Symposium Structural Optimization, AGARD-CP-123, Milano, Italy.

ZAAROUR, W., Redwood, R.G. 1996. Web buckling in thin webbed castellated beams, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 122 (8), 860-866.

WARD, J.K. 1990. Design of composite and non-composite cellular beams, *The Steel Construction Institute Publication*.

ÖZGEÇMİŞ



Serkan TAŞ 1990 yılında Tokat'ın Zile ilçesinde doğdu. İlk ve ortaokul öğrenimini Zile Necmi Muammer İlköğretim Okulu'nda lise öğrenimi ise Tokat Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında girdiği Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2014 yılında mezun oldu. Ağustos 2014-Haziran 2017 yılları arasında, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Bu süreç içerisinde çeşitli bilimsel projelerde çalıştı. 2016 yılından beri özel sektörde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

