

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**EĞRİSEL FORMUN YENİ NESİL ÇELİK KİRİŞLERİN
TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Serkan TAŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ŞUBAT 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**EĞRİSEL FORMUN YENİ NESİL ÇELİK KİRİŞLERİN
TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Serkan TAŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ŞUBAT 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞRİSEL FORMUN YENİ NESİL ÇELİK KİRİŞLERİN
TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Serkan TAŞ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez
Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından
FBA-2019-4587 nolu proje ile desteklenmiştir.

ŞUBAT 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞRİSEL FORMUN YENİ NESİL ÇELİK KİRİŞLERİN
TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Serkan TAŞ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 19/02/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ferhat ERDAL (Danışman)

Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Prof. Dr. Serdar ÇARBAŞ

Prof. Dr. Erkan DOĞAN

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

ÖZET

EĞRİSEL FORMUN YENİ NESİL ÇELİK KİRİŞLERİN TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Serkan TAŞ

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Şubat 2024; 116 sayfa

Yapısal mühendislikte dikkat çeken iki farklı kiriş tipi olan gövde yüksekliği artırılmış dairesel boşluklu ve ondülin gövdeli çelik kirişlerin eğrisel ve düz formlarının yük taşıma kapasitelerinin deneysel olarak karşılaştırılmasına odaklanan bu tez, yapısal tasarımlarda yeni nesil eğrisel kirişlerin kullanımının potansiyel avantajlarını ortaya koymayı ve yapısal tasarımlarda iyileştirme alanlarını belirlemeyi amaçlamaktadır.

Deneylerde, gövde yüksekliği artırılmış dairesel boşluklu çelik kirişlerin eğrisel ve düz modelleri ile ondülin gövdeli çelik kirişlerin eğrisel ve düz modelleri aynı yük koşulları altında test edilmiştir. Bu deneyler sayesinde, kirişlerin yük taşıma kapasitesi, davranışları, performansları ve göçme modları ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir.

Ayrıca, deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak ANSYS Workbench yazılımında sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile kirişlerin karmaşık gerilme dağılımları, deformasyonları ve taşıma kapasiteleri daha ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve deneysel çalışma sonuçlarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışma, yapısal mühendislikte yeni nesil eğrisel kirişlerin taşıma kapasitesine olan etkisini daha iyi anlamaya, tonoz çatılarda kullanımının yaygınlaştırılmasına ve yapısal tasarımların iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır. Elde edilen sonuçlar, mühendislerin yapısal tasarımlarda daha optimize edilmiş çözümler sunmalarına ve daha güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etmelerine yardımcı olacaktır.

ANAHTAR KELİMELE: Çelik yapılar, Eğrisel kirişler, Gövde yüksekliği artırılmış kirişler, Ondülin gövdeli kirişler, Sonlu elemanlar yöntemi, Yük taşıma kapasitesi

JÜRİ: Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Prof. Dr. Serdar ÇARBAŞ

Prof. Dr. Erkan DOĞAN

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CURVED FORM ON THE LOAD CARRYING CAPACITY OF NEW GENERATION STEEL BEAMS

Serkan TAŞ

PhD Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

February 2024; 116 pages

This thesis focuses on the experimental comparison of the load carrying capacities of two distinct types of beams prominent in structural engineering: web expanded cellular beams and corrugated web steel beams, in their curved and straight forms. The aim is to highlight the potential advantages of using new-generation curved beams in structural designs and identify areas for improvement in structural design.

In the experiments, curved and straight models of web expanded cellular steel beams and corrugated web steel beams were tested under the same load conditions. Through these experiments, the load carrying capacity, behavior, performance, and failure modes of the beams were analyzed in detail.

Additionally, finite element analysis was performed using ANSYS Workbench software, utilizing data obtained from experimental studies. Finite element analysis enabled a more detailed examination of the complex stress distributions, deformations, and load-carrying capacities of the beams, facilitating a comprehensive evaluation of the experimental results.

This study will contribute to a better understanding of the effect of new generation curved beams on the load carrying capacity in structural engineering, promote the widespread use of vaulted roofs, and enhance structural design. The findings will assist engineers in providing more optimized solutions in structural designs and constructing safer and more durable structures.

KEYWORDS: Corrugated web beams, Curved beams, Finite element method, Load carrying capacity, Steel structures, Web-expanded beams

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Prof. Dr. Serdar ÇARBAŞ

Prof. Dr. Erkan DOĞAN

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, yapısal mühendislikte gelişen tasarım stratejilerini inceleyerek, yeni nesil çelik kirişlerin yapısal performansını araştırmayı amaçlamaktadır. Geleneksel düz formdaki kirişlerin ötesinde, özellikle gövde yüksekliği artırılmış dairesel boşluklu çelik kiriş (DBK) ve ondülin gövdeli çelik kirişler (OGK) üzerine odaklanan bu çalışma, yapısal mühendislik alanında potansiyel avantajları değerlendirmeyi hedeflemektedir.

Çalışmanın temelinde, deney ve analiz sonuçlarına dayalı olarak elde edilen bulguların, yapı mühendisliği pratiğine önemli bir katkı sunacağına inanılmaktadır. Bu noktada, tez sürecindeki rehberlik, destek ve önerileriyle değerli katkılarda bulunan danışmanım Doç. Dr. Ferhat ERDAL'a sonsuz saygılarımı sunar ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez sürecindeki her aşamada desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Osman TUNCA ve Mak. Yük. Müh. Emre ÖZDEMİR'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında vermiş oldukları önerilerden dolayı değerli hocalarım Prof. Dr. Ramazan Özçelik, Prof. Dr. Erkan DOĞAN, Prof. Dr. Serdar ÇARBAŞ ve Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ'a teşekkür ederim.

Akdeniz Üniversitesi Rektörlüğüne ve Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine vermiş oldukları desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Rektörlüğüne, Mühendislik Fakültesi Dekanlığına ve İnşaat Mühendisliği Bölümüne, üniversitenin yapı laboratuvarında gerçekleştirilen deneylere ev sahipliği yaptıkları için özel teşekkürlerimi sunarım.

Sonsuz sevgi ve destekleri için annem Ayhan TAŞ'a, babam Dursun TAŞ'a, kardeşlerim Serdar TAŞ ve Serhat TAŞ'a teşekkür ederim. Bu tezin tamamlanmasında onların güçlü desteği büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. Dairesel Boşluklu Çelik Kirişlerin Kullanım Alanları.....	3
2.2. Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin Kullanım Alanları	5
2.3. Dairesel Boşluklu Çelik Kirişlerin Göçme Modları	7
2.3.1. İkincil eğilme.....	7
2.3.2. Gövde burkulması.....	8
2.3.3. Yanal burulmalı / buruşmalı burkulma.....	9
2.3.4. Kaynaklı birleşim kopması	10
2.3.5. Basit eğilme.....	10
2.3.6. Lokal burkulma	11
2.4. Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin Göçme Modları	12
2.4.1. Gövde kesme burkulması.....	12
2.4.2. Yanal burulmalı burkulma	13
2.4.3. Flanş lokal burkulması.....	13
2.5. Literatür Araştırması.....	14
2.5.1. Dairesel boşluklu kirişler	14
2.5.2. Ondülin gövdeli kirişler	25
3. MATERYAL VE METOT	39
3.1. Dairesel Boşluklu Çelik Kirişlerin Hesap Yöntemleri.....	39
3.2. Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin Hesap Yöntemleri	43
3.3. Test Elemanlarının Fabrikasyon Süreci	45
3.3.1. Dairesel boşluklu çelik kirişlerin üretilmesi	45
3.3.2. Ondülin gövdeli çelik kirişlerin üretilmesi	47
3.4. Test Elemanlarının Deneysel Süreci.....	49
3.5. Malzeme Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi.....	54

3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi	55
3.6.1. Malzeme özellikleri	56
3.6.2. Mesh tipi ve boyutları	57
3.6.3. Mesnetlerin tanımlanması	58
3.6.4. Yük ve deplasmanlar	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	62
4.1. Dairesel Boşluklu Kiriş Testleri	62
4.1.1 DBK-D tek noktadan yükleme	62
4.1.2. DBK-E tek noktadan yükleme	65
4.1.3. DBK-D iki noktadan yükleme.....	68
4.1.4. DBK-E iki noktadan yükleme	71
4.1.5. DBK kirişlerde eğriselliğin etkisi.....	74
4.2. Ondülin Gövdeli Kiriş Testleri.....	75
4.2.1. OGK-D tek noktadan yükleme.....	75
4.2.2. OGK-E tek noktadan yükleme	78
4.2.3. OGK-D iki noktadan yükleme	81
4.2.4. OGK-E iki noktadan yükleme.....	84
4.2.5. OGK kirişlerde eğriselliğin etkisi.....	87
4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi	88
4.3.1. Dairesel boşluklu kirişlerin sonlu elemanlar analizi.....	89
4.3.1.1. DBK-D tek noktadan yükleme	89
4.3.1.2. DBK-E tek noktadan yükleme.....	91
4.3.1.3. DBK-D iki noktadan yükleme.....	93
4.3.1.4. DBK-E iki noktadan yükleme	95
4.3.2. Ondülin gövdeli kirişlerin sonlu elemanlar analizi.....	97
4.3.2.1. OGK-D tek noktadan yükleme	97
4.3.2.2. OGK-E tek noktadan yükleme	99
4.3.2.3. OGK-D iki noktadan yükleme.....	101
4.3.2.4. OGK-E iki noktadan yükleme	103
4.4. Deneysel ve Sayısal Çalışmanın Karşılaştırılması.....	105
5. SONUÇLAR.....	108
6. KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Eğrisel formun yeni nesil çelik kirişlerin taşıma kapasitesine etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değ rlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

19 / 02 / 2024

Serkan TAŞ



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_{tee}	: T-kesit alanı
a	: Dalga yüksekliği
b	: Flanş genişliği
β_w	: Çelik sınıfına göre belirlenen parametre
c	: Yanal destekler arası mesafe
D_0	: Boşluk çapı
D_x, D_y	: Ondülin gövde rijitlikleri
E	: Elastisite modülü
f_y	: Karakteristik akma dayanımı
f_u	: Çekme kapasitesi
h	: Gövde kesit yüksekliği
H_u	: Alt ve üst T-kesit merkezleri arası mesafe
I_y	: Atalet momenti
K_B	: Burkulma katsayısı
k_c	: Basınç kuvvet faktörü
M_p	: Moment kapasitesi
M_{allow}	: İzin verilen maksimum gövde (web post) momenti
M_e	: Elastik eğilme momenti kapasitesi
$N_{\phi Rk,t}$	: Flanş çekme kuvveti taşıma kapasitesi
$N_{\phi Rk,l}$	: Flanş lokal burkulma durumu için basınç kuvveti taşıma kapasitesi
$N_{\phi Rk,\phi}$	: Flanş global burkulma durumu için basınç kuvveti taşıma kapasitesi
P_o	: Kritik kesitte oluşan normal iç kuvvet

P_u : Kritik kesit normal kuvvet kapasitesi
 S : Boşluk merkezleri arası mesafe
 s : Ondülin levha düzleştirilmiş boyu
 T : T-kesitte oluşan normal kuvvet
 t_f : Flanş et kalınlığı
 t_w : Gövde et kalınlığı
 V : T-kesitte oluşan kesme kuvveti
 V_h : Kaynak bölgesinde oluşan kesme kuvveti
 w : Kaynak dikiş boyu
 σ_{EL} : Elastik sınır gerilme
 γ_w : Sabit parametre
 λ_{GN} : Spesifik narinlik parametresi
 τ_{EG} : Gövde enine burkulma gerilmesi
 w : Dalga boyu

Kısaltmalar

DBK : Dairesel boşluklu kiriş
DB : Dairesel boşluklu
EC : Eurocode
GYA : Gövde yüksekliği artırılmış
LB : Lokal burkulma
OGK : Ondülin gövdeli kiriş
SEA : Sonlu elemanlar analizi
SE : Sonlu elemanlar
YBLB : Yanal burulmalı burkulma
YBŞB : Yanal buruşmalı burkulma
YSA : Yapay sinir ağları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Vierendeel göçme oluşumu (Panedpojaman vd. 2015).....	7
Şekil 2.2. Gövde (web-post) burkulması (Neto vd. 2015).....	8
Şekil 2.3. Gövde (Web-post) burkulma oluşumu (Grilo vd. 2018).....	8
Şekil 2.4. YBLB ve YBŞB göçme modları (El-Sawy vd. 2014)	9
Şekil 2.5. a) YBLB; b) LB; c) YBŞB (Ertenli vd. 2021)	9
Şekil 2.6. Kaynak bölgesinden kopma (Hussain ve Speirs 1971).....	10
Şekil 2.7. Basit eğilme (Halleux 1967).....	10
Şekil 2.8. Gövde boşluk çevresi lokal burkulma.....	11
Şekil 2.9. Sonlu elemanlar burkulma analizi; a) lokal kesme burkulması; b) etkileşimli kesme burkulması; c) global kesme burkulması (Wang vd. 2023).....	12
Şekil 2.10. Basınç flanşı lokal burkulma (Tunca 2019)	13
Şekil 2.11. Deneysel ve sayısal çalışma, lokal flanş burkulması (Jäger vd. 2017)	13
Şekil 2.12. Tekli gövde (web-post) modeli (Limbachiya ve Shamass 2021)	14
Şekil 2.13. Kompozit dairesel boşluklu kiriş modeli (Ferreira vd. 2021)	15
Şekil 2.14. Gövde (web-post) göçme mekanizması (Grilo vd 2018)	15
Şekil 2.16. Konik dairesel boşluklu kiriş (Amrous vd. 2023).....	17
Şekil 2.17. Kompozit petek boşluklu kiriş test düzeneği (Dong vd. 2021)	18
Şekil 2.18. Dairesel boşluklu kiriş göçme modları (Ferreira vd 2022)	19
Şekil 2.19. Dairesel boşluklu kiriş göçme modları (El-Sawy vd. 2014)	19
Şekil 2.20. Dairesel boşluklu kiriş gövde distorsiyonu (Moghbeli ve Sharifi 2021)	20
Şekil 2.21. Web-post burkulma durumu (Shamass ve Guarracino 2020)	21
Şekil 2.22. Dairesel boşluklu kompozit kiriş test düzeneği (Dai vd. 2023).....	21
Şekil 2.23. Dairesel boşluklu kompozit kiriş sayısal model (Oliveira vd. 2022).....	22
Şekil 2.24. Dairesel boşluklu çelik kiriş test düzeneği (Erdal ve Saka 2013).....	22
Şekil 2.25. Kemer form dairesel boşluklu kiriş test düzeneği (Zaher vd. 2018).....	23

Şekil 2.26. Prekast döşeme modeli (Ferreira vd. 2021).....	24
Şekil 2.27. Dairesel boşluklu kiriş göçme durumları (Ellobody 2012)	24
Şekil 2.28. Kesme burkulması katsayısının Eurocode ile karşılaştırılması (Sebastiao ve Papangelis 2023)	25
Şekil 2.29. Ondülin Çelik kemerler (Hao vd. 2023).....	26
Şekil 2.30. Oluklu forma sahip kesme bağlantısı (Mansouri ve Sharif 2022)	26
Şekil 2.31. Test düzeneği (Jia vd 2022).....	27
Şekil 2.32. Trapez gövdeli kiriş sonlu elemanlar analizi (Morkhade ve Gupta 2022) ...	27
Şekil 2.33. Yanal burulmalı burkulma göçme modu örneği (Hassanein vd. 2022)	28
Şekil 2.34. Deneysel ve nümerik çalışma görsel karşılaştırması (Alikhanifard vd. 2022).....	28
Şekil 2.35. Tekil yük altında OGK göçme durumları (Nikoomanesh ve Goudarzi 2021).....	29
Şekil 2.36. Boşluk şekil ve konumları (Roudsari vd. 2021)	30
Şekil 2.37. Trapez gövdeli eğimli kiriş (Yossef 2020).....	31
Şekil 2.38. Kesme yükleri altında burkulma şekilleri (Nikoomanesh ve Goudarzi 2020).....	32
Şekil 2.39 Test düzeneği (Wu vd. 2020)	33
Şekil 2.40. Test elemanlarının göçme modlarının kıyaslanması (Zi vd. 2020)	34
Şekil 2.41. Test örneği burkulma davranışı (Zhang vd. 2017).....	35
Şekil 2.42. Düğüm noktası panel tipleri (Aydın vd. 2016).....	35
Şekil 2.43. Kolon-kiriş birleşim detayı (Zhang vd. 2017)	36
Şekil 2.45. Sinusoidal forma sahip panel (Dou vd. 2016)	37
Şekil 2.46. Test düzeneği (Yan vd. 2016).....	38
Şekil 2.47. Yanal burulmalı burkulma durumu (Pimenta vd. 2015)	38
Şekil 3.1. Kirişin gövdesinde oluşan yanıl kesme	40
Şekil 3.2. Olander eğimli kiriş yaklaşımı	40
Şekil 3.3. Dairesel boşluklu kirişlerin gövde bölgesinde oluşan kritik kesitler	42

Şekil 3.4. Kiriş gövdesinde kaynak işlemi.....	42
Şekil 3.5. Profillerin üç makaralı profil bükme makinası ile bükülmesi	45
Şekil 3.6. Kiriş gövdesinin kesilmesi, Gövde Alt ve üst parçalarının birleştirilmesi.....	45
Şekil 3.7. Flanş alt ve üst parçaların kaynatılması	46
Şekil 3.8 Berkitme levhaları.....	46
Şekil 3.9. Ondülin gövde kalıbı ve sinusoidal formun elde edilmesi	47
Şekil 3.10. Eğrisel formda gövde sacının kesilmesi.....	47
Şekil 3.11. Ondülin gövde ve flanşların sabitlenmesi	48
Şekil 3.12. Mesnet ve yük etki bölgelerindeki berkitme levhaları	48
Şekil 3.13. Yükleme çerçevesi altında eğrisel ondülin gövdeli kiriş test düzeneği	50
Şekil 3.14. Yanal desteklerin yerleşimi	50
Şekil 3.15. İki noktadan yükleme, yük transfer bölgeleri.....	51
Şekil 3.16. Tek noktadan yükleme, yük transfer bölgeleri	51
Şekil 3.17. Eğrisel kiriş testlerinde kullanılan sabit mesnet	52
Şekil 3.18. Düz kiriş testlerinde kullanılan mesnet.....	52
Şekil 3.19. Düşey ve yanal deplasmanların yerleşimi	53
Şekil 3.20. Alınan numuneler ve çekme test cihazı.....	54
Şekil 3.21. Numune geometrik özellikleri	54
Şekil 3.22. Solidworks programı arayüzü.....	55
Şekil 3.23. Ansys-Workbench yazılımı arayüzü.....	55
Şekil 3.25. Malzeme parametrelerinin tanımlanması	56
Şekil 3.26. Lineer ve lineer olmayan analiz kıyaslanması.....	56
Şekil 3.27. Sabit mesnet tanımlamaları	58
Şekil 3.28. Hareketli mesnet tanımlamaları	58
Şekil 3.29. Mesnet-pim bağlantısı	59
Şekil 3.30. Sabit mesnet bağlantı tipinin tanımlanması.....	59

Şekil 3.31. Tek noktadan deplasman verilmesi.....	60
Şekil 3.32. İki noktadan deplasman verilmesi.....	60
Şekil 3.33. Yük etki alanına deplasman verilmesi	61
Şekil 3.34. Yük ve deplasmanların elde edilmesi	61
Şekil 4.1. DBK350-D tek noktadan yükleme genel yerleşimi	62
Şekil 4.2. DBK350-D kiriş geometrik özellikleri.....	62
Şekil 4.3. DBK350-D tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri.....	63
Şekil 4.4. DBK350-D tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.5. DBK350-D tek noktadan yükleme, test-01 göçme modları	64
Şekil 4.6. DBK350-D tek noktadan yükleme, test-02 göçme modları	64
Şekil 4.7. DBK350-E tek noktadan yükleme genel görünümü	65
Şekil 4.8. DBK350-E kiriş geometrik özellikleri.....	65
Şekil 4.9. DBK350-E tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri	66
Şekil 4.10. DBK350-E tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma	66
Şekil 4.11. DBK350-E tek noktadan yükleme, test 01 göçme modları.....	67
Şekil 4.12. DBK350-E tek noktadan yükleme, test 02 göçme modları.....	67
Şekil 4.13. DBK350-D iki noktadan yükleme genel görünümü	68
Şekil 4.14. DBK350-D kiriş geometrik özellikleri.....	68
Şekil 4.15 DBK350-D iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri.....	69
Şekil 4.16. DBK350-D İki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma	69
Şekil 4.17. DBK350-D iki noktadan yükleme, test 01 göçme modları	70
Şekil 4.18. DBK350-D iki noktadan yükleme, test 02 göçme modları	70
Şekil 4.19. DBK350-E İki noktadan yükleme altında genel görünümü	71
Şekil 4.20. DBK350-E kiriş Geometrik Özellikleri	71
Şekil 4.21. DBK350-E iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri	72

Şekil 4.22. DBK350-E iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma	72
Şekil 4.23. DBK350-E iki noktadan yükleme, test 01 göçme modları	73
Şekil 4.24. DBK350-E iki noktadan yükleme, test 02 göçme modları	73
Şekil 4.25. DBK350 kirişleri, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması.....	74
Şekil 4.26. OGK350-D tek noktadan yükleme altında genel görünümü	75
Şekil 4.27. OGK350-D kirişi geometrik özellikleri	75
Şekil 4.28. OGK350-D tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri.....	76
Şekil 4.29. OGK350-D tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma.	76
Şekil 4.30. OGK350-D tek noktadan yükleme, test 01 göçme modları	77
Şekil 4.31. OGK350-D tek noktadan yükleme, test 02 göçme modları	77
Şekil 4.32. OGK350-E tek noktadan yükleme genel görünümü.....	78
Şekil 4.33. OGK350-E kirişi geometrik özellikleri.....	78
Şekil 4.34. OGK350-E tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri	79
Şekil 4.35. OGK350-E tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma	79
Şekil 4.36. OGK350-E tek noktadan yükleme, test 01 göçme modları.....	80
Şekil 4.37. OGK350-E tek noktadan yükleme, test 02 göçme modları.....	80
Şekil 4.38. OGK350-D iki noktadan yükleme genel görünümü	81
Şekil 4.39. OGK350-D kirişi geometrik özellikleri	81
Şekil 4.40. OGK350-D iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri	82
Şekil 4.41. OGK350-D iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma	82
Şekil 4.42. OGK350-D iki noktadan yükleme, test 01 göçme modları.....	83
Şekil 4.43. OGK350-D iki noktadan yükleme, test 02 göçme modları.....	83
Şekil 4.44. OGK350-E iki noktadan yükleme genel görünümü	84
Şekil 4.45. OGK350-E kirişi geometrik özellikleri.....	84
Şekil 4.46. OGK350-E iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri.....	85

Şekil 4.47. OGK350-E iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma	85
Şekil 4.48. OGK350-E iki noktadan yükleme, test 01 göçme modları	86
Şekil 4.49. OGK350-E iki noktadan yükleme, test 02 göçme modları	86
Şekil 4.50. DBK350 kirişleri, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması.....	87
Şekil 4.51. DBK350-D sonlu elemanlar analizi, tekil yükleme durumu	89
Şekil 4.52. DBK350-D kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	89
Şekil 4.53. DBK350-D kirişi üzerindeki tekil yük altında deplasmanlar	89
Şekil 4.54. DBK350-D kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri.....	90
Şekil 4.55. DBK350-D kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler.....	90
Şekil 4.56. DBK350-D kirişleri SEA ve deney yük-deplasman grafikleri karşılaştırma	90
Şekil 4.57. DBK350-E sonlu elemanlar analizi; tekil yükleme durumu	91
Şekil 4.58. DBK350-E kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı.....	91
Şekil 4.59. DBK350-E kirişi üzerindeki tekil yük altında deplasmanlar	91
Şekil 4.60. DBK350-E kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri	92
Şekil 4.61. DBK350-E kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler	92
Şekil 4.62. DBK350-E kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri	92
Şekil 4.63. DBK350-D iki noktadan yükleme durumu	93
Şekil 4.64. DBK350-D kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	93
Şekil 4.65. DBK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında deplasmanlar.....	93
Şekil 4.66. DBK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmeleri...	94
Şekil 4.67. DBK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında normal gerilmeler...	94
Şekil 4.68. DBK350-D SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri karşılaştırma.....	94
Şekil 4.69. DBK350-E sonlu elemanlar analizi; iki noktadan yükleme durumu	95
Şekil 4.70. DBK350-E kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı.....	95
Şekil 4.71. DBK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında deplasmanlar	95

Şekil 4.72. DBK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmeleri ...	96
Şekil 4.73. DBK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında normal gerilmeler ...	96
Şekil 4.74. DBK350-E kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri	96
Şekil 4.75. OGG350-D sonlu elemanlar analizi; tek noktadan yükleme durumu	97
Şekil 4.76. OGG350-D kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	97
Şekil 4.77. OGG350-D kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında deplasmanlar	97
Şekil 4.78. OGG350-D kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında kesme gerilmeleri ..	98
Şekil 4.79. OGG350-D kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında normal gerilmeler ..	98
Şekil 4.80. OGG350-D SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri karşılaştırması	98
Şekil 4.81. OGG350-E sonlu elemanlar analizi; tek noktadan yükleme durumu	99
Şekil 4.82. OGG350-E kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	99
Şekil 4.83. OGG350-E kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında deplasmanlar	99
Şekil 4.84. OGG350-E kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında kesme gerilmeleri	100
Şekil 4.85. OGG350-E kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında normal gerilmeler	100
Şekil 4.86. OGG350-E kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri	100
Şekil 4.87. OGG350-D iki noktadan yükleme durumu	101
Şekil 4.88. OGG350-D kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	101
Şekil 4.89. OGG350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında deplasmanlar	101
Şekil 4.90. OGG350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmeleri	102
Şekil 4.91. OGG350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında normal gerilmeler	102
Şekil 4.92. OGG350-D kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri	102
Şekil 4.93. OGG350-E sonlu elemanlar analizi; iki noktadan yükleme durumu	103
Şekil 4.94. OGG350-E kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı	103
Şekil 4.95. OGG350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında deplasmanlar	103
Şekil 4.96. OGG350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmeleri .	104
Şekil 4.97. OGG350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında normal gerilmeler .	104

Şekil 4.98. OGG350-E SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri karşılaştırması ...	104
Şekil 4.99. DBK350 kirişi, deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması	105
Şekil 4.100. Flanş-gövde birleşimi gerilme dağılımları	105
Şekil 4.101. DBK350 kirişleri, SEA yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması	106
Şekil 4.102. OGG350 kirişleri, SEA yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması	107



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kaynak kalınlığı parametreleri	42
Çizelge 3.2. Kirişlerin adlandırılması ve uygulanan yükleme tipleri.....	49
Çizelge 3.3. OGK350 ve DBK350 kiriş modelleri geometrik özellikleri	53
Çizelge 3.4. Malzeme mekanik özellikleri.....	54
Çizelge 3.5. Mesh tiplerine göre düğüm ve eleman sayıları.....	57
Çizelge 4.1. DBK350 kirişleri yük kapasiteleri ve göçme modları.....	74
Çizelge 4.2. DBK350 kirişleri yük kapasiteleri ve göçme modları.....	87
Çizelge 4.3. Sonlu elemanlar analizi parametreleri.....	88
Çizelge 4.4. Sayısal ve deneysel çalışma yük artış oranları.....	106
Çizelge 5.1. DBK350 ve OGK350 kirişleri test sonuçları genel özeti	110
Çizelge 5.2. Deneysel ve SEA yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	110

1. GİRİŞ

Yapısal mühendislik, güvenli, dayanıklı ve ekonomik yapıların tasarımı, analizi ve inşasıyla ilgilenen kritik bir disiplindir. Günümüzde, yapı tasarımında ve inşaat süreçlerinde bir dizi yenilik ve gelişme yaşanmaktadır. Ancak, özellikle çelik gibi yüksek maliyetli malzemelerin, kullanımıyla ilgili artan zorluklar göz önüne alındığında, verimli malzeme kullanım stratejileri büyük bir önem taşımaktadır.

Çelik, yapısal mühendislik projelerinde geniş açıklıkların geçilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Özellikle tonoz çatılarda, çelik kirişlerin geniş açıklıkları destekleme kabiliyeti, yapısal dayanıklılığı ve esnekliği nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca, çeliğin hafifliği, yapısal yükü azaltarak tasarım esnekliği sağlar ve mimari açıdan çeşitli tasarım olanakları sunar. Ancak, bu avantajlara rağmen, çelik maliyetleri göz önüne alındığında, verimli bir şekilde kullanılması önemlidir.

Bu bağlamda, geleneksel olarak düz formda tasarlanan çelik kirişlerin ötesine geçerek, eğrisel formdaki çelik kirişlerin yapısal performansındaki potansiyel avantajları araştıran bu tez, yeni nesil kirişlerden olan gövde yüksekliği artırılmış dairesel boşluklu çelik kiriş (DBK) ve ondülin gövdeli çelik kirişler (OGK) üzerine odaklanmaktadır.

Ondülin gövdeli kirişler, incelikleri ve dalgalı yapısıyla öne çıkan bir tasarım anlayışına sahiptir. İki çelik plaka arasına kaynaklanan dalgalı ince bir levha ile taşıyıcı bir çelik kiriş oluşturulur. Bu özel sinusoidal gövde formu, kirişin plastik limit gerilmelerine ulaşmadan rijitlik kaybına bağlı burkulmasını engelleyerek kesme kuvvetine ve lokal etkilere karşı kirişin yük taşıma kapasitesini artırır. Sinusoidal yapının sunduğu avantajlar, kirişin öz ağırlığında azalmaya ve yük taşıma kapasitesinde artışa yol açarak ekonomik ve performans açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Gövde yüksekliği artırılmış dairesel boşluklu kirişler ise, çelik profil gövdenin dairesel forma uygun bir şekilde kesilmesiyle oluşturulmuş yapısal elemanlardır. Kesme ve kaynak işlemleriyle birleştirilen kesim parçaları, dairesel boşluklu bir kirişin oluşumunu sağlar. Bu kirişlerin özel kesit yapısı, malzeme tasarrufu sağlarken taşıma kapasitesini optimize etmektedir. Daha efektif malzeme kullanımı, kirişin öz ağırlığını azaltırken yapısal performansını da artırmaktadır.

Bu tez çalışması, ondülin gövdeli ve dairesel boşluklu kirişlerin düz ve eğrisel modellerinin taşıma kapasitelerini deneysel olarak karşılaştırmayı hedeflemektedir. Deneyler, her iki kiriş tipinin aynı yük koşulları altında test edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, kirişlerin taşıma kapasitelerinin, davranışlarının, deformasyon karakteristiklerinin, göçme modlarının ve diğer önemli parametrelerinin detaylı bir şekilde analizini sağlamaktadır.

Ayrıca, deneylerden elde edilen veriler, Ansys Workbench yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ile daha detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar analizi, kirişlerin karmaşık gerilme dağılımlarını, deformasyonlarını ve taşıma kapasitelerini ayrıntılı bir şekilde inceleyerek deneysel çalışmaların sonuçlarını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlar, yapı mühendislerin daha optimize edilmiş çözümler sunmalarına, daha güvenli, dayanıklı ve ekonomik yapılar inşa etmelerine yardımcı olacaktır. Ayrıca, yapı mühendisliğinde yeni nesil kirişlerin kullanımının teşvik edilmesine ve gelecekteki yapısal projeler için önemli bir referans kaynağı oluşturulmasına katkıda bulunacaktır.

Kirişlerin tasarım kriterlerinde, ondülin gövdeli çelik kiriş sistemlerinin tasarımları için BS EN1993-1:2005 (Annex-D, Eurocode 3) ve DIN 18-800 Teil-1 şartnamelerinde öngörülen tasarım kıstasları temel alınmıştır. Gövde yüksekliği arttırılmış dairesel boşluklu kiriş sistemleri için ise BS-5950 ve EN1993-1:2005 (Annex-N, Eurocode 3) şartnamelerindeki tasarım kıstasları esas alınmıştır.



2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Dairesel Boşluklu Çelik Kirişlerin Kullanım Alanları

Dairesel boşluklu çelik kirişler, inşaat ve mühendislik projelerinde son derece yönetilebilir tasarım özellikleri ve geniş kullanım yelpazesi ile dikkat çeken özel yapısal elemanlardır. Estetik açıdan çekici ve aynı zamanda dayanıklı olan bu kirişler, özellikle geniş açıklıkları destekleme yetenekleri ve hafif yapısı sayesinde birçok farklı uygulama alanında tercih edilmektedir. Köprü tasarımlarından stadyumlara, endüstriyel binalardan enerji santrallerine kadar geniş bir spektrumda kullanılabilmeleri, dairesele boşluklu çelik kirişleri, modern mühendislik projelerinin vazgeçilmez bir unsuru haline getirmektedir. Bu kirişler, esnek tasarım avantajlarıyla birlikte mükemmel bir denge sağlayarak, yapısal dayanıklılık ve estetik tasarımın bir araya geldiği özel projelerde çözüm sunmaktadır. Bu kirişlerin kullanılabileceği çeşitli alanlara dair örnekler şu şekilde sıralanabilir;

Köprü Tasarımları:

- Dairesel boşluklu çelik kirişler, estetik görünüm ve geniş açıklıkları destekleme yeteneği nedeniyle köprü tasarımlarında kullanılır. Genellikle mimari bir vurgu sağlar.

Demiryolu Projeleri:

- Yüksek dayanıklılıkları ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle demiryolu köprü tasarımlarında tercih edilir. Ayrıca, hafif yapıları demiryolu hatlarının mükemmel birer elemanı yapar.

Spor ve Eğlence Mekânları:

- Büyük stadyumlar veya kapalı spor alanlarının çatı tasarımlarında, geniş açıklıkları kapsayabilme yetenekleri ve modern mimariye uygunluğu nedeniyle kullanılır. Ayrıca, iç mekanlarda kolonsuz geniş alanlar yaratmada avantaj sağlar.

Endüstriyel Binalar:

- Fabrikalar, depolar ve endüstriyel tesislerde, dairesele boşluklu çelik kirişler genellikle çatı kirişleri olarak kullanılır. Bu, büyük açıklıkları kolayca kapsayabilme yetenekleri nedeniyle avantajlıdır.

Denizcilik Yapıları:

- Limanlarda ve marinalarda, dayanıklılıkları ve deniz suyuna karşı dirençleri nedeniyle tercih edilir. Bu yapılar genellikle büyük açıklıkları kapsamak için kullanılır.

Enerji Santralleri:

- Rüzgar enerjisi tesisleri gibi enerji santrallerinde, çelik kirişlerin hafifliği ve dayanıklılığı nedeniyle tercih edilebilir.

Çelik Konstrüksiyon Binaları:

- Modern mimari tasarımlarda, çelik konstrüksiyonlu binalarda estetik bir unsur olarak kullanılır. Büyük açıklıkları kapsayabilme yetenekleri, iç mekanlarda geniş ve açık tasarımlar sağlamak için avantajlıdır.

Giydirme Cepheler:

- Dairesel boşluklu çelik kirişler, büyük bina giydirme cephelerinde strüktürel bir rol oynayabilir. Bu, bina dış cephesine estetik bir katkı sağlar.

Ulaştırma Tesisleri:

- Havaalanları, tren istasyonları ve otobüs terminalleri gibi ulaştırma tesislerinde geniş açıklıkları desteklemek için kullanılabilir. Bu tesislerde hafif yapılar önemli bir avantajdır.

Su Geçişleri:

- Nehirler, göletler veya akarsular üzerindeki su geçişleri için köprü tasarımlarında kullanılabilir. Estetik görünimleri su geçişlerine hoş bir katkı sağlar.

Telekomünikasyon Kuleleri:

- Telekomünikasyon kulelerinde, yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonu nedeniyle tercih edilebilir. Bu kuleler genellikle yüksek yapılar oldukları için hafif malzemeler avantaj sağlar.

Müze ve Sanat Merkezleri:

- Büyük açıklıkları destekleyerek iç mekanlarda sütunsuz alanlar yaratmak için müze ve sanat merkezi tasarımlarında kullanılabilir.

Yüksek Binalar:

- Yüksek bina iç mekanlarında geniş ve açık tasarımlar sağlamak için kullanılabilir. Hafif yapısı, yüksek binaların taşıyıcı sistemlerini optimize edebilir.

2.2. Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin Kullanım Alanları

Ondülin gövdeli kirişler, inşaat sektöründe çeşitli uygulama alanlarına sahip olan dayanıklı ve esnek yapısal elemanlardır. Bu kirişler, geniş açıklıkları kapsama kabiliyetleri, hafif yapısı ve güçlü taşıma kapasiteleri ile köprülerden endüstriyel tesislere, spor salonlarından havacılık tesislerine kadar çeşitli projelerde kullanılmaktadır. Bu çok yönlü tasarım, mühendislik projelerinde optimize edilmiş çözümler arayan profesyoneller için önemli bir tercihi temsil etmektedir. Ondülin gövdeli kirişlerin çeşitli kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir:

Köprü Projeleri:

- Geniş açıklıkların üstesinden gelmek için kullanılır.
- Dalgalı yapısı, uzun mesafelerde mesnet noktaları arasında etkili performans sağlar.

Endüstriyel Tesisler:

- Büyük fabrikalarda ve depolarda çatı kirişleri olarak kullanılır.
- Geniş açıklıkları kapsayabilir ve yüksek taşıma kapasitesi sunar.

Spor Tesisleri:

- Geniş spor salonları, stadyumlar ve kapalı spor alanlarının çatıları için idealdir.
- Büyük oturma düzenlemeleri veya geniş açıklıkların olduğu projeler için uygundur.

Havacılık Tesisleri:

- Uçak hangarları gibi büyük açıklıklara sahip havacılık tesislerinde kullanılır.
- Büyük uçakların içeri alınması için geniş çatı açıklıkları sağlar.

Eğitim ve Kültür Binaları:

- Büyük eğitim ve kültür binalarında çok amaçlı salonlar, konferans salonları için idealdir.
- Geniş açıklıklar, esnek iç mekan düzenlemeleri için uygun zemin sağlar.

Denizcilik Yapıları:

- Liman tesislerinde, iskelelerde ve denizcilik yapılarında geniş açıklıkları desteklemek üzere kullanılabilir.
- Kiriş gövdesinin dalgalı yapısı, deniz koşullarına karşı dayanıklılık sağlar.

Lojistik ve Dağıtım Merkezleri:

- Büyük lojistik merkezleri ve depolarda geniş çatı açıklıklarını kapsamak için tercih edilebilir.
- Yüksek taşıma kapasitesi, depolama alanlarını optimize etmeye yardımcı olabilir.

Enerji Santralleri:

- Güneş enerjisi veya rüzgar enerjisi santrallerinde, geniş alanları kapsayan çatı yapılarında kullanılabilir.
- Enerji üretim ekipmanlarını desteklemek üzere güçlü bir temel sağlar.

Taşıma Araçları ve Garajlar:

- Büyük taşıma araçları veya garajlar için çatı yapılarında kullanılabilir.
- Geniş açıklıkları kapsayarak büyük araçları barındırmak için uygundur.

Eğlence ve Etkinlik Mekânları:

- Konser salonları, tiyatrolar ve diğer eğlence mekânlarının çatı yapılarında kullanılabilir.
- Büyük sahne ve oturma düzenlemelerini destekleyebilir.

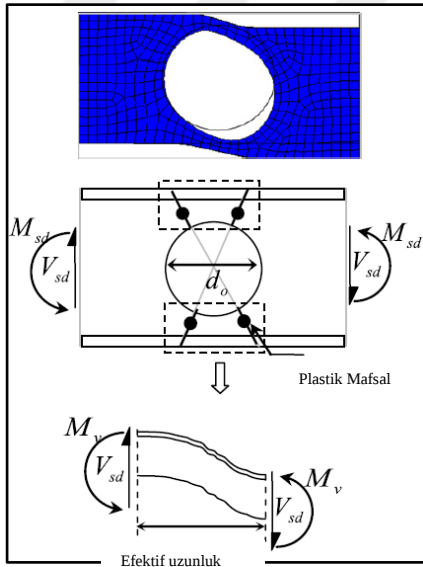
2.3. Dairesel Boşluklu Çelik Kirişlerin Göçme Modları

Dairesel boşluklu çelik kirişler bir dizi göçme moduna sahiptir. Bunlar arasında, basit eğilme göçmesi (flexural failure bending), yanal burulmalı-buruşmalı burkulma (lateral torsional-distorsional buckling), ikincil eğilme göçmesi (seconder-vierendeel bending failure), gövde burkulması (web-post buckling), lokal burkulma (local buckling) ve kaynaklı ek yeri kopması (welded joint rupture) gibi modlar bulunmaktadır. Farklı göçme modları bağımsız olarak meydana gelebilir veya birbirleriyle etkileşimde bulunabilir (Wang vd. 2014).

2.3.1. İkincil eğilme

İkincil (Vierendeel) eğilme, kiriş boyunca eğilme momentinin değişimine bağlı olarak kiriş boşluklarından geçen kesme kuvvetinin transferi nedeniyle ortaya çıkar. Vierendeel göçme, özellikle yüksek kesme kuvvetine maruz kalan bölgelerde kiriş gövde boşluğu etrafındaki kritik dört noktada plastik mafsal oluşmasıyla gerçekleşir (Şekil 2.1). Kiriş gövde boşluğundan geçen global kesme kuvveti, alt ve üst T-kesitlerinde lokal bir eğilme momenti oluşturur ki buna Vierendeel momenti denir.

Global eğilme momenti ve kesme kuvvetleri kiriş boyunca değişir. Bu nedenle, kiriş açıklığı boyunca tüm gövde boşluklarında global kesme ve moment etkileşimini incelemek gereklidir. Global kesme ve moment, genel bir gerilme oluşturmak üzere etkileşime girer; bu nedenle, kirişin en verimli kullanımı, maksimum global kesme ve momentin birbirinden uzakta olduğu durumda ortaya çıkar, bu da basit mesnetli ve düzgün yayılı yük taşıyan bir kiriş örneğidir (AISC 2016).

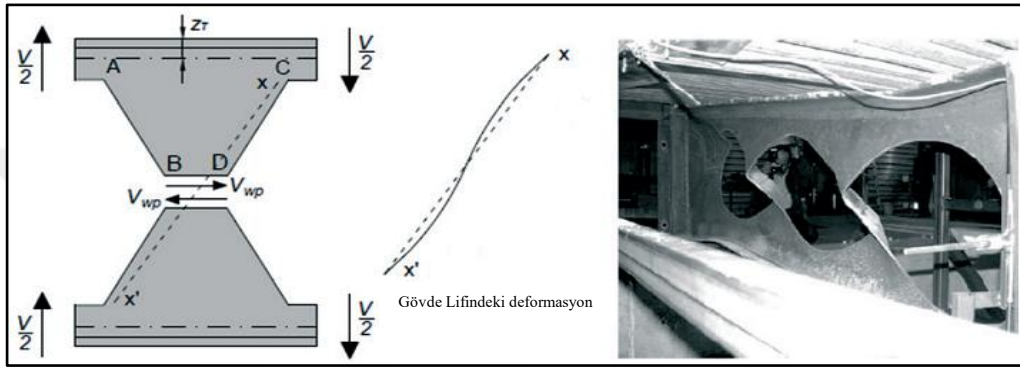


Şekil 2.1. Vierendeel göçme oluşumu (Panedpojaman vd. 2015)

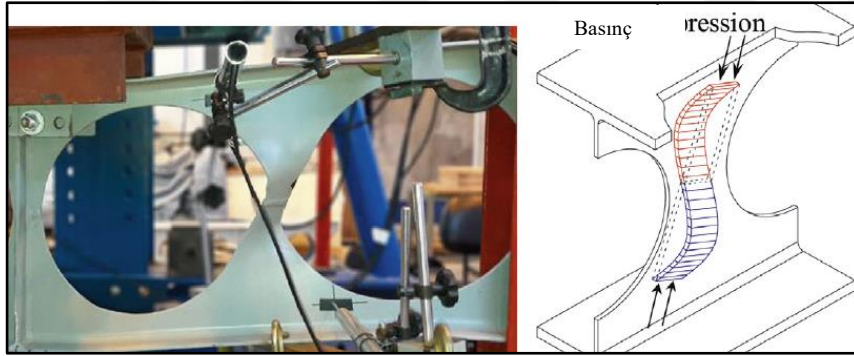
2.3.2. Gövde burkulması

Kesme kuvvetlerinden dolayı;

Gövdenin kaynaklı ek yeri boyunca etki eden kesme kuvvetleri (V_{wp}), Şekil 2.2 de görüldüğü üzere, A-B konturunda çekme gerilmelerine ve C-D konturunda basınç gerilmelerine neden olur. Kesme nedeniyle gövde (web-post) burkulmasında, basınç altındaki parça düzleminden uzaklaşma eğilimindeyken, çekme altındaki parça başlangıç konumunda kalma eğiliminde olur (Neto vd. 2015) (Şekil 2.3). Bu göçme modu, elastik olmayan rejimde kesitlerin önemli derecede akması ile meydana gelir (Kerdal ve Nethercot 1984).



Şekil 2.2. Gövde (web-post) burkulması (Neto vd. 2015)



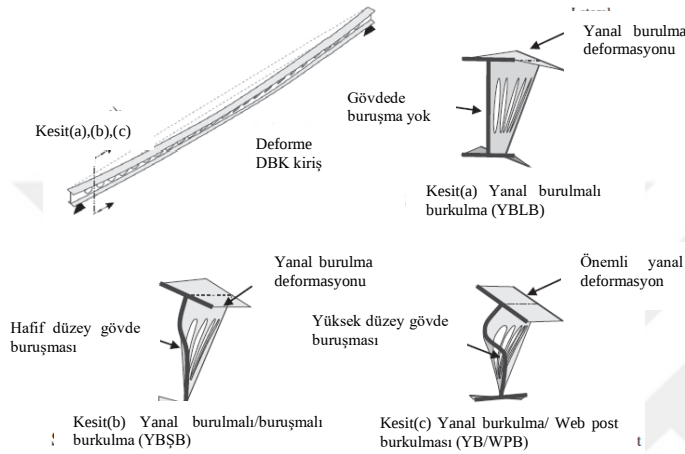
Şekil 2.3. Gövde (Web-post) burkulma oluşumu (Grilo vd. 2018)

Basınç kuvvetlerinden dolayı;

Lokal yüklerin ya da mesnet reaksiyonlarının doğrudan gövdeye uygulanmasıyla gövde (web-post) burkulması meydana gelir. Bu durum tıpkı aksenal basınç kuvveti altındaki çubukların burkulmasına benzer (Neto vd. 2015).

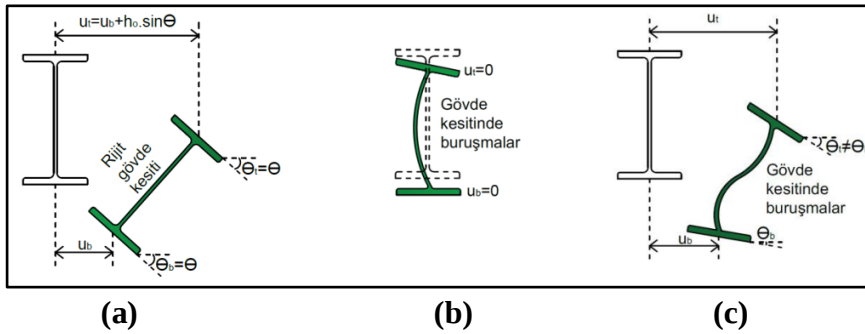
2.3.3. Yanal burulmalı / buruşmalı burkulma

Yanal burulmalı burkulma (YBLB) modu, kesitin yan deplasmanı ve boyuna eksenini etrafında dönmesi ile meydana gelir (Şekil 2.4). Kirişin basınç başlığı bölgesinde kalan kısmı, global momentin etkisiyle normal basınç gerilmeleri altında kesitin yanal olarak deplasmanına ve dönmesine neden olur. Özellikle geniş açıklıklarda, narin kesitlerde ve yanal desteklerin yetersiz olduğu durumlarda, kiriş eğilme kapasitesine ulaşmadan önce stabilite kaybına uğrayarak göçebilmektedir. Yanal burulma ile birlikte gövde kesitinde buruşma meydana geldiğinde, bu durum yanal buruşmalı burkulma (YBŞB) olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.4. YBLB ve YBŞB göçme modları (El-Sawy vd. 2014)

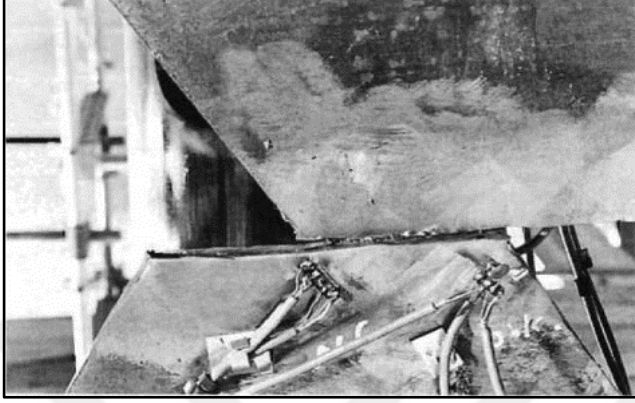
Kiriş serbest uzunluğu, başlık ve gövde narinlikleri, çelik kirişlerin maruz kalacağı burkulma modunu belirler. I enkesitli çelik kirişler, başlık burkulması ve gövde burkulmasını içeren lokal burkulma modları (LB) ile YBLB ve YBŞB modlarını içeren global burkulma modlarına maruz kalabilir. YBLB, lokal burkulma içermeyen salt global yanal burkulma modudur ve bu davranış şeklinde başlık ve gövdede burkulma meydana gelmez. LB ise, genel bir yanal hareket olmadan başlık ve/veya gövde plakasının burkulması şeklinde meydana gelir. YBLB ve LB'nin bir kombinasyonu olan YBŞB, başlık narinliğinin gövde narinliğine oranı azaldıkça belirginleşen, birleşik bir yanal burkulma şeklidir. YBŞB'de, kiriş yanal yönde ötelenir ve burulur, gövde plakası buruşur (Ertenli vd. 2021) (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. a) YBLB; b) LB; c) YBŞB (Ertenli vd. 2021)

2.3.4. Kaynaklı birleşim kopması

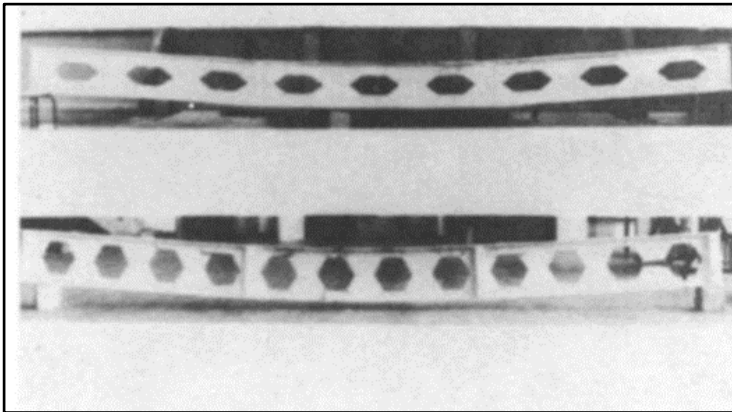
Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerde, kaynaklı ek yerinin kopması, yatay kayma gerilmelerinin kaynak kapasitesini aşması sonucu meydana gelir. Bu göçme modu, zayıf kaynak kalitesi, uygun olmayan kaynak parametreleri ve yetersiz kaynak boyu-kalınlığı gibi faktörlerden dolayı ortaya çıkabilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Kaynak bölgesinden kopma (Hussain ve Speirs 1971)

2.3.5. Basit eğilme

Saf eğilme durumudur. Kesitin kompakt olması durumunda gövde yüksekliği artırılmış kiriş T-kesitlerin alt ve üst parçaların çekme ve basınç gerilmeleri altında tam olarak plastikleşme olana 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 2.7).



Şekil 2.7. Basit eğilme (Halleux 1967)

2.3.6. Lokal burkulma

Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerde lokal burkulma, genellikle belirli bir bölgedeki yüksek stres konsantrasyonlarından kaynaklanan bir göçme modudur. Özellikle kiriş gövdesi boşluk çevresinde veya düşük kesit kalınlığına sahip bölgelerde bu durum ortaya çıkabilir (Şekil 2.8).

Gövde yüksekliği artırılmış kirişlerin tasarımında, yüksek streslere maruz kalan noktalarda lokal burkulma mekanizmasının anlaşılması ve değerlendirilmesi önemlidir. Bu noktalarda oluşan yüksek basınç gerilmeleri, kirişin belirli bölgelerinde malzeme deformasyonuna ve burkulmaya neden olabilir.

Yüklerin kiriş üzerinde taşınması sırasında, bu yüklerin belirli bölgelerde yoğunlaştığı durumlar olabilir. Boşluklar, yük transferi sırasında bu yoğunlaşmayı etkileyebilir ve bu durum, boşluk çevresinde yüksek basınç gerilmelerine neden olabilir.

Lokal burkulma, bu tür kirişlerde genellikle malzeme kalınlığı, geometrik konfigürasyon ve yük dağılımı gibi faktörlere bağlı olarak ortaya çıkar. Bu burkulma türü, belirli bölgelerdeki elastik ve plastik deformasyon davranışını etkiler ve bu da yapı elemanlarının taşıma kapasitesini etkiler.



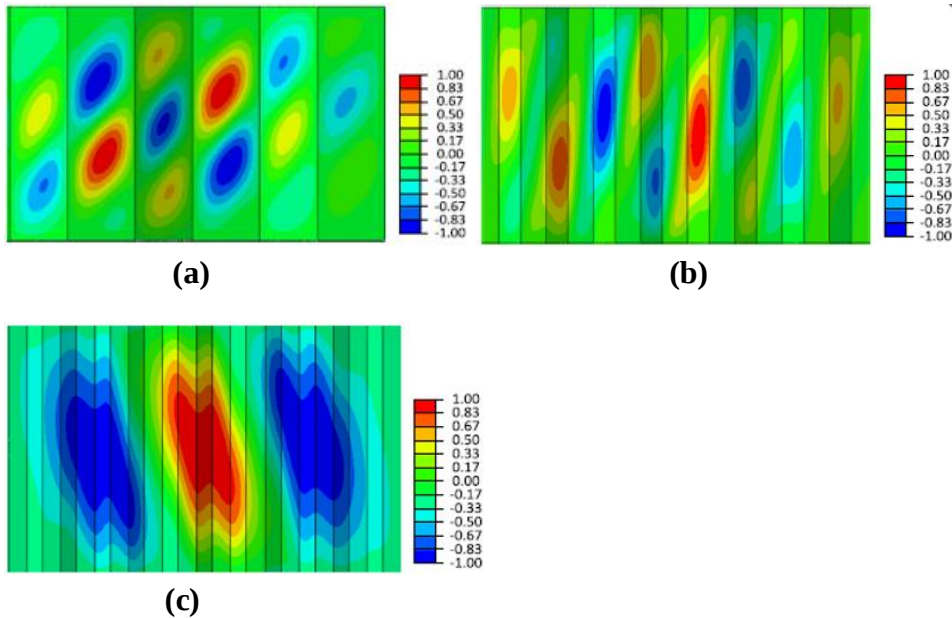
Şekil 2.8. Gövde boşluk çevresi lokal burkulma

2.4. Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin Göçme Modları

Ondülin gövdeli kirişlerin, dalgalı gövde yapısı nedeniyle eksenel rijitliği oldukça düşüktür ve genellikle gövdenin eğilme kapasitesine katkısı ihmal edilir. Normal gerilmelerin sadece flanşlar tarafından karşılandığı bu durum, literatürde "akordiyon etkisi" olarak adlandırılır. Gövde, sadece saf kayma gerilmelerini taşır ve gövdenin taşıma kapasitesi gövde kesme burkulması ya da akması ile kontrol edilir. Bu burkulma modları lokal gövde burkulması (local web buckling), global gövde burkulması (global web buckling) ve bunların kombinasyonu olan etkileşimli gövde burkulmasıdır (interactive web buckling). Yaygın olarak görülen diğer göçme modları ise yanal burulmalı burkulma (lateral torsional buckling) ve flanş lokal burkulmasıdır (flange local buckling).

2.4.1. Gövde kesme burkulması

Dalgalı gövde formuna sahip kirişler üzerine yapılan ilk araştırmalarda, lokal ve global kesme burkulma gibi farklı kesme burkulma mekanizmaları tanımlanmıştır. Daha sonra, lokal ve global kesme burkulma modları arasında yer alan etkileşimli kesme burkulma modu tanımlanmıştır. Şekil 2.9'da görüleceği üzere lokal kesme burkulması, kiriş gövde panelleri boyunca birden fazla lokal burkulma dalgasını içerirken, global kesme burkulması, gövde derinliği boyunca birden fazla panel üzerinde tek bir burkulma dalgasını içerir. Etkileşimli kesme burkulması ise lokal ve global kesme burkulma modları arasındaki etkileşimi içerir (Sebastiao ve Papangelis 2023). Relatif olarak küçük gövde yüksekliği ve kalınlığına sahip bu kirişlerde, elastik kritik burkulma modu lokal burkulma iken, relatif olarak büyük gövde yüksekliği ve kalınlığına sahip kirişlerde ise global burkulma meydana gelir (Wang vd. 2021).



Şekil 2.9. Sonlu elemanlar burkulma analizi; **a)** lokal kesme burkulması; **b)** etkileşimli kesme burkulması; **c)** global kesme burkulması (Wang vd. 2023)

2.4.2. Yanal burulmalı burkulma

Ondülin gövdeli kirişlerde bu göçme modu, düz gövdeye sahip geleneksel kirişlerde olduğu gibi eğilme altındaki kirişin basınç flanşının relatif olarak yüksek mertebe normal basınç gerilmelere maruz kalması sonucu, kesitin yan deplasmanı ve boyuna eksen etrafında dönmesi ile ortaya çıkar. Trapez gövde formuna sahip kirişler üzerinde bu göçme modunu ilk inceleyen araştırmacı olan Lindner (1990), yaptığı çalışmada dalgalı gövde formunun kesit burulma sabitini arttırdığını ve yanal burulmalı burkulma direncine katkısı olduğunu ifade etmiştir.

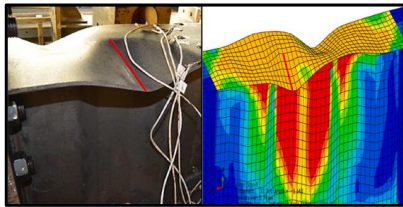
2.4.3. Flanş lokal burkulması

Eğilme momentinin etkisi altında, ondülin gövdeli kirişlerin üst flanşı basınç gerilmelerine maruz kalırken, alt flanş çekme gerilmeleri ile karşılaşır. Basınç altındaki flanşın boyuna eksen etrafında içe doğru eğilmesiyle bu durum ortaya çıkar ve kirişin yük taşıma kapasitesinde azalmaya neden olabilir. Yükleme koşulları, flanş genişlik/kalınlık oranı, malzeme özellikleri ve gövde konfigürasyonuna bağlı olarak basınç flanşı üzerinde bir dizi dalgalanma veya bölgesel burkulma meydana gelebilir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Basınç flanşı lokal burkulma (Tunca 2019)

Guo vd. (2015), genellikle düz gövdeli kirişlerin flanşlarının narinlik oranına bir limit getirilir. Bu, lokal flanş burkulması başlatan kritik gerilmenin, flanşların akmasından önce ulaşmamasını sağlar. Bu sınırlamanın, ondülin gövdeli kirişler için bir miktar gevşetilebileceği genel olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, dalgalı gövde formuna sahip kirişlerin basınç flanşı, genellikle düz gövdeli kirişlere kıyasla lokal burkulmaya daha duyarlıdır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Deneysel ve sayısal çalışma, lokal flanş burkulması (Jäger vd. 2017)

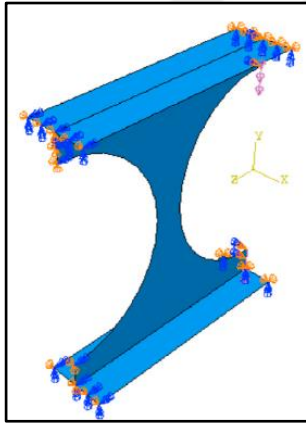
Johnson ve Cafolla (1997), lokal flanş burkulması üzerinde maksimum flanş genişliğinin etkisini incelemek amacıyla deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmada, düz formda olan bir gövdenin ondülin gövde ile değiştirilmesinin basınç flanşı stabilitesine olumsuz bir etkisinin olduğunu ifade etmektedir.

2.5. Literatür Araştırması

2.5.1. Dairesel boşluklu kirişler

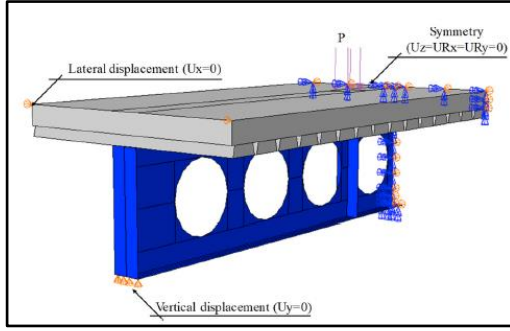
Limbachiya ve Shamass (2021) tarafından yayımlanan makalenin temel amacı, normal mukavemetli çelikten üretilen dairesel boşluklu kirişlerin (DBK) gövde (web-post) burkulma kesme dayanımını Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanarak öngörmektir. DBK kirişlerin uzun açıklıklar sağlama, yapısal maliyetleri azaltma ve tarihi binaları güçlendirme gibi avantajları vurgulanarak giriş yapılmıştır.

Çalışmada, 304 adet geliştirilmiş sonlu elemanlı sayısal model kullanılarak 16 farklı YSA modeli eğitilmiş, doğrulanmış ve test edilmiştir. Geometrik parametrelerin YSA girişi olarak kullanıldığı modellerin, sadece geometrik oranları içeren modellere kıyasla daha yüksek doğruluk seviyeleri sağladığı belirlenmiştir. Web-post burkulma dayanımını tahmin etmek için Levenberg-Marquardt algoritması ile eğitilen 4 nöronlu bir YSA modeli önerilmiştir. Geometrik parametreleri içeren YSA modellerinin daha yüksek doğruluk seviyeleri sunduğu ve nöron sayısının artmasıyla doğruluk seviyesinin arttığı tespit edilmiştir. YSA modelleri, deneysel verilere ve mevcut analitik analize göre gövde (web-post) kesme dayanımını başarıyla tahmin etmiştir. Özellikle, önerilen YSA tabanlı formül, sonlu eleman analizi gerektirmeyen bir araç olarak yapı mühendislerine DBK gövde (web-post) burkulma dayanımını doğru bir şekilde tahmin etme imkanı sunmaktadır (Şekil 2.12).



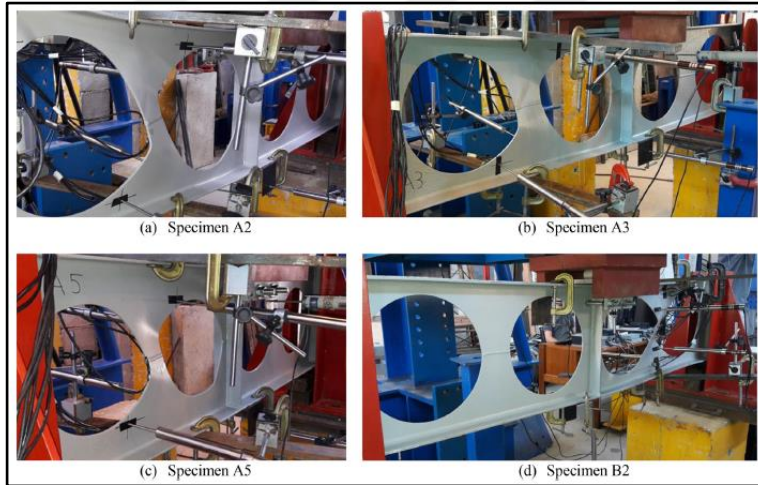
Şekil 2.12. Tekli gövde (web-post) modeli (Limbachiya ve Shamass 2021)

Ferreira vd (2021), kompozit dairesel boşluklu kirişlerin web-post burkulma direncini araştırmışlardır. Yaptıkları Sayısal model, literatürde deneysel testlere dayanarak doğrulanmıştır. Asimetrik ve simetrik kesitler üzerinde çeşitli web- post genişliğinin dairesel boşluk çapına oranları ile dairesel boşluk çapının kiriş yüksekliğine oranlarını içeren bir parametrik çalışma yürütülmüştür. Sonuçlar, bu çalışmada kullanılan analitik prosedürlerle karşılaştırılmıştır. Modellerde, gövde (web-post) burkulması ve Vierendeel mekanizması gözlemlenmiştir. End-post genişliği ve betonarme döşeme, dairesel boşluklu kirişlerin nihai davranışına önemli ölçüde katkıda bulunmuştur (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Kompozit dairesel boşluklu kiriş modeli (Ferreira vd. 2021)

Grilo vd (2018), dairesel boşluklu çelik kirişlerin yapısal davranışını inceleyerek, özellikle gövde (web-post) burkulması üzerine odaklanmış ve bu durum için kayma direncini hesaplamak amacıyla yeni bir formülasyon önermiştir. Çalışmada, tam ölçekli çelik dairesel boşluklu kirişler üzerinde deneysel testler gerçekleştirilmiş, dikey ve yatay deplasmanlar ile gövde (web-post) deformasyonları ölçülmüştür. Ayrıca ABAQUS yazılımında geliştirilen sayısal modellerle parametrik analizler yapılmıştır. Bu sayısal modellerden elde edilen 597 durum üzerinden, kirişlerde gövde (web-post) burkulma için kayma direncini belirlemek amacıyla direnç eğrilerine dayanan yeni bir formülasyon önerilmiştir. Önerilen formülasyon, geometri ve malzeme özelliklerinin çeşitli durumlarına uyarlanarak doğrulanmış ve de literatürdeki çalışmalara göre daha doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir (Şekil 2.14).



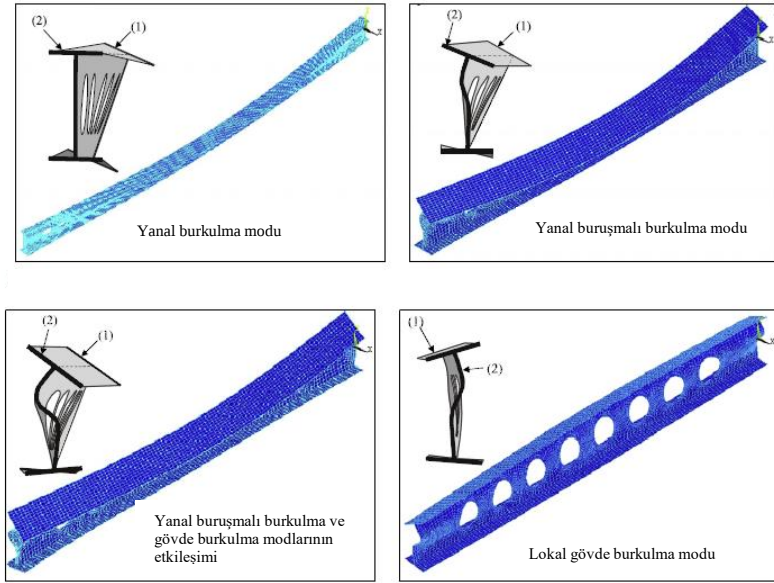
Şekil 2.14. Gövde (web-post) göçme mekanizması (Grilo vd 2018)

Khatri vd. (2021) yaptıkları çalışmada, üniform yük altında yanal desteksiz dairesel boşluklu çelik kirişlerin elastik moment gradyan faktörü (C_b) üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma, farklı kesit tipleri, dairesel boşlukların boyutu ve aralığı için basit destekli kirişler üzerinde yürütülmüştür. Ayrıca, dairesel boşluklu çelik kirişin elastik burkulma davranışı üzerinde web ve flanş narinliğinin etkisi de araştırılmıştır. Yük yüksekliğinin C_b üzerindeki etkisini belirlemek için, üç farklı olası yük pozisyonu dikkate alınmıştır; bunlar, üniform olarak kesme merkezine, üst flanş ve alt flanşta uygulandığı durumlar olup, sayısal sonuçlar üniform moment koşulu altındaki standart durumla karşılaştırılmıştır.

Araştırma sonuçlarına göre, dairesel boşluklu çelik kirişin web deliklerinin varlığı, kirişlerin elastik stabilitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Dairesel boşluklu kirişler için sayısal olarak elde edilen Cb faktörleri, bu kirişlere uygulanan “Structural Steel Stability Research Council (SSRC)” kılavuzundaki denklemlerle elde edilen faktörlerle karşılaştırılmıştır. Kısa açıklıklı ve narin gövdeli dairesel boşluklu kısa açıklıklı kirişler için düşünülen üç farklı yük pozisyonu için sayısal analizden elde edilen Cb faktörleri ile SSRC kılavuzlarındaki denklemler arasında önemli bir farklılık gözlemlenmiştir. Bu farklılık, dairesel boşluklu çelik kirişin stabilitesinin, SSRC kılavuzlarının formülasyonlarında ihmal edilen ciddi web distorsiyonu ile ilişkilendirilmektedir. SSRC kılavuzlarındaki denklemler, daha uzun açıklıklı kirişlerde geçerli olan yanal burulmalı burkulma modunu kontrol eden durumlar için uygundur. Dairesel boşluklu kirişin üst flanşına uygulanan üniform yük, en kritik koşul olup en düşük Cb faktörlerine neden olmaktadır.

Rajana vd (2020) tarafından yapılan çalışma, dairesel boşluklu çelik kirişlerin eğilme altındaki elastik ve inelastik burkulma davranışlarını inceleyen geniş kapsamlı bir parametrik çalışmayı sunmaktadır. Hedef, çeşitli geometrik parametrelerin etkisini araştırmak ve bir sinir ağı temelli formülü doğrulamak ve eğitmek için kapsamlı veri üretmektir. Toplamda 102,060 sonlu eleman analizi, Python kullanılarak mass sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıç geometrik kusurları, üretim kaynaklı artık gerilmeler, boşluk çapı, web-post genişliği, web-post yüksekliği, flanş genişliği, flanş kalınlığı, end-post genişliği ve kiriş açıklığı ile bunların kombinasyonlarının etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, dairesel boşluklu kirişlerin kritik elastik burkulma yükünün basınç flanşının yanal hareketi ile ilişkili olduğu ve en kritik parametrelerin web kalınlığı ve flanş geometrisi olduğunu göstermiştir. İnelastik analizden elde edilen sonuçlara göre, gövde boşluk geometrisi ve konumu, göçme yük kapasitesini etkilemektedir. Ayrıca çalışma, çelik dairesel boşluklu kirişlerin genel davranışını açıklamak, tasarım yönergeleri ile karşılaştırmak ve önemli parametreleri vurgulamak adına önemli bir katkı sağlamaktadır.

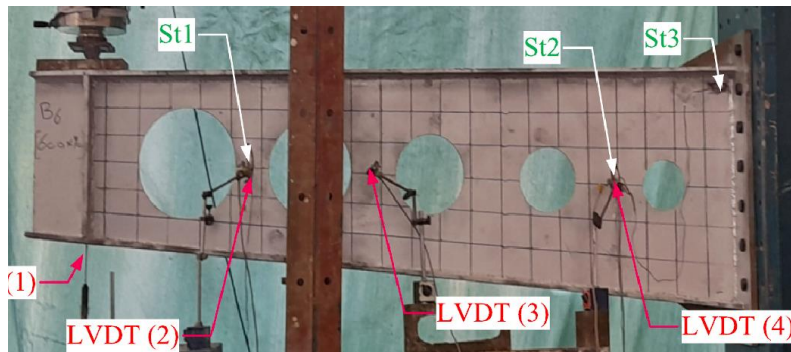
Sweedan (2011) tarafından yapılan çalışmada, dairesel boşluklu çelik kirişlerin yanal stabilitesini sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma, farklı kesit yükseklikleri, farklı açıklıklar ve gövde boşluk konfigürasyonları yelpazesi olan basit destekli I-form dairesel boşluklu çelik kirişlerin sonlu eleman modellemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman sonuçları, dolu gövdeye sahip geleneksel kirişlerden farklı olarak, dairesel boşluklu kirişlerin moment gradyan katsayısının (Cb) kiriş geometrisi ve narinliği tarafından belirgin bir şekilde etkilendiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Cb katsayısı, gövde boşluk konfigürasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Kiriş narinliği azaldıkça, web distorsiyonu artar ve bu da düşük Cb değerleri ile ilişkilendirilen yanal distorsiyonel burkulma moduna yol açar. Kısa açıklıklı kirişlerde, Cb katsayısında belirgin bir azalma gözlenir, bu durum tepkinin yanal yerel burkulma modları tarafından domine edildiğini gösterir. Dairesel boşluklu kirişler için κ_{LB} moment modifikasyon faktörünün doğru tahminini sağlamak için basitleştirilmiş bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen κ_{LB} faktörü, sadece yanal burkulma modlarına dayanan ampirik bir formülle elde edilmiştir. Önerilen yöntem, dairesel boşluklu kirişlerin torsiyonel/distorsiyonel burkulmasının kritik momentini doğru ve güvenli tarafta bir şekilde değerlendirmeye olanak tanır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Dairesel boşluklu kiriş göçme modları (Sweedan 2011)

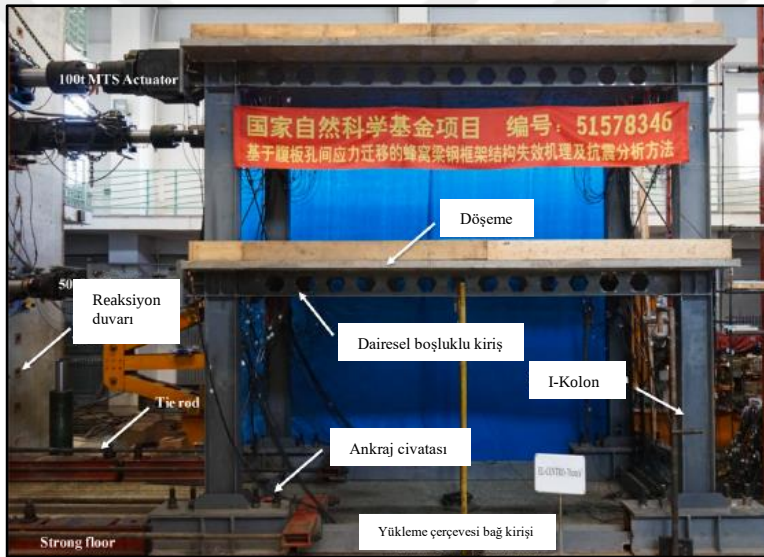
Sweedan ve El-Sawy (2011) tarafından yürütülen çalışma, çelik dairesel boşluklu kiriş-kolon elemanlarının elastik lokal burkulma özelliklerini incelemektedir. Boşluklu gövde plakalarının elastik burkulma yükleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Problemi basitleştirmek amacıyla, flanşlar ile dairesel boşluklu gövde arasındaki etkileşim, gövdeyi çok sayıda dairesel boşluğa sahip uzun bir levha olarak modellenerek simüle edilmiştir. Analizler, plaka uzunluğu, genişliği, boşluk çapı ve aralığı gibi farklı geometrik parametrelerin elastik burkulma yükü üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelemektedir. Bu bulgular, dairesel boşluklu kiriş-sütun elemanlarının tasarımında geometrik parametrelerin seçimine ilişkin önemli bir anlayış sunmaktadır.

Amrous vd. (2023) tarafından yürütülen çalışma, çelik yapılarda kullanılan dairesel boşluklu kirişlerin konik forma sahip olanlarının deneysel davranışını incelemektedir. Literatürdeki eksikliği gidermek adına yapılan deneysel araştırma, altı konik örneğin farklı dairesel boşluk konfigürasyonlarını içermektedir. Elde edilen sonuçlar, konik açılarının ve optimize edilmiş boşluk çaplarının kirişlerin burkulma davranışını etkilediğini göstermektedir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Konik dairesel boşluklu kiriş (Amrous vd. 2023)

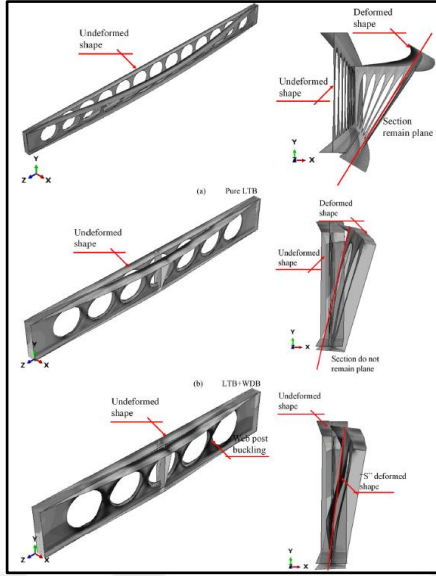
Dong vd. (2021) tarafından yürütülen deneysel çalışma, petek boşluklu çelik kirişler ve kompozit beton döşemelerden oluşan tek açıklıklı iki katlı bir çelik çerçevenin deprem performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, çerçevenin kirişleri, birleşim yerleri, kolonları ve döşemeleri detaylı bir şekilde ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Göçme modları ve hasar mekanizmaları incelenmiş, yapıların histeretik davranışı, dayanıklılık, enerji emilimi ve rijitlik azalması analiz edilmiştir. Beton döşemelerin histeretik yük altındaki kompozit etkileri de değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yapıların tam bir histeretik döngü sergilediğini ve enerji emilimi konusunda iyi bir kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışma çerçevenin göçme modunu ve plastik mafsalları oluşumunu detaylı bir şekilde açıklamaktadır. Beton döşemeler, dairesel boşluklu kirişlerin köşelerindeki çatlak yayılmasını azaltarak histeretik eğri davranışını iyileştirmiştir. Betonarme döşemeler, petek kirişin üst flanşı üzerindeki stresi azaltarak deformasyonu sınırlamış, bu da maksimum taşıma kapasitesini artırmış, kirişin rijitliğini korumuş ve dayanıklılığı ve enerji emilimini artırmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Kompozit petek boşluklu kiriş test düzeneği (Dong vd. 2021)

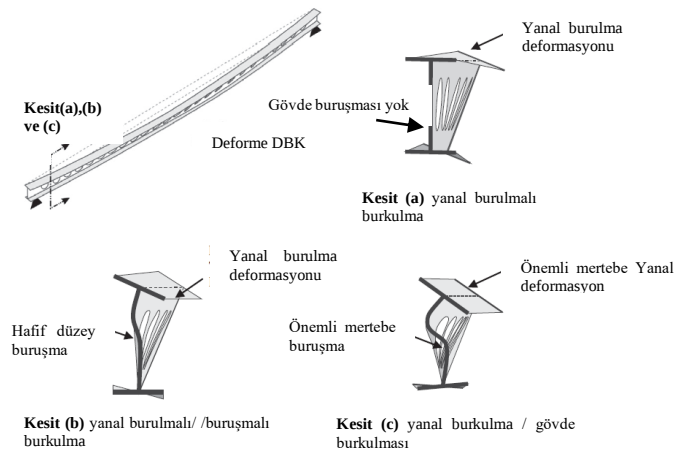
Ferreira vd. (2022) yaptıkları çalışma, çelik dairesel boşluklu kirişlerin yanal burulmalı burkulma dayanımını öngörmek amacıyla bir Yapay Sinir Ağı (YSA) formülü geliştirme hedefi taşımaktadır. Başlangıçta, deneysel testlerle doğrulanan sonlu eleman modeli üzerinden bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Toplamda 768 model kullanılarak YSA formülü eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar, YSA modelinin yedi nöron içeren bir yapı ile hücresel kirişlerin yanal burulmalı burkulma direncini, aynı zamanda web-post burkulma veya web distorsiyonel burkulma modlarıyla birlikte başarıyla tahmin edebildiğini göstermektedir.

Ayrıca, YSA tabanlı formülün analitik modellerle ve YSA tarafından tahmin edilen denklemlerle karşılaştırılması yapılmıştır. Araştırma, YSA modelinin bu kirişlerin yanal burulmalı burkulma dayanımını doğru bir şekilde tahmin edebildiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, YSA tabanlı formülün tasarım süreçlerinde güvenilir bir araç olarak benimsenmesini desteklemektedir (Şekil 2.18).



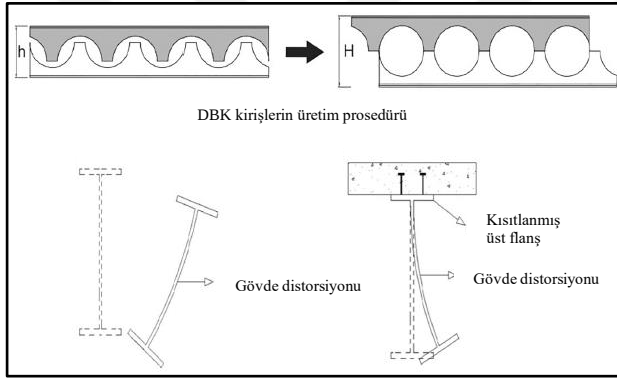
Şekil 2.18. Dairesel boşluklu kiriş göçme modları (Ferreira vd 2022)

El-Sawy vd. (2014) yaptıkları makalede, çelik dairesel boşluklu kirişlerin inelastik eğilme altındaki moment gradyan faktörünü incelemektedir. Yapılan analizlerde, üç boyutlu doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli kullanılarak, bu kirişlerin yerel ve genel stabilite kayıpları durumlarında inelastik davranışları araştırılmıştır. Çalışma, kesitteki lokal deformasyonlar ile yanal torsiyonel/distorsiyonel burkulma modları arasındaki etkileşimi dikkate alarak geliştirilen modelin literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, çeşitli geometrik parametrelerin, özellikle kesit boyutları, flanş genişliği ve kalınlığı, gövde yüksekliği ve kalınlığı, boşluk boyutu ve aralığı gibi faktörlerin, kirişlerin inelastik stabilitesi üzerindeki etkisi kapsamlı bir parametrik analizle değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın elde ettiği sonuçlar, dairesel boşluklu kirişlerin davranışı hakkında daha derinlemesine anlayış sağlayarak, moment gradyan faktörünün doğru bir şekilde tahmin edilmesine ve dolayısıyla bu özel tip çelik kirişlerin burkulma kapasitesinin kesin bir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır (Şekil 2.19).



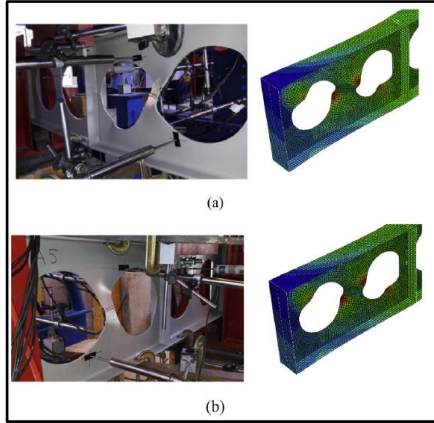
Şekil 2.19. Dairesel boşluklu kiriş göçme modları (El-Sawy vd. 2014)

Moghbeli ve Sharifi (2021), dairesel boşluklu çelik kirişlerin yanal-burulmalı burkulma ve gövde buruşmasına maruz kaldığı durumlarda, bu kirişlerin yanal-burushmalı burkulma kapasitesini değerlendirmek amacıyla yeni tahmin denklemleri geliştirmeyi hedeflemektedir. Lineer olmayan sonlu eleman analizi temel alınarak yapılan kapsamlı simülasyonlar (660 örnek), hücresel çelik kirişlerin burushmalı burulma modunu simüle etmek üzere gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma, bu kirişlerin yanal burushmalı burkulma kapasitesini etkileyebilecek parametrelerin derinlemesine incelendiği bir parametrik analiz içermektedir. Gene expression programming (GEP) ve nonlinear multiple regression (NMR) algoritmaları, kirişlerin göçme moment kapasitesini ölçmek için tahmin modelleri olarak kullanılmıştır. GEP ve NMR modelleri için kullanılan veriler, başlangıçta gerçekleştirilen sonlu eleman analizi simülasyonlarından elde edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, önerilen formüllerin AS4100, EC3 ve AISC kodlarından elde edilen tahminlerle karşılaştırıldığında oldukça doğru ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, dairesel boşluklu kirişlerin yanal-burushmalı burkulma modunu vurgulayan sayısal bir analiz içermektedir ve GEP ve NMR metodolojilerinin bu modu değerlendirmedeki etkinliğini araştırmaktadır (Şekil 2.20).



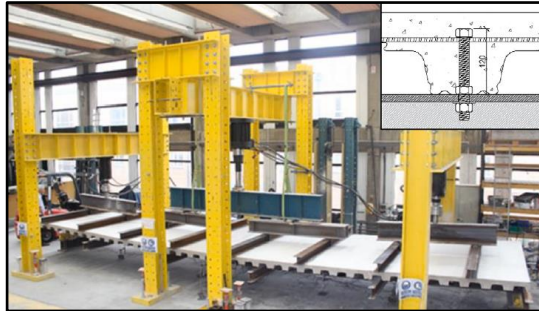
Şekil 2.20. Dairesel boşluklu kiriş gövde distorsiyonu (Moghbeli ve Sharifi 2021)

Shamass ve Guarracino (2020) tarafında yapılan çalışma, dairesel boşluklu çelik kirişlerin davranışını çeşitli geometrilerde normal ve yüksek mukavemetli çelikten yapılmış kirişlerle karşılaştırmalı olarak inceleyen kapsamlı bir sayısal analiz sunmaktadır. Yapılan sonlu eleman modelleri, daha önce yapılan deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Web-post kesme dayanımının belirlenmesi için mevcut tasarım prosedürlerinde bir uzlaşma olmaması nedeniyle, elde edilen sayısal sonuçlar temelinde web-post burkulma moduna etkileyen faktörleri vurgulamak amacıyla basit bir mekanik model önerilmektedir. Önerilen analitik formülasyon, incelenen geometrilerin tamamı için ve normal ile yüksek mukavemetli çelikler için sonlu elemanlar sonuçları ile uyumlu bir şekilde geniş bir yelpazede çalışma yeteneğine sahiptir. Bu nedenle, önerilen analitik prosedürün hem normal hem de yüksek mukavemetli çelikten yapılan dairesel boşluklu kirişlerin web-post burkulma durumunu öngörmek için güvenilir bir tasarım yönteminin temeli olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Şekil 2.21).



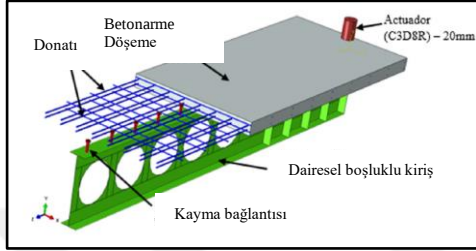
Şekil 2.21. Web-post burkulma durumu (Shamass ve Guarracino 2020)

Dai vd. (2023) tarafından kaleme alınan makale, geleneksel çelik-beton kompozit kiriş sistemlerindeki yapım zorluklarına çözüm olarak ortaya çıkan demonte edilebilen kesme bağlantıları kullanılan yeni bir kompozit kiriş sisteminin sayısal analizini sunmaktadır. Dairesel boşluklu kirişler ile yapılan deneysel çalışmaya göre, bu kompozit kiriş sistemi, sökme, yeniden montaj ve eleman yeniden kullanımını mümkün kılarak yük taşıma kapasitesini olumsuz etkilememektedir. Sayısal analiz bölümünde, ABAQUS yazılımı kullanılarak geliştirilen sonlu elemanlar modeli, önceki deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla doğrulandı. Parametrik çalışma, beton dayanımı, kesme bağlantısı düzenlemeleri ve çelik kiriş kesit asimetrisi gibi faktörlerin kompozit kiriş sisteminin yük taşıma kapasitesine etkilerini incelemiştir. Analiz ve karşılaştırma, bu tür kesme bağlantılarının davranışına daha derin bir anlayış sağlamıştır. Bu sayısal çalışma, demonte edilebilen kesme bağlantıları kullanılan kompozit kiriş sisteminin yapısal avantajlarını vurgulamaktadır. Giriş bölümü, inşaat sektörünün çevresel etkilerini vurgulayarak, geleneksel kesme bağlantılarının çevresel sürdürülebilirliği sınırlamasına dikkat çeker. Yeni demonte edilebilen kesme bağlantılarının kullanımının, malzeme ve yapısal elemanların yeniden kullanımını destekleyerek çevresel sürdürülebilirliği artırabileceği belirtilmiştir. Sonuçlar bölümü, yapılan deneysel çalışmanın ardından ABAQUS yazılımı kullanılarak geliştirilen sonlu elemanlar modelinin başarıyla doğrulandığını ve çeşitli parametrelerin yapısal davranışına etkilerini analiz etmenin sonuçlarını sunmaktadır. Steel Construction Institute (SCI) yönteminin kullanılmasının, farklı beton dayanımları, kesme bağlantı düzenlemeleri ve kesit asimetri oranlarına sahip kompozit kirişlerin orta açıklıkta plastik moment direncini tahmin etmek için başarılı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Dairesel boşluklu kompozit kiriş test düzeneği (Dai vd. 2023)

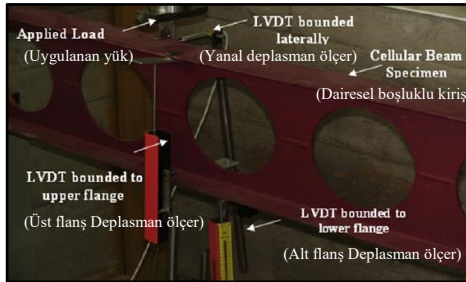
Oliveira vd (2022) tarafından yapılan çalışma, çelik-beton kompozit dairesel boşluklu kirişlerin ters momente maruz kaldıklarında gösterdikleri davranışı incelemeyi amaçlamaktadır. ABAQUS yazılımı kullanılarak geliştirilen sonlu eleman modeli ile I-kiriş boyutları, serbest açıklık, ters moment dağılımı ve dairesel boşluklu kirişlerin boşluk çapı ve web-post genişliği gibi belirleyici geometrik parametrelerini içeren 360 farklı model analiz edilmiştir. Sonuçlar, sayısal ve analitik yöntemler arasında belirgin farklılıklar olduğunu göstermiştir. Hücresel kirişlerin taşıma kapasitesi ve göçme modları üzerinde belirgin bir etkisi olan temel parametreler arasında I-kiriş boyutlarının en etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Dairesel boşluklu kompozit kiriş sayısal model (Oliveira vd. 2022)

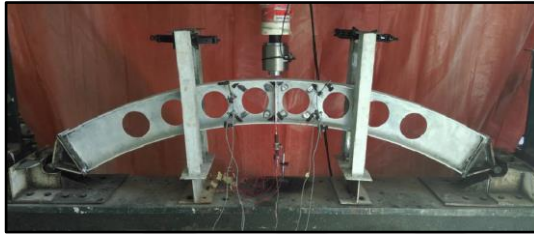
Erdal ve Saka (2013) tarafından yapılan çalışma, dairesel boşluklu kirişlerin optimize edilmiş tasarımlarının nihai yük taşıma kapasitelerini belirlemek ve göçme modlarını anlamak için kapsamlı bir deneysel ve analitik çalışma sunmaktadır. On iki adet tam ölçekli olmayan dairesel boşluklu kiriş üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Bu kirişler NPI_CB_240, NPI_CB_260 ve NPI_CB_280 I-kirişlerini içermekte olup, her bir örnek için dört test yapılmıştır. 3000 mm başlangıç açıklıklarına sahip bu optimum tasarlanmış kirişler, üst flanşın ortasında etki eden bir nokta yüküne maruz bırakılmıştır. Kirişlerin optimum tasarımı için harmoni arama yöntemi kullanılmış ve tasarım kısıtlamaları BS 5950 hükümleri uygulanmıştır. Tasarım sürecinde optimizasyon tekniklerinin kullanılması, bu kirişlerin performansını iyileştirmek için etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmanın son bölümü, dairesel boşluklu çelik kirişler üzerinde sayısal bir çalışma gerçekleştirmeye odaklanmakta olup, sonlu eleman analizi kullanılarak deneysel sonuçları doğrulamak ve bu kirişlerin web-post burkulma ve vierendeel eğilme gibi göçme modlarının doğrusal olmayan davranışını incelemektedir. Elde edilen sonuçlar, sonlu eleman analizi sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermiştir (Şekil 2.24).



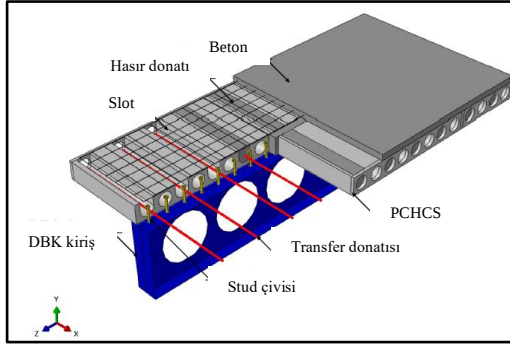
Şekil 2.24. Dairesel boşluklu çelik kiriş test düzeneği (Erdal ve Saka 2013)

Zaher vd. (2018) tarafından yapılan çalışma, çatı kirişleri olarak kullanılan ve çeşitli pratik avantajlara ve mimari görünüm gereksinimlerine sahip olan kemer formundaki dairesel boşluklu çelik kirişlerin performansını ele almaktadır. Dört tam ölçekli örnekten oluşan deneysel bir program gerçekleştirilmiştir. Deneylerde mafsallı davranış sergileyecek mesnetleri olan kemer formundaki kiriş, tek noktadan yükleme altında test edilmiştir. Makalede imalat, malzeme özellikleri, sınır koşulları ve deney kurulumu detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Deneysel araştırma, dairesel boşlukların, alt açılarının ve eğrilik yarıçaplarının etkilerini incelemek için yapılmıştır. Web-post burkulma dayanımı, deneysel örneklerin kritik burkulma dayanımını hesaplamak için literatürden alınan iki model kullanılarak hesaplanmıştır. Düz hücreli kirişler için önerilen analitik model, eğrisel forma sahip dairesel boşluklu çelik kirişlerin web-post dayanımı için daha güvenli tarafta değerler vermiştir. Son olarak, kemer formundaki bu kirişlerin davranışını analiz etmek için bir sonlu eleman modeli önerilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar modeli, test edilen örneklerin nihai yükleri, kritik burkulma yükleri ve göçme modlarını doğru bir şekilde tahmin etmiştir (Şekil 2.25).



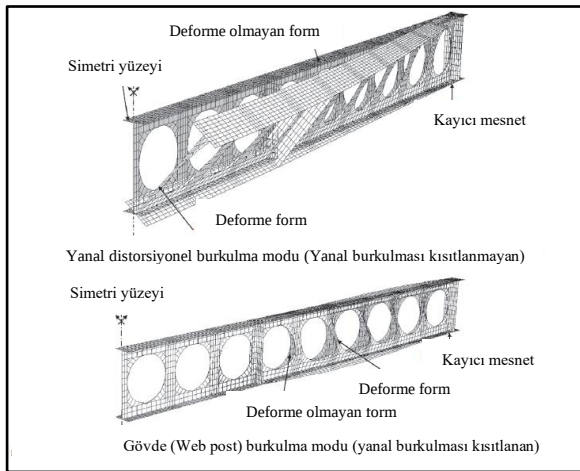
Şekil 2.25. Kemer form dairesel boşluklu kiriş test düzeneği (Zaher vd. 2018)

Ferreira vd. (2021) tarafından yapılan çalışma, kompozit dairesel boşluklu kirişlerin, prekast beton plakları kullanılarak elde edilen sonlu elemanlar analizi ile davranış tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Doğrusal olmayan analizlerle geliştirilen bir sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Parametrik bir çalışma, simetrik ve asimetrik kesitleri bu kompozit kirişleri inceleyerek gerçekleştirilmiştir. Web-post genişliği, boşluk çapı ve betonarme döşeme varlığı gibi temel parametreler değiştirilmiştir. Toplamda 120 analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yerinde dökme ile uygulanan tipik kompozit plaka modelleri ile karşılaştırılmıştır. Simetrik kesitler için, prekast döşeme dikkate alındığında, plastik mafsallı oluşumuyla ilgili bazı gözlemler ortaya çıksa da, hakim göçme modu web-post burkulması olarak tespit edilmiştir. Asimetrik kesitler için, hakim göçme modu, plastik mafsallı oluşumu ile birlikte web-post burkulması ve bunu takip eden kesme bağlantılarının kopması olarak görülmüştür. Her iki durumda da, simetrik ve asimetrik kesitleri dikkate alındığında, prekast plakanın üst kısmında aşırı çatlama gözlemlenmiştir. Web-post genişliği, boşluk çapı ve beton kaplama varlığı gibi parametrelerde yapılan değişiklikler neticesinde prekast döşeme olarak tasarlanan modeller yerinde dökme beton plaka olarak tasarlanan modellerden daha verimli olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. Prekast döşeme modeli (Ferreira vd. 2021)

Ellobody (2012), normal ve yüksek mukavemetli dairesel boşluklu çelik kirişlerin birleşik burkulma modları altındaki doğrusal olmayan analizini ele almaktadır. Geometrik kusurların, artık gerilmelerin ve dairesel boşluklu çelik kirişlerin flanş ve gövde bölümlerinin malzeme kusurlarının başlangıç durumu, 3-D doğrusal olmayan bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Bu doğrusal olmayan sonlu eleman modeli, farklı uzunluklara, kesitlere, yükleme koşullarına ve göçme modlarına sahip dairesel boşluklu çelik kirişleri üzerinde yapılan deneylerle doğrulanmıştır. Bu kirişlerin göçme yükleri, yük-deplasman ilişkileri ve göçme modları, sonlu eleman analizi ile tahmin edilmiştir. Doğrulan sonlu eleman modeli kullanılarak değişen kesit geometrileri, kiriş uzunluğu ve malzeme kalitesinin kirişlerin dayanımı ve burkulma davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen geniş kapsamlı bir parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmanın sonuçları, web distorsiyonel ve web-post burkulma modları nedeniyle başarısız olan kirişlerin göçme yüklerinde önemli bir azalma gösterdiğini ortaya koymuştur. Aynı zamanda, yüksek mukavemetli çelik kullanımının daha az ince kirişlerin göçme yüklerinde önemli bir artış sunduğu gösterilmiştir. Sonlu eleman modelinden elde edilen göçme yükleri, Avustralya Standartları tarafından belirlenen çelik kirişler için yanal burulmalı burkulma altında genellikle güvenli tarafta olduğunu, etkileşimli web distorsiyonel ve web-post burkulma nedeniyle göçen kirişler için güvenli tarafta olmadığını ve yüksek mukavemetli hücresel çelik kirişler için ise oldukça güvenli tarafta olduğunu göstermektedir (Şekil 2.27).

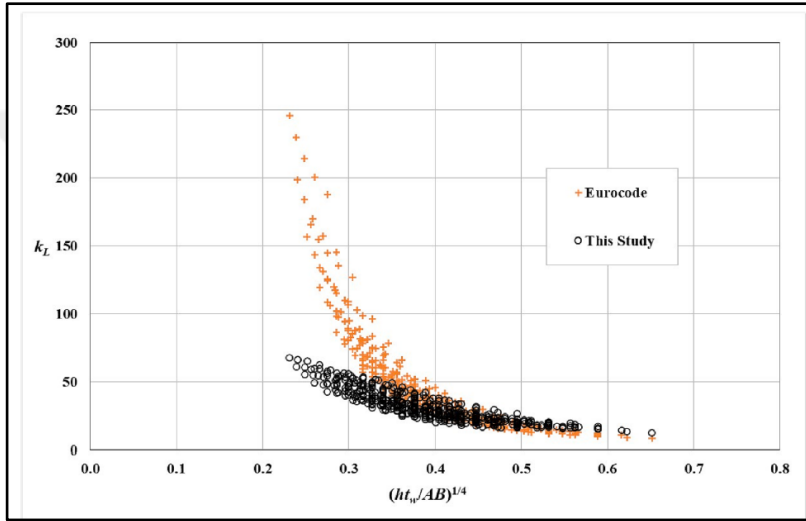


Şekil 2.27. Dairesel boşluklu kiriş göçme durumları (Ellobody 2012)

2.5.2. Ondülin gövdeli kirişler

Sebastiao ve Papangelis (2023) ondülin gövdeli kirişlerin elastik yerel kesme burkulması davranışını incelemek amacıyla kapsamlı bir sonlu eleman analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler, sinüzoidal formda sahip gövdenin geometrik özelliklerinin, özellikle genlik, dalga boyu, gövde yüksekliği ve kalınlığının, elastik yerel kesme burkulma gerilmesi üzerindeki etkisini ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, Eurocode'un bu kirişler için bazı durumlarda yetersiz olduğunu göstermektedir (Şekil 2.28). Ayrıca, makalede sunulan denklemin, bu tür kirişlerin elastik yerel kesme burkulma gerilmesinin belirlenmesinde tasarımcılara yardımcı olabileceği vurgulanmıştır.



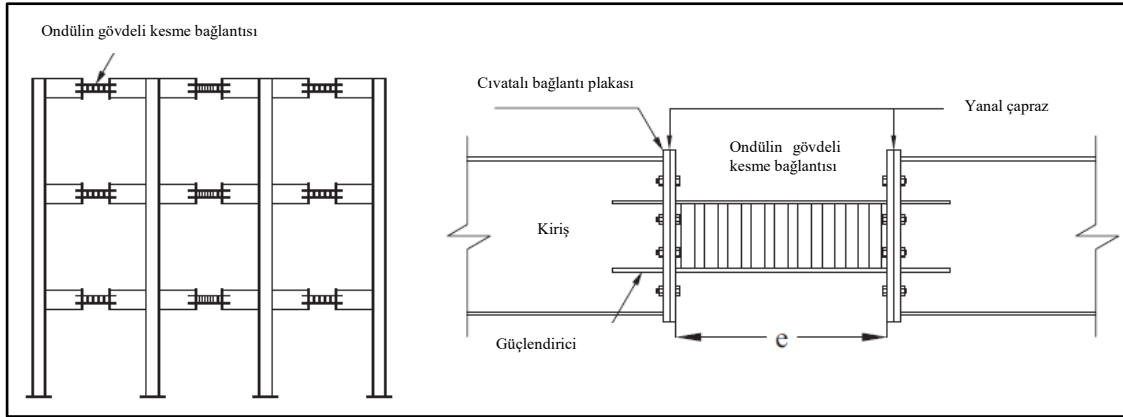
Şekil 2.28. Kesme burkulması katsayısının Eurocode ile karşılaştırılması (Sebastiao ve Papangelis 2023)

Hao vd. (2023) sanat yapılarında sıkça kullanılan gömülü ondülin çelik kemerlerin yük taşıma kapasitesini doğru bir şekilde değerlendirebilmek adına kapsamlı bir sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Zemin ile kemer arasındaki etkileşim nedeniyle tasarım özelliklerinin doğru bir şekilde yapılamamasını vurgulamışlardır. Bu araştırma ile ondülin çelik kemerlerin hem lokal burkulması hem de elastik global burkulma direncini dikkate alarak detaylı bir tasarım önerisi sunmuşlardır (Şekil 2.29).



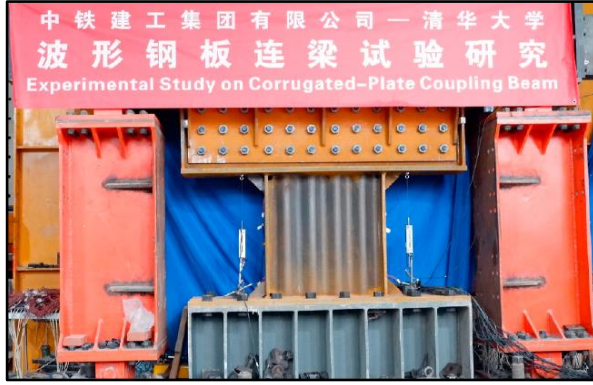
Şekil 2.29. Ondülin Çelik kemerler (Hao vd. 2023)

Mansouri ve Sharif (2022), tüp-çerçeve yapılarında derin kirişlerin uygulanmasının kısıtlandığı durumlarda kiriş orta açıklığında değiştirilebilir, oluklu forma sahip kesme bağlantısının kullanılmasını önermektedir. Yapılan analizler, bu önerilen sistemin geleneksel çerçeve sistemlerine göre daha düşük mukavemet kaybı, daha yüksek deformasyon ve enerji dağılım kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 2.30).



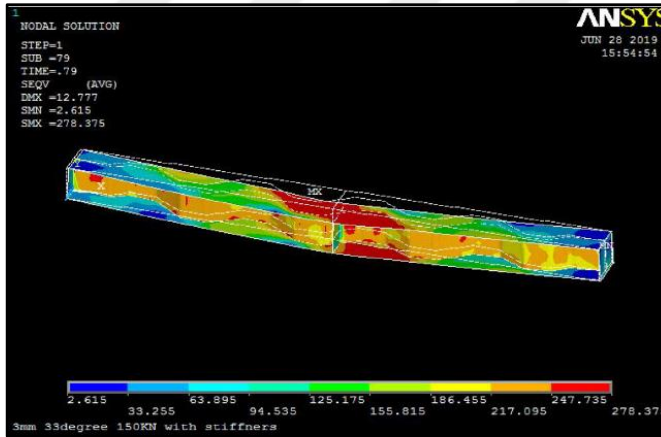
Şekil 2.30. Oluklu forma sahip kesme bağlantısı (Mansouri ve Sharif 2022)

Jia vd. (2022), ondülin gövdeli çelik kirişlerin perde duvarlarını birleştiren bağ kirişleri olarak kullanımı üzerine çalışma yapmışlardır (Şekil 2.31). Yapılan deneysel testler ve sayısal analizler, bu kirişlerin ince bir gövdeye sahip olmalarına rağmen yüksek kesme kapasitesi, yüksek enerji emme yeteneklerine sahip olduğunu göstermiştir.



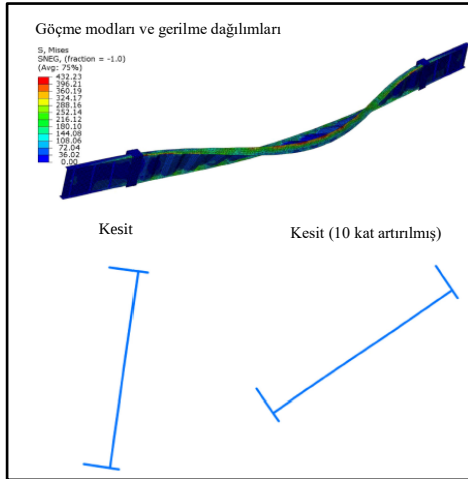
Şekil 2.31. Test düzeneği (Jia vd 2022)

Morkhade ve Gupta (2022) yaptıkları numerik çalışma ile trapez gövdeye sahip 2 metre açıklıklı çelik kirişlerin trapez formun flanş ile yaptığı kıvrım açısının kirişin yük taşıma kapasitesine etkisini incelemişlerdir. Bu bağlamda 30, 33, 36, 39, 42 ve 45 derecelik açılarda modellenen gövdeler ile yapılan sonlu elemanlar analizlerinde 45°'lik kıvrım açısının diğer açılara kıyasla daha iyi performans sergilediği ve düz formdaki çelik gövdeli kirişlerin trapez gövdeli kirişlere göre ortalama %22 daha fazla kapasitede olduğunu sonlu elemanlar analizi ile göstermişlerdir. Araştırma ayrıca yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkide gövde yüksekliğinin kalınlığına (h/tw) oranının büyük rol oynadığını ve yük etki noktalarında berkitme levhalarının kullanımının lokal burkulmayı engellediği ve burkulma direncini artırdığı belirtmişlerdir (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Trapez gövdeli kiriş sonlu elemanlar analizi (Morkhade ve Gupta 2022)

Hassanein vd. (2022) yaptıkları çalışmada gövdesi trapez formda olan kirişlerin yanal burulmalı burkulması üzerine sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirmişlerdir. ABAQUS yazılımı kullanılarak yapılan 108 farklı modelleme çalışması, kiriş uzunluğu, gövde boyutları, trapez gövde kıvrım boyutları, flanş boyutları ve çeşitli çelik sınıflarının etkilerini değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar, kiriş uzunluğundaki artışın dayanımı azalttığını, gövde derinliğinin dayanım üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu fakat gövde kalınlığının kapasite artışında ciddi bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca, kritik yanal burulmalı burkulma tasarım gerilmesinin sonuçları, sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla uyumlu hale getirmek için düzeltmeler gerektirdiği bulunmuştur (Şekil 2.33).



Şekil 2.33. Yanal burulmalı burkulma göçme modu örneği (Hassanein vd. 2022)

Alikhanifard vd. (2022) trapez gövde formuna sahip çelik kirişler için yeni bir kesme dayanım modeli geliştirmiştir. Bu model, gövdenin lokal ve global burkulma modlarını etkileşimli bir şekilde dikkate alarak EN 1993-1-5 kodunu geliştirmekte ve kirişin kesme dayanımını daha güvenilir bir şekilde hesaplamaktadır. Çalışma, geniş bir geometri ve malzeme özellikleri yelpazesini kapsayan kapsamlı bir sonlu eleman analizi ve istatistiksel analizle desteklenmiştir. Önerilen modelin literatürdeki diğer modellere göre daha güvenilir olduğu ve kirişin kesme dayanımının tasarımında kullanılması için önerilmiştir. Önerilen kiriş geometrisi için önerilen sınırlamalar ve denklemler, kirişin en yüksek kesme kapasitesine ulaşmasını sağlamaktadır. Sonuçlar, önerilen kiriş geometrisinin daha hafif ve maksimum kesme kapasitesine ulaşan bir alternatif olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, trapez gövdeli kirişlerin doğru ve ekonomik tasarımı için önerilen modelin uygulanmasının önemini vurgulamaktadır (Şekil 2.34).

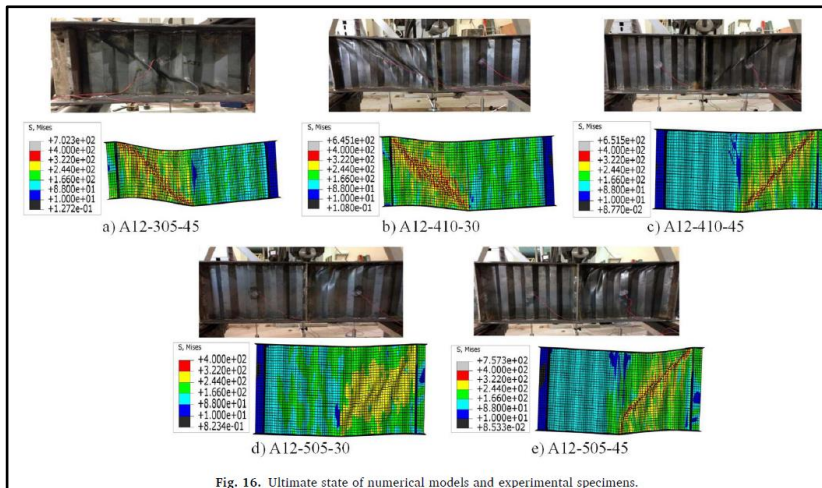
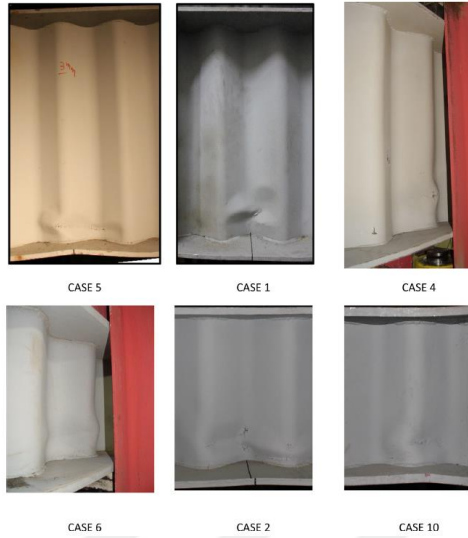


Fig. 16. Ultimate state of numerical models and experimental specimens.

Şekil 2.34. DeneySEL ve nümerik çalışma görsel karşılaştırması (Alikhanifard vd. 2022)

Nikoomanesh ve Goudarzi (2021) ondülün gövdeli kirişlerin tekil yüklemeler altında nihai yük kapasitesini araştırmışlardır. İlk olarak, on beş kiriş üzerinde deneysel testler gerçekleştirilmiş ve ardından tekil yükler altında bu kirişlerin davranışını simüle etmek için doğrusal olmayan sonlu elemanlar temelli bir sayısal model tanıtılmıştır.

Sayısal modelin geçerliliği, deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Daha sonra, farklı parametrelerin etkilerini araştırmak için doğrulanmış sayısal sonlu eleman modeli kullanılarak kapsamlı bir parametrik çalışma yapılmıştır. Ondülin gövdenin yerel elastoplastik burkulma varsayımı temel alınarak kirişlerin göçme mekanizması geliştirilmiş ve nihai yükleme kapasiteleri için analitik bir çözüm önerilmiştir. Farklı boyutlardaki OGK'lerin sonlu eleman sonuçları ile deneysel ölçümler, analitik çözümün doğruluğunu doğrulamış ve farklı dalga boyutları ve yük genişliklerinde OGK'lerin nihai yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için önerilebileceğini göstermiştir (Şekil 2.35).



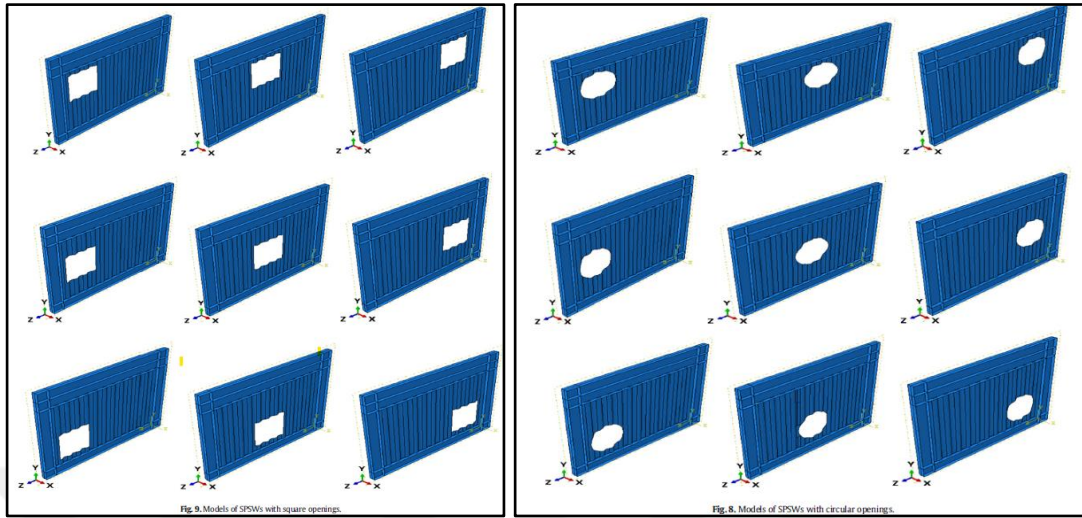
Şekil 2.35. Tekil yük altında OGK göçme durumları (Nikoomanesh ve Goudarzi 2021)

Roudsari vd. (2021) tarafından yapılan araştırmada, sinusoidal ve trapezoidal forma sahip çelik levhaları üzerindeki boşlukların ve levha kalınlığının, kesme duvarlarının performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Araştırma, diyafram olarak yatay veya kesme duvarı olarak dikey olarak yerleştirilebilen bu plakaların, yanal yükleri yapı sistemlerine iletmek için yaygın olarak kullanıldığını belirtmektedir. Bu çalışmada, açıklıkların konumlarının kesme duvar sistemlerindeki etkileri dikkate alınmıştır. ABAQUS yazılımını kullanarak yapılan sonlu elemanlar analizi ile kare ve dairesel boşluk geometrileri incelenmiş ve çelik kesme duvarlarındaki boşlukların konumuna göre performansı araştırılmıştır (Şekil 2.36).

Bu çalışma, farklı modellerin incelenmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır:

- Levha kalınlığının artırılması, yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini artırır.
- Boşlukları olmayan trapezoidal levhalar, sinusoidal levhalardan daha fazla yanal yük taşır.
- Dairesel bir boşluğu olan trapezoidal kesme duvarları yük taşıma kapasitesi, kare bir boşluğu olanlardan daha yüksektir.
- Kare bir boşluğu olan sinusoidal kesme duvarlarının yük taşıma kapasitesi, dairesel boşluğu olanlardan daha yüksektir.
- Boşluğun yanal yükün yakınına geldiği durumlarda, yük taşıma kapasitesi daha fazla azalacaktır (örneğin, açıklık merkezde ise en iyi seçenek olacaktır).

- Kare bir boşluğu olan kesme duvarları dairesel bir açıklığı olanlara kıyasla daha büyük rijitlik azalmaları göstermektedir.



Şekil 2.36. Boşluk şekil ve konumları (Roudsari vd. 2021)

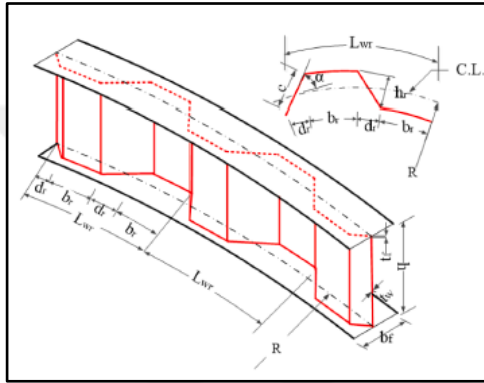
Elkawas vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen araştırma trapez gövdeli kirişlerin (TGK) yanıl burkulma mekanizmasına ilişkin temel davranışın deneysel ve sayısal çalışmalarla detaylı bir şekilde incelemektedir. Deneyler, farklı flanş genişlikleri ve gövde yükseklikleri üzerinde değişiklik yaparak üç farklı TGK üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin ardından, ABAQUS yazılımı kullanılarak farklı parametrelerin TGK davranışı üzerindeki etkilerini inceleyen kapsamlı bir sayısal modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir.

Hassanein vd (2021), trapez gövdeli kirişlerin EN 1993-1-5 tasarım modeli üzerinde narin flanşların kullanımının etkisini araştırmışlardır. Yapılan araştırmalar, narin flanşların yerel burkulmasının uzun kirişlerin eğilme direncini belirgin şekilde azaltabileceğini göstermektedir. Yapılan testler, ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve parametrik çalışmalarla desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar, EC3 tasarım modelinin tahminlerinin uygun olmadığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, yazarlar daha uygun tahminler sağlamak amacıyla yeni bir formül önermişlerdir. Çalışmanın sonuçları, tasarım mühendislerine etkili kesitler önerme konusunda yardımcı olacak çeşitli sonuçlar sunmaktadır.

Wang vd. (2021), köprü kirişlerinde kullanılan büyük ölçekli trapez gövdeli çelik kirişlerin elastik kritik kesme burkulma gerilmesini belirlemek için bir hesaplama yöntemi önermişlerdir. Bu amaçla, gövdenin lokal, global ve etkileşimli kesme burkulma modlarını belirlemek için sonlu eleman analizleri kullanmışlardır. Daha önce yapılan çalışmalarda formüllerin değerlendirilmesi sonucunda büyük ölçekli trapez gövdeli çeliklerin global ve lokal kesme burkulma gerilme tahminlerinin önemli ölçüde hatalı olduğu ve etkileşimli kesme burkulma gerilimi tahminlerinde belirgin bir sapmanın olduğu gözlemlenmiştir. Geometrik parametrelerin trapez gövdeli çeliklerin burkulma katsayılarına etkisi incelenmiş ve büyük ölçekli trapez gövdeli çelikler için uygun katsayıların değerlendirilmesi için uygun formüller önerilmiştir. Sonuç olarak, elastik kritik kesme burkulma gerilmesi için yeni bir hesaplama yöntemi önerilmiş ve

önceki yöntemle kıyasla hesaplama sürecinin basitleştirilip tahmin doğruluğunun artırılabilceği gösterilmiştir.

Yossef (2020) yatay eksenle eğimli forma sahip trapez çelik gövdenin kesme dayanımını tahmin etmek için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Makale, yatay olarak eğimli dalgalı çelik ağların burkulma davranışını tartışmakta ve bu konuda alternatif bir kesme dayanımı tahmini yöntemi sunmaktadır. Önerilen formül, lokal ve global burkulma için elastik ve inelastik alanları içermektedir. Araştırmanın sonuçları, eğimin kesme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını, ancak dalga açısının ve gövde kalınlığının davranışı önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu çalışma, eğimli dalgalı ağlara sahip I-kirişlerin davranışı üzerindeki etkileri de ele almaktadır (Şekil 2.37).



Şekil 2.37. Trapez gövdeli eğimli kiriş (Yossef 2020)

Inaam ve Upadhyay (2020) tarafından yazılan "Tekil yüklemelere maruz kalan dalgalı çelik I-kiriş oluklarının davranışı: Parametrik çalışma" başlıklı makale, çelik yapıların inşasında yaygın olarak kullanılan trapez gövdeli çelik kirişlerin, özellikle köprü yapımında karşılaşılan tekil yüklemelere nasıl tepki verdiğini ayrıntılı bir şekilde incelemektedir. Araştırma, çelik ağların tekil yüklemelere karşı hassas olduğunu ve bu durumun yapısal bütünlüklerini nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır. Makalede, farklı statik yapılar, yükleme tipleri ve geometrik parametreler üzerine detaylı bir parametrik analiz yapılmış ve trapez formdaki gövdenin bu yüklemelere karşı davranışı anlamak için sayısal modellemeler kullanılmıştır. Yapılan kapsamlı incelemeler, mevcut literatürde bulunan denklemlerin çelik trapez forma sahip gövdenin gerçek davranışını tam olarak yansıtmadığını göstermiş ve bu alandaki bilgi eksikliğine vurgu yapmıştır. Sonuçlar, tekil yüklemelere maruz kalan bu kirişlerin karmaşık davranış özelliklerini ortaya koyarak yapısal mühendislik alanında ileri çalışmalara olanak tanımaktadır. Bu çalışma, çelik yapıların tekil yüklemelere karşı dayanımını anlamak ve güçlendirmek adına önemli bir referans kaynağı oluşturmaktadır.

Pathirana ve Qiao (2020) tarafından yayınlanan makale, kesme yüklemesine maruz kalan başıt destekli sinusoidal panellerin kritik yerel burkulma durumunu Rayleigh-Ritz yöntemiyle yarı-analitik olarak araştırmaktadır. Çalışma, bu dalgalı yapısal elemanların düz levha yapısal elemanlarına alternatif olarak popülerlik kazanmasının nedenlerini ve önemini vurgulamaktadır. Makalede, bu yapıların başarısını artırmak için hassas bir çözüm geliştirilmiş olup, bu çözüm, panelin yerel burkulma etkisini karmaşık geometrilerinden kaynaklanan zorlukları yakalayabilen

klasik kabuk teorisi temel alınarak sağlanmıştır. Çalışma, geometrinin karmaşıklıklarını tamamen göz önünde bulundurup, peridiyodik olarak tekrar eden yapısal elemanı kullanarak panelin burkulma doğasını yakalamayı amaçlamaktadır. Yapılan parametrik çalışmalar, panelin kalınlığı, en-boy oranı, dalga genliği ve malzeme özelliklerinin burkulma üzerindeki etkilerini keşfetmektedir. Çalışmanın sonucunda, incelenen yarı-analitik çözüm, ince duvarlı kabukların belirli bir kalınlık, en-boy oranı ve yüksek dalga genliklerdeki yerel burkulma davranışını doğru bir şekilde yakalayabildiği gözlemlenmiştir.

Nikoomanesh ve Goudarzi (2020) tarafından yayınlanan makale, ondülin gövdeli kirişlerin kesme yük kapasitesini deneysel ve sayısal olarak değerlendirmektedir. Deneyler ve sayısal analizlerin sonuçlarına dayanarak, ondülin gövdeli kirişlerin kesme yük kapasitesini tahmin etmek için bir formül önerilmiştir. Yapılan parametrik çalışmalarla elde edilen sonuçlar, bu kirişlerin nihai kesme kuvveti kapasitesini %10'luk bir farkla tahmin edebildiğini ortaya koymaktadır.

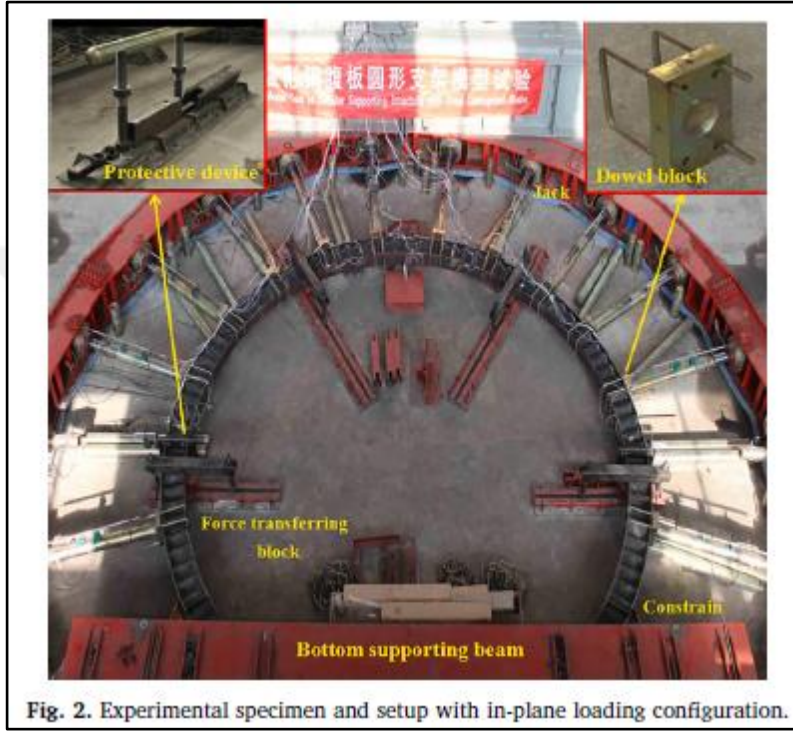
Makalede, ondülin gövdeli kiriş kavramı incelenmekte olup, bu kirişlerin düşük ağırlık, yüksek kararlılık ve düşük maliyet avantajları sunabileceği vurgulanmaktadır. Kirişlerin ondülin olarak tasarlanmasının, düz bir kirişe göre önemli avantajları olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, çalışmada yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, bu kirişlerin kesme yük kapasitesini belirlemede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçları, ondülin gövdeli kirişlerin yüksek kesme kapasitesine sahip olduğunu ve belirli boyutlarda daha etkili olduğunu göstermektedir (Şekil 2.38).



Şekil 2.38. Kesme yükleri altında burkulma şekilleri (Nikoomanesh ve Goudarzi 2020)

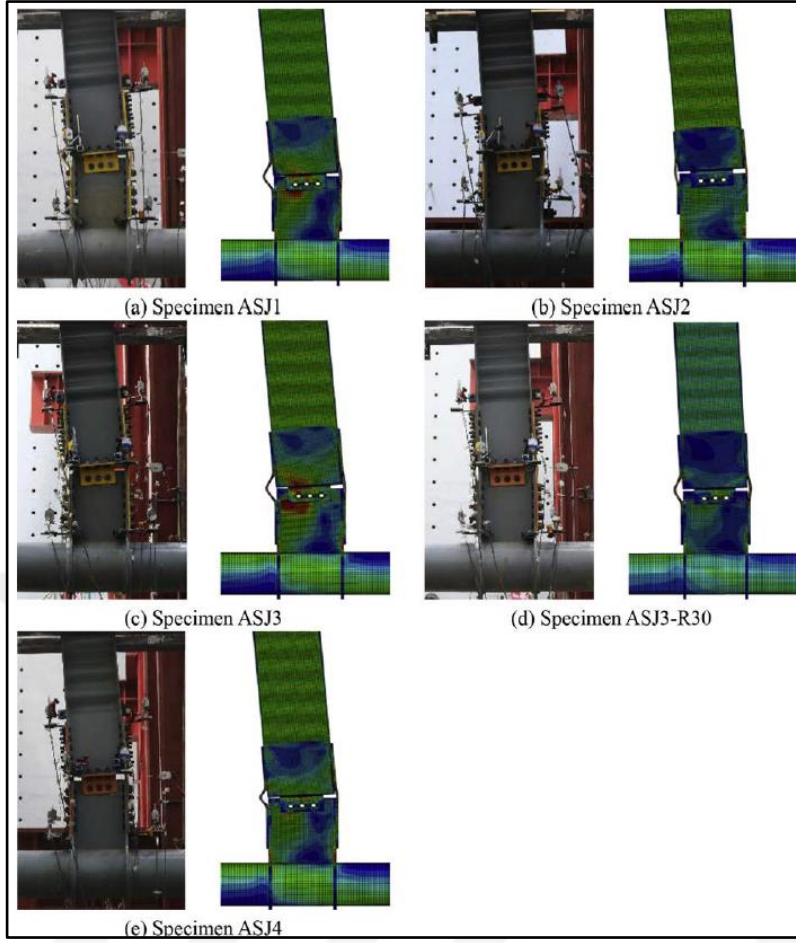
Wu vd (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışma, yumuşak kaya altındaki tüneller ve diğer yeraltı yapıları için yapısal desteklerin büyük deformasyonlara maruz kalma sorununu çözmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, ondülin gövdeli I-kesitli çelik dairesel kapalı desteklerin kullanımı önerilmiştir. Gerçekleştirilen büyük ölçekli deneyler, önerilen desteklerin burkulma davranışlarını ve göçme modlarını ayrıntılı olarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, gövde yüksekliğinin artmasıyla desteklerin

nihai yük taşıma kapasitesinin anlamlı bir şekilde arttığını göstermiştir. Özellikle, gövde yüksekliğinin artışıyla nihai yük kapasitesinde %18'lik bir artış elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, sonlu eleman analizi sonuçları, deneysel bulgularla tutarlılık göstermiştir. Çalışma, desteklerin tasarımında dikkate alınan temel parametreler arasında kesit boyutları, başlangıç kusurları ve narinlik oranları gibi değişkenlerin etkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Ayrıca, desteklerin elastik ve elastik-plastik burkulma performansı üzerinde etkili olan gövde yüksekliği, flanş genişliği ve kalınlığı gibi kritik tasarım parametreleri üzerindeki etkileri de ortaya konulmuştur (Şekil 2.39).



Şekil 2.39 Test düzeneği (Wu vd. 2020)

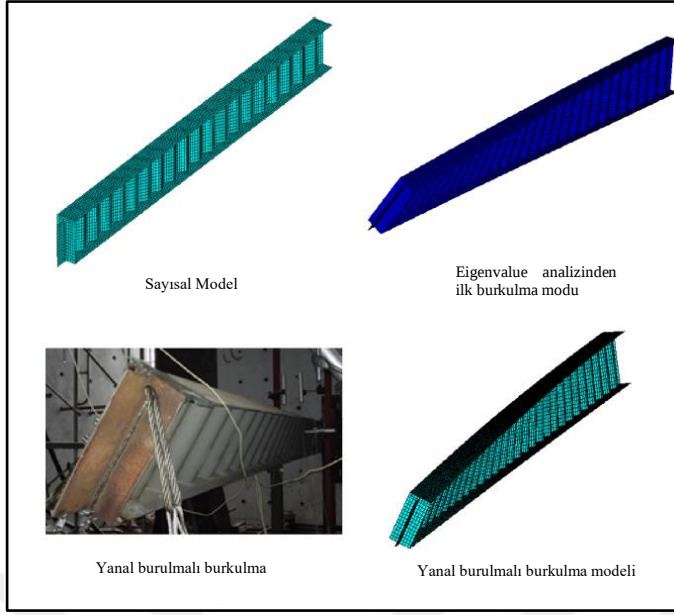
Zi vd. (2020) çalışmalarında, depreme dayanıklı sinusoidal gövdeli çelik kiriş-kolon birleşimlerinde bulunan cıvataların deprem performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler ve sayısal simülasyonlar, bu birleşimin mükemmel taşıma kapasitesi ve deprem performansına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, cıvatalar arasındaki uygun aralık, flanş bağlantı plakalarının burkulma yükünü kontrol edebilir ve birleşime tatmin edici bir taşıma kapasitesi sağlayabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, slot deliklerin kullanımı birleşimin dönme ve enerji emilim kapasitesi üzerinde etkili olmaktadır. Öte yandan, çalışmada, çelik yapı birleşimlerinin önemi ve depreme dayanıklı tasarımın gerekliliği vurgulanmış ve bu alandaki mevcut çalışmalar gözden geçirilmiştir. Ayrıca, bu birleşimin tasarımı ve işlevselliği hakkında önceki araştırmalar da kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve deprem performansının iyileştirilmesine yönelik çeşitli öneriler sunmaktadır (Şekil 2.40).



Şekil 2.40. Test elemanlarının göçme modlarının kıyaslanması (Zi vd. 2020)

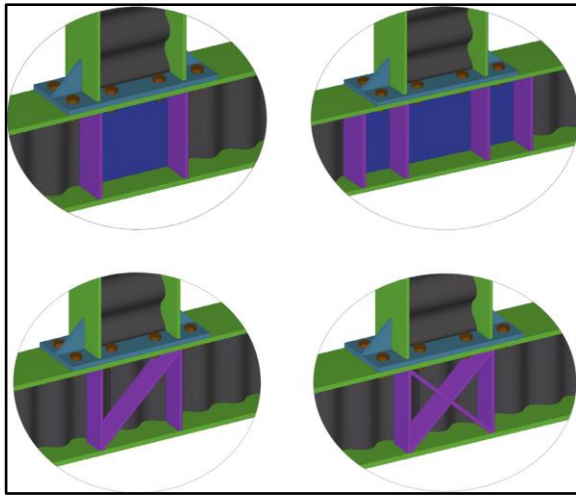
Zhang vd. (2017) yaptığı araştırma, sinusoidal gövdeye sahip konsol kirişlerin eğilme davranışı üzerine kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Dört farklı kiriş örneği üzerinde gerçekleştirilen deneysel testler, kirişlerin genel olarak eğilme ve burulma burkulma davranışı sergilediğini ortaya koymuştur. Test sonuçları, bu kirişlerin geleneksel düz gövdeli kirişlerle benzer yük ve sınır koşullarına maruz kaldıklarında benzer burkulma davranışı sergilediğini göstermiştir.

Araştırmada, test edilen örnekler için bilgisayar modelleri geliştirilmiş ve bu modeller, kirişlerin burkulma dayanıklılığını belirlemek için doğrusal olmayan statik analizlere tabi tutulmuştur. Bu analizler, test edilen örneklerin dayanıklılığını makul bir şekilde tahmin edebileceğini göstermiştir. Sinusoidal formda gövdeye sahip bu kirişlerin, düz gövdeli kirişlere kıyasla daha yüksek dayanıklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Araştırma ayrıca, bu tür kirişlerin mukavemetini hesaplamak için mevcut modellerin uygunluğunu değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, Lindner modelinin sinusoidal gövdeli kirişler için makul tahminler sağladığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, Lindner modelinin bu tür kirişlerin mukavemetini hesaplamak için kullanılması önerilmektedir (Şekil 2.41).



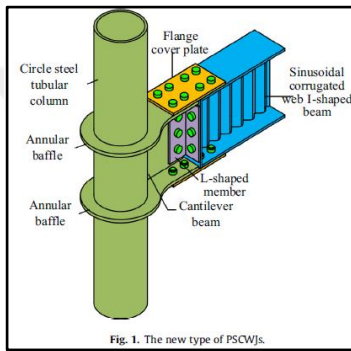
Şekil 2.41. Test örneği burkulma davranışı (Zhang vd. 2017)

Aydın vd. (2016) tarafından kaleme alınan makalede, sinusoidal oluklu gövde profillerinin kolon-kiriş bağlantı performansı incelenmiştir. Makalede, düğüm noktasında geleneksel düz formdaki panelli bağlantı tipleri ile alternatif olarak oluklu-gövde panel bölgesinde çapraz olarak tek veya çift berkitme levhası kullanıldığı bağlantı tiplerinin davranışları karşılaştırılmıştır. Yapılan tam ölçekli deneyler ve sonlu eleman analizleri sonucunda, sinusoidal oluklu bağlantıların düz plaka panel bölgeleriyle benzer davranış sergilediği tespit edilmiştir. Bu çalışma, oluklu web kesitlerinin yapısal verimliliği ve düşük öz-ağırlığı nedeniyle rijit bağlantıların oluşturulmasında düz plaka kullanımına alternatif olarak tek veya çift berkitme levhalarının panel bölgesine yerleştirilmesinin uygun olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 2.42).



Şekil 2.42. Düğüm noktası panel tipleri (Aydın vd. 2016)

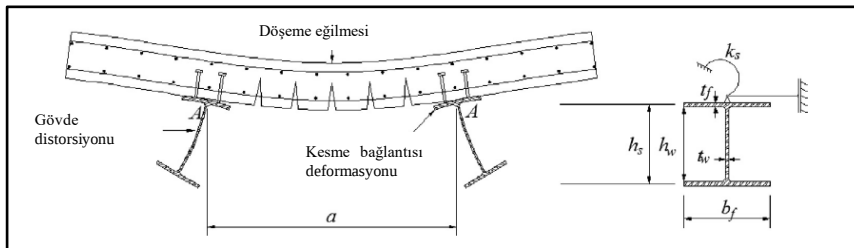
Zhang vd. (2017) tarafından yayınlanan makale, prefabrik çelik yapı sistemleri ve özellikle depreme dayanıklı yapılar üzerine odaklanmaktadır. Makale, yeni bir tür depreme dayanıklı prefabrik ondülin gövdeli kolon-kiriş birleşimi önermektedir. Makalede, tasarım teorisi, mekanik özellikler ve deprem tasarım gereksinimleri detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Araştırma, 55 kolon kiriş birleşim örneği üzerinden sonlu elemanlar analizi ile teorelin doğruluğunu kanıtlamakta ve flanş bağlantı plakasındaki orta civata aralığı için makul bir değer aralığı belirlemektedir. Yapılan teorik çalışmalar, ondülin kiriş kesit parametreleri, flanş bağlantı plakasının kalınlığı, malzeme özellikleri, civata çapı, orta civata aralığı gibi birçok tasarım parametresinin etkilerini dikkate almaktadır. Sonuçlar, tasarım teorisinin bu birleşimin gerilme yükünün doğru bir şekilde tahmin edebildiğini ve yapıların depreme dayanıklılık gereksinimlerini karşılayabilecek elastik bir aralıkta kalmasını sağlayabildiğini göstermektedir (Şekil 2.43).



Şekil 2.43. Kolon-kiriş birleşim detayı (Zhang vd. 2017)

Lopes vd. (2017) ondülin gövdeli kirişlerin elastik kritik momentini ele alan bir çalışma sunmaktadır. Makale, bu kirişlerin yanal burulmalı burkulma üzerine önceki araştırmaları gözden geçirmekte ve yeni bir yöntem önermektedir. Yapılan sayısal çalışmalar, mevcut tasarım formüllerinin iyileştirilebileceğini ve önerilen modifikasyonların bu kirişlerin burkulma dayanımını doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermektedir.

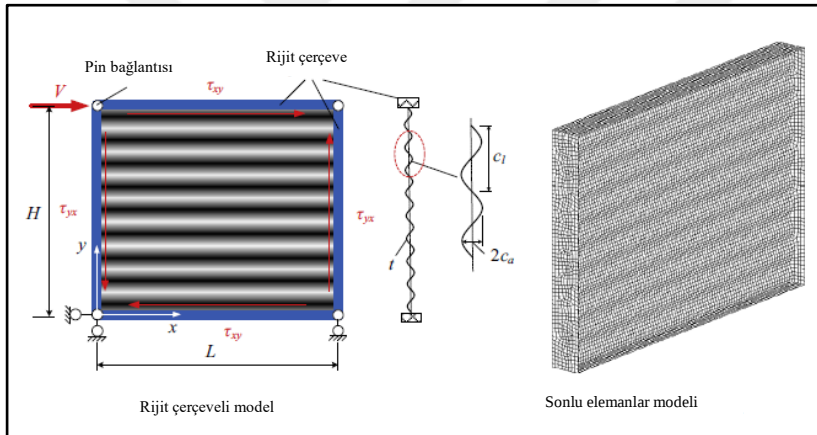
Oliveira vd. (2016), sürekli kompozit çelik ve beton kirişlerde yanal burulmalı burkulma için sinüzoidal gövdeli çelik kirişlerin elastik kritik momenti ele almaktadır. Makale, ANSYS yazılımı kullanılarak geliştirilen sonlu eleman analizi modeli ile yapılan 45 model üzerinden değerlendirme yapılarak sinüzoidal formda gövdeye sahip kompozit kirişlerin elastik kritik momentlerini tahmin etmek için bir prosedür önerilmektedir (Şekil 2.44).



Şekil 2.44. Kompozit kiriş detayı (Oliveira vd. 2016)

Dou vd. (2016) yaptıkları çalışmada, sinusoidal forma sahip çelik plakaların perde duvarlardaki elastik kesme burkulma davranışıyla ilgilenmektedir. İç dolgu panellerinin kesme burkulma yüklerini tahmin etmek için uygun denklemler sunulmuştur. Öncelikle sonlu eleman analizleri kullanılarak, levhaların eğilme rijitliklerine yönelik mevcut formüller gözden geçirilmiş ve düzeltilmiştir. Ardından, anahtar parametrelerin, yani en-boy oranı, kıvrım oranı, plaka kalınlığına göre kıvrım derinliği oranı ve kıvrım tekrar sayısının bu panellerin elastik kesme burkulma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonlu eleman analizlerine dayanan geniş kapsamlı sayısal sonuçlarla birlikte, iyi bir doğrulukla panellerin elastik kesme burkulma yüklerini tahmin etmek için uygun denklemler önerilmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda, çelik panellerin perde duvarlardaki elastik kesme burkulmasına dair pek çok bulgu elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, bu panellerin eğilme rijitlikleri ve kesme burkulma gerilmesi için gösterilen denklemlerin, önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli ölçüde iyileştirilmesi gerektiğini göstermiştir. Ayrıca, panellerde sadece global ve lokal burkulmanın gözlemlenebildiği, etkileşimli burkulmanın belirgin olmadığı tespit edilmiştir. Elastik burkulma analizinin yapısı, pratik kullanımı kapsayacak şekilde çeşitli geometrik parametreler içeren sonuçlar vermiştir (Şekil 2.45).



Şekil 2.45. Sinusoidal forma sahip panel (Dou vd. 2016)

Yan vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışma, ondülin gövdeye sahip çelik I-kesitli kemerlerin düzlemsel dayanıklılığını deneysel ve sayısal olarak incelemeyi amaçlamaktadır (Şekil 2.46). Çalışma, kirişlerin genel düzlemsel elasto-plastik davranışını ve dayanıklılığını simetrik yük altında testlerle değerlendirmekte ve elde edilen sonuçları kullanarak bir tasarım denklemi önermektedir. Deney sonuçları ile doğrulanan sonlu eleman modeli, çelik kemerlerin genel düzlemsel elasto-plastik davranışını detaylı bir şekilde incelemek için kullanılmıştır. Önerilen tasarım denklemi, bu kirişlerin tam açıklıklı düzgün dikey yük altında genel düzlemsel dayanıklılığını tahmin etmek amacıyla geliştirilmiştir. Çalışmanın önemli bir bulgusu, kirişlerin genel dayanıklılığının yanı sıra, kirişlerin tasarımında elasto-plastik kesme burkulma modunun da göz önünde bulundurulması gerektiğidir.



Şekil 2.46. Test düzeneği (Yan vd. 2016)

Pimenta vd. (2015) yaptıkları çalışma ile, ondülin gövdeli kirişlerin yanal burulmalı burkulma durumuna karşı güvenilirlik temelli tasarım önerilerini ele almaktadır (Şekil 2.47). Ondülin gövdeli kirişler, kolay uygulanabilirlik ve yapısal verimlilikleri sayesinde inşaat sektöründe önemli bir yer edinmiştir. Ancak, bu tür kirişlerin davranışını belirleyen pek çok fenomeni içeren uygun tasarım standartları bulunmamaktadır, özellikle de yanal burulmalı burkulma gibi durumlar.

Makale, deneysel çalışmalar, teorik modeller ve güvenilirlik analizlerini içeren kapsamlı bir program çerçevesinde geliştirilmiş tasarım önerilerini sunmaktadır. Bu öneriler, yapısal mühendislik pratiğiyle uyumlu güvenlik seviyelerini içermektedir. Sonuçlar, önerilen tasarımın karmaşıklığına rağmen, bu kirişlerin yanal burulmalı burkulma limit durumu için başarıyla tasarlanabileceğini göstermektedir. Bu çalışma, gelecekteki araştırmalara yol göstermek üzere ondülin gövdeli kirişlerin diğer limit durumları için de güvenilirlik temelli tasarım önerileri geliştirme ihtiyacını vurgulamaktadır.



Şekil 2.47. Yanal burulmalı burkulma durumu (Pimenta vd. 2015)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Dairesel Boşluklu Çelik Kirişlerin Hesap Yöntemleri

Global eğilme kapasitesi:

Gayri müsait yükleme kombinasyonları altında, dairesele boşluklu kirişin dış yüklemelere karşı direnç gösterebilmesi için yeterli eğilme kapasitesine sahip olması gerekir. Yani, uygulanan yük kombinasyonları altındaki maksimum moment (M_u), kirişin plastik moment kapasitesini (M_p) aşmamalıdır (Denklem 3.1).

$$M_u = A_{tee} \times p_y \times H_u \leq M_p \quad (3.1)$$

Burada; p_y = tasarım dayanımı, A_{tee} = T-kesit alanı, H_u = alt ve üst T-kesit merkezleri arası mesafe

Kesme kapasitesi:

Dairesel boşluklu kirişlerin boyutlandırılmasında, üç aşamalı kesme kuvveti kontrolü gerçekleştirilir. İlk olarak, mesnetlerdeki kesme kuvveti tahkiki yapılır. Denklem (3.2) ile verilen eşitsizlik, mesnetlerdeki tasarım kesme kuvveti değerinin ($V_{max\ sup}$) kiriş kesiti tasarım kesme kuvveti kapasitesini (P_v) aşılmasını sağlamaktadır.

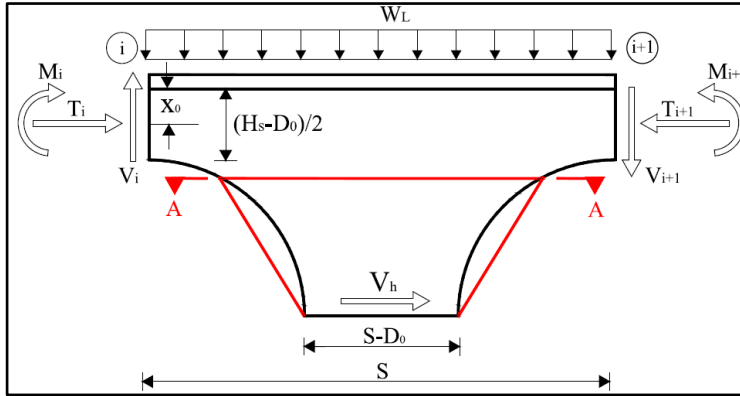
$$V_{max\ sup} \leq P_v = 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{mesnet bölgesi gövde alanı}) \quad (3.2)$$

İlk tahkike ek olarak kirişteki düşey kesme kuvveti kontrolü Denklem (3.3) ile yapılır. Kirişin boşluktan dolayı oluşan alt ve üst T kesitlerindeki kesme kuvvetleri kapasitelerinin toplamı kirişin toplam kesme kapasitesini verir. Uygulanan yük kombinasyonundan dolayı dairesele boşluklu kirişte oluşacak düşey yöndeki kesme kuvveti (V_{Omax}), toplam kesme kuvveti kapasitesini (P_{vy}) değerini aşmamalıdır.

$$V_{Omax} \leq P_{vy} = 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \sum \text{alt ve üst parça gövde alanı}) \quad (3.3)$$

Son olarak yanal kesme kuvveti kontrolü (Denklem 3.4) yapılır. Yanal kesme kuvveti; kirişin üst parçasındaki eksenel kuvvetlerin değişmesinden dolayı kirişin gövde kısmında meydana gelir (Şekil 3.1). Kirişin gövde bölgesindeki yanal kuvvet (V_{Hmax}), bu bölgenin kesme kuvveti kapasitesi (P_{vh}) değerinden küçük olmalıdır.

$$V_{Hmax} \leq P_{vh} = 0.6 \times p_y \times (0.9 \times \text{minimum gövde alanı}) \quad (3.4)$$



Şekil 3.1. Kirişin gövdesinde oluşan yanal kesme

Kiriş gövdesindeki yanal kesme kuvveti formülasyonları Denklem (3.5, 3.6, 3.7) ile verilmiştir.

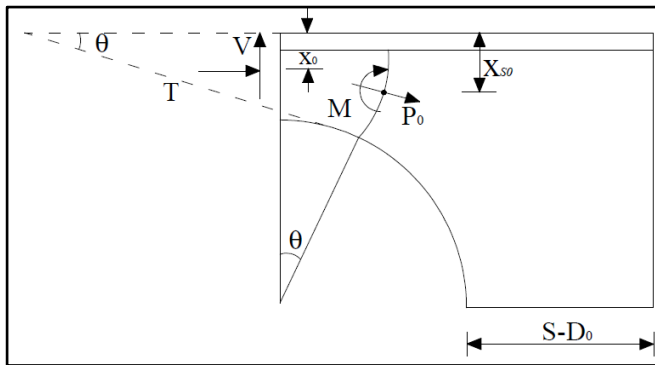
$$V_{i+1} = V_i \quad (3.5)$$

$$M_i = T_i \times (H_s - 2X_0) \quad (3.6)$$

$$V_h = T_{i+1} - T_i = V_{i+1} \frac{S}{H_s - 2X_0} \quad (3.7)$$

İkincil eğilme kapasitesi:

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 momentleri taşımaktadır. Birincil moment kiriş kesiti üzerindeki klasik eğilme momentidir. Kesme kuvvetlerinin her bir boşluk boyunca aktarılması ise ikincil eğilme (vierendeel bending) momentine neden olur. Olander (1953) yaklaşımını kullanarak, boşluk etrafındaki vierendeel eğilme gerilmeleri hesaplanabilir. Olander, kritik kesitin konumu ve T-kesitlerin nihai direnci için dairesel bir kesiti kullanır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Olander eğimli kiriş yaklaşımı

Simetrik kesitler için, global kesme kuvveti üst ve alt gövde kesitleri arasında eşit olarak paylaşılır. T-kesitindeki kritik kesitte Vierendeel eğilme momenti ile eksenel kuvvet arasındaki etkileşim Denklem (3.8) ile kontrol edilmelidir.

$$\frac{P_o}{P_u} + \frac{M}{M_p} \leq 1 \quad (3.8)$$

$$P_o = T \cos \phi - \frac{V}{2} \sin \phi \quad (3.9)$$

$$M = T (\chi_{so} - \chi_o) + \frac{V}{2} \left(\frac{H_s}{2} - \chi_{so} \right) \quad (3.10)$$

Burada; P_o = kritik kesitte oluşan normal iç kuvvet, P_u = kritik kesit normal kuvvet kapasitesi, M = kritik kesitte oluşan moment, M_p =kritik kesitteki moment kapasitesi, T = T-kesitte oluşan normal kuvvet, V =T-kesitte oluşan kesme kuvveti.

Gövde eğilme ve burkulma dayanımı:

Dairesel boşluklu kirişlerin gövde burkulması ve esneklik kapasitelerinin kontrolü Denklem (3.11) ile yapılır.

$$\frac{M_{allow}}{M_e} = C_1 \left(\frac{S}{D_0} \right) - C_2 \left(\frac{S}{D_0} \right)^2 - C_3 \quad S, D_0 [mm] \quad (3.11)$$

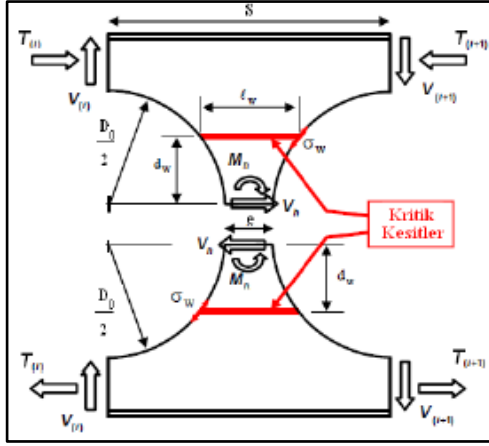
$$C_1 = 5.097 + 0.1464 \left(\frac{D_0}{t_w} \right) - 0.00174 \left(\frac{D_0}{t_w} \right)^2 \quad (3.12)$$

$$C_2 = 1.441 + 0.0625 \left(\frac{D_0}{t_w} \right) - 0.000683 \left(\frac{D_0}{t_w} \right)^2 \quad (3.13)$$

$$C_3 = 3.645 + 0.0853 \left(\frac{D_0}{t_w} \right) - 0.00108 \left(\frac{D_0}{t_w} \right)^2 \quad (3.14)$$

$$M_e = \frac{t_w \times (S - D_0 + 0.564D_0)^2}{6} \times f_y \quad (3.15)$$

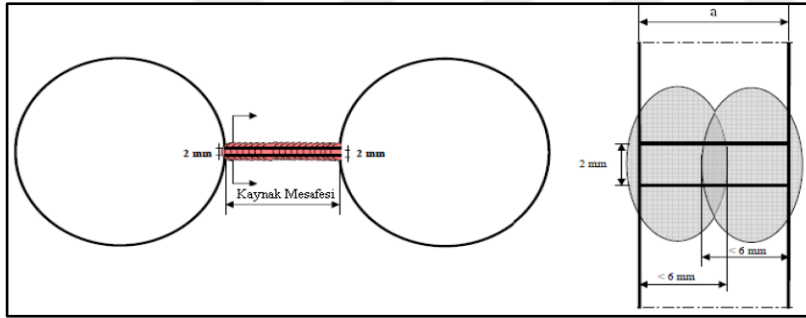
Burada; M_{allow} = izin verilen maksimum web post momenti, M_e = elastik eğilme momenti kapasitesi (Şekil A kesit-A-A), S = boşluk merkezleri arası mesafe, t_w = gövde et kalınlığı, D_0 = boşluk çapı.



Şekil 3.3. Dairesel boşluklu kirişlerin gövde bölgesinde oluşan kritik kesitler

Kaynak Bölgesinde Kopma:

Dairesel boşluklu kirişlerde uygulanan yük altında boşluklar arasındaki kaynak dikişi mesafesinin 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 3.4).



Şekil 3.4. Kiriş gövdesinde kaynak işlemi

DBK kirişlerdeki boşluklar arası yapılan çift taraflı kaynağın kalınlığını ifade eden minimum “a” değerinin formülasyonu denklem (3.16) ile verilmiştir.

$$a \geq \frac{V_h \times \beta_w \times \sqrt{3}}{w \times f_u \times \gamma_w} \quad (3.16)$$

Burada; V_h = kaynak bölgesinde oluşan yanal kesme kuvveti, w = kaynak dikiş boyu, γ_w = sabit parametre, f_u = çekme kapasitesi, β_w = çelik sınıfına göre belirlenen parametre (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Kaynak kalınlığı parametreleri

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

3.2. Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin Hesap Yöntemleri

Gövde yük taşıma kapasitesinin hesaplanması:

Sinusoidal forma sahip gövdenin kesme etkilerine karşı tasarlanmasında gövdenin kesme kapasitesi Denklem (3.17) ile verilmiştir.

$$V_{TK-MAKS} = \frac{K_B \times f_y \times h \times t_w}{\sqrt{3}} \quad (3.17)$$

Burada; f_y = karakteristik akma dayanımı, h = Gövde kesit yüksekliği, t_w = Gövde et kalınlığı, K_B = Burkulma katsayısı.

Gövde burkulma katsayısı (K_B) Pasternak (1996) tarafından önerilen Denklem (3.18) ile verilmiştir.

$$K_B = \frac{1}{(\lambda_{GN})^{1,5}} \quad (3.18)$$

λ_{GN} = Spesifik narinlik parametresi (Denklem 3.19)

$$\lambda_{GN} = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3} \times \tau_{EG}}} \quad (3.19)$$

τ_{EG} = gövde enine burkulma gerilmesi (Denklem 3.20)

$$\tau_{EG} = \frac{32,4}{t_w \times h^2} \sqrt{D_x \times D_y^3} \quad (3.20)$$

D_x ve D_y ondülin gövde rijitlikleri olmak üzere Denklem (3.21) ile verilmiştir.

$$D_x = \frac{E \times w \times t_w^3}{12 \times s} \text{ ve } D_y = \frac{E \times I_y}{w} \quad (D_x \ll D_y) \quad (3.21)$$

Burada; w = dalga boyu, s = ondülin levha düzleştirilmiş boyu, I_y = bir dalganın atalet momenti.

Flanşların normal kuvvet altındaki taşıma kapasitelerinin hesaplanması;

Denklem (3.22)'de, flanşlardaki çekme kuvvetleri, flanş lokal burkulması ve kesitin zayıf eksenindeki global burkulma durumlarına göre hesaplanan normal kuvvet taşıma kapasiteleri belirtilmiştir. Bu kapasiteler arasından en düşük olan, flanş yük taşıma kapasitesi olarak belirlenir.

$$N_{gRk} = \min(N_{gRk,t}; N_{gRk,l}; N_{gRk,g}) \quad (3.22)$$

Burada; $N_{gRk,t}$ = flanş çekme kuvveti taşıma kapasitesi, $N_{gRk,l}$ = flanş lokal burkulma durumu için basınç kuvveti taşıma kapasitesi, $N_{gRk,g}$ = flanş global burkulma durumu için basınç kuvveti taşıma kapasitesi.

Flanş çekme kuvveti kapasitesi ($N_{gRk,t}$) Denklem (3.23) ile verilmiştir.

$$N_{gRk,t} = f_y \times b_f \times t_f \quad (3.23)$$

Flanş lokal burkulma durumu için basınç kuvveti taşıma kapasitesi ($N_{gRk,l}$) Denklem (3.24, 3.25) ile verilmiştir.

$$N_{gRk,l} = \sigma_{EL} \times b_f \times t_f \quad (3.24)$$

$$\sigma_{EL} = \frac{4000}{(b_f \times t_f)^2} \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad (3.25)$$

Lokal burkulma DIN 18 800 Teil 1'e göre, $\lim(b/t)$ değerlerine göre hesaplanır. Gövdenin elastik uzama etkisini hesaba katabilmek için, flanş genişliğinin yarısı gövde sinüs dalga yüksekliğinin yarısı kadar azaltılıp, plaka şerit genişliği elde edilir (Denklem 3.26) Malzeme akma ve flanş et kalınlığı değerlerine göre flanş enkesitleri arasındaki ilişki belirlenir (Denklem 3.27, 3.28)

$$b = \frac{b_f}{2} - 11 \quad (3.26)$$

$$f_y = 240 \text{ MPa için } b \geq 12,9 \times t_f \quad (3.27)$$

$$f_y = 355 \text{ MPa için } b \geq 10,5 \times t_f \quad (3.28)$$

Flanş global burkulma durumu için basınç kuvveti taşıma kapasitesi ($N_{gRk,g}$), Denklem (3.29) ile verilmiştir.

$$N_{gRk,g} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \sqrt{E \times f_y} \times \frac{b_f^2 \times t_f}{k_c \times c} \quad f_y \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad b_f, t_f, c \text{ [cm]} \quad (3.29)$$

Burada; E = Elastisite modülü, c = yanal destekler arası mesafe, k_c = basınç kuvvet faktörü (DIN 18 800 Teil 2), f_y = karakteristik akma dayanımı.

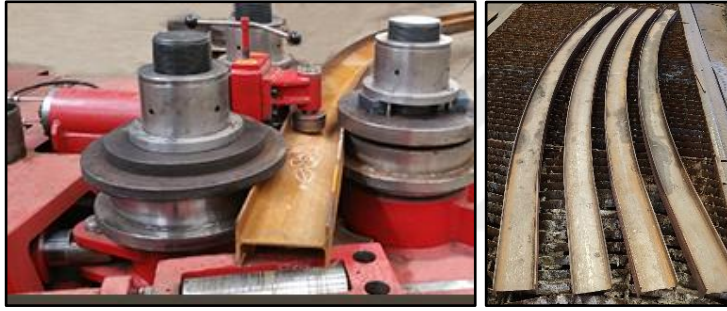
3.3. Test Elemanlarının Fabrikasyon Süreci

3.3.1. Dairesel boşluklu çelik kirişlerin üretilmesi

Gövde yüksekliği arttırılmış dairesel boşluklu çelik kirişler, eğrisel ve düz formda olmak üzere iki farklı tipte üretilmiştir. Kemer şekline sahip dairesel boşluklu kirişlerin üretimi için, ilk aşamada IPE240 profilleri kullanılmıştır. Üç makaralı profil bükme makinasıyla soğuk şekillendirme yöntemi kullanılarak istenen eğrilik yarıçapında bükme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).

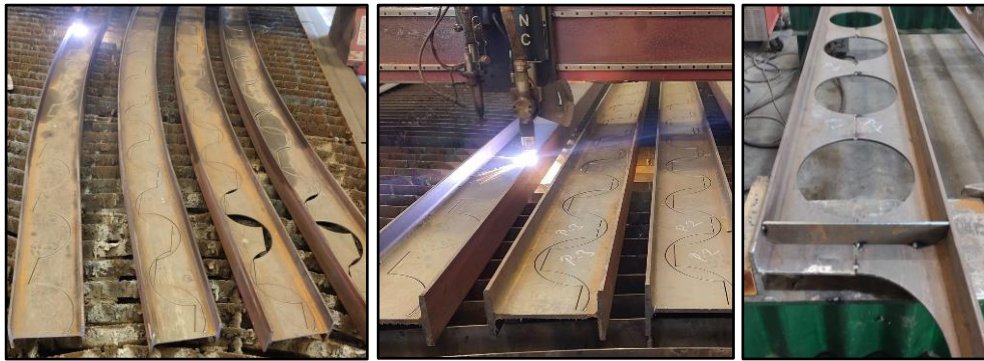
Genel olarak üç makaralı bükme işlemi, profilin makaralar arasına yerleştirilmesiyle başlar. Alt ve üst makaralar, kademeli olarak birbirlerine yaklaştırılır. Her aşamada makaralar döndürülerek profilin eğrilik yarıçapı azaltılır. İstenilen eğrilik değerine ulaşıldığında işlem sonlandırılır.

Bu süreçte, profilin bükme işlemi kontrollü bir şekilde gerçekleştirilir. Profilin eğrilik yarıçapı ve kesit özellikleri, makaraların açısı ve konumlarıyla kontrol edilir. Böylece istenen eğrisel form elde edilir ve dairesel boşluklu kirişin geometrik ve tasarımsal gereksinimlerine uygunluğu sağlanır.



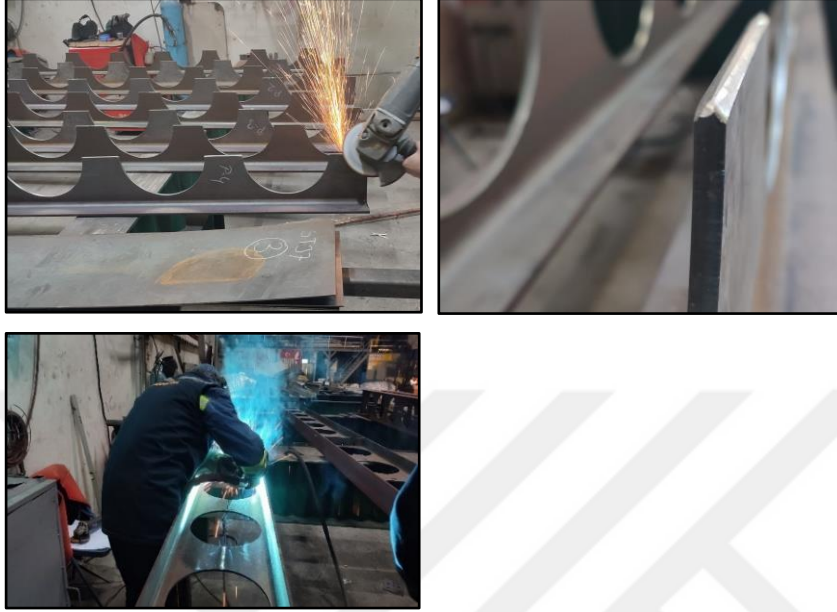
Şekil 3.5. Profillerin üç makaralı profil bükme makinası ile bükülmesi

Eğrisel forma getirilen profil, gövdesi boyunca Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bilgisayara dayalı sayısal kontrol (CNC) yöntemi ile kesilir. Kesim sonucu elde edilen alt ve üst parçaların gövde düz kısımları birbirlerinin üzerine denk gelecek şekilde bir miktar kaydırılarak kaynaklanır ve kiriş uçlarında artan parçalar kesilir.



Şekil 3.6. Kiriş gövdesinin kesilmesi, Gövde Alt ve üst parçalarının birleştirilmesi

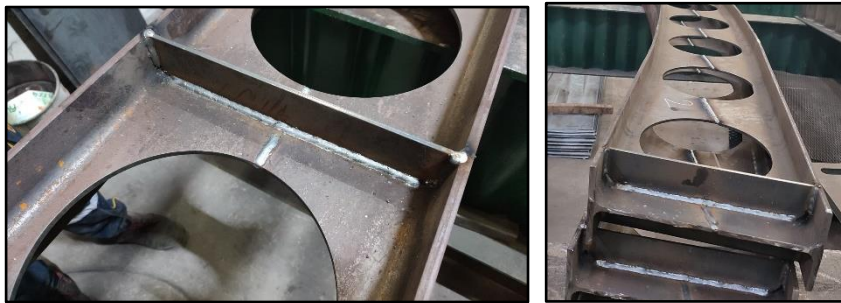
Flanşın alt ve üst parçalarının kaynatılması öncesinde, daha iyi bir malzeme birleşimi sağlamak amacıyla taşlama yöntemi kullanılarak Şekil 3.7'de görülen X formunda kaynak oluğu açılmıştır. Bu işlem sonrası kaynak prosedürü şartnamesine (WPS) uygun olarak gaz altı ark kaynağı ile tam penetrasyonlu alın kaynağı yapılmıştır.



Şekil 3.7. Flanş alt ve üst parçaların kaynatılması

Dairesel boşluklu kiriş üretim prosesi gereği, kesit yüksekliğinin artmasıyla birlikte gövde narinleşir. Narin gövdenin güçlendirilmesi için yük transfer bölgelerinde gövdenin her iki yüzeyine dikey yönde berkitme levhaları kaynatılmıştır (Şekil 3.8).

Bu güçlendirme işlemi, gövdenin dayanıklılığını artırmayı hedeflemektedir. Dikey berkitme levhaları, gövdeye ekstra mukavemet ve yüklerin kesit boyunca daha etkin bir şekilde aktarılmasını sağlar. Aynı zamanda, yük aktarım bölgelerindeki gerilme konsantrasyonunu azaltarak gövdenin yerel burkulmalara karşı direncini artırır ve böylelikle kirişin genel taşıma kapasitesini iyileştirir.



Şekil 3.8 Berkitme levhaları

3.3.2. Ondülin gövdeli çelik kirişlerin üretilmesi

Ondülin gövdeli kirişlerin üretimi, gövde plakasının sinusoidal form kazandırılması ve ardından alt ve üst flanş plakalarının gövdeye kaynaklanmasıyla gerçekleştirilir.

Gövde plakasının dalgalı formunu oluşturmak için özel bir kalıp tasarımı kullanılmıştır. Bu kalıbın alt ve üst blokları hidrolik pres makinesine monte edildikten sonra düz gövde plakası bu bloklar arasından kademe kademe geçirilerek sinusoidal bir form elde edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Ondülin gövde kalıbı ve sinusoidal formun elde edilmesi

Eğrisel formdaki ondülin gövdeli kirişlerin üretimi için gövde levhası eğrisel formda CNC’de kesilmiştir (Şekil 3.10). Sonrasında hidrolik pres makinesinden geçirilerek dalgalı form elde edilmiştir.



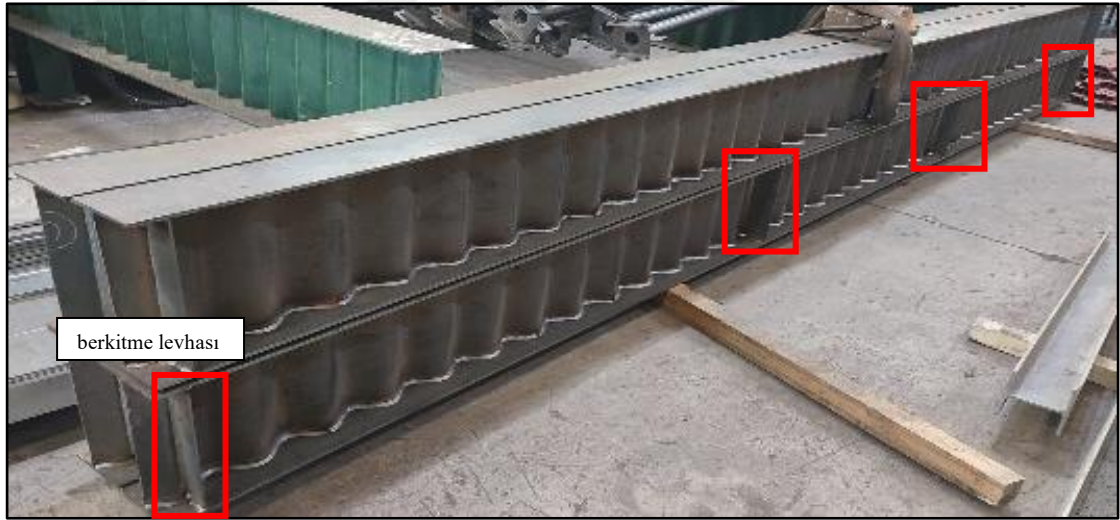
Şekil 3.10. Eğrisel formda gövde sacının kesilmesi

Dalgalı forma getirilen gövdeye alt ve üst flanşlar herhangi bir eksantrisite olmayacak şekilde mengene ve kutu profil yardımı ile sabitlenmiştir. Kaynak esnasında ısı etkilere bağlı olarak şekilsel bozuklukların önüne geçmek için gövde tepe ve çukur bölgelerine punta kaynakları uygulanmış ve flanşlar gövdeye monte edilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Ondülin gövde ve flanşların sabitlenmesi

OGK gövde yapısının dalgalı formda olması gövdenin daha ince olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. İnce gövde yapısına sahip kiriş ise özellikle yük aktarım ve mesnet bölgelerinde burkulmalara ve ezilmelere maruz kalabilmektedir. Bu etkileri minimize edebilmek ve de yüklerin kesit boyunca dengeli olarak aktarılması için dairesel boşluklu kirişlerde olduğu gibi gövdenin her iki yüzeyine berkitme levhaları Şekil 3.12’de görüldüğü üzere dikey olarak kaynaklanmıştır.



Şekil 3.12. Mesnet ve yük etki bölgelerindeki berkitme levhaları

3.4. Test Elemanlarının Deneysel Süreci

Bu tez çalışması kapsamında, Ondülin gövdeli çelik kirişlerin ve dairesel boşluklu çelik kirişlerin düz ve eğrisel formlarının deneyleri gerçekleştirilmiştir. Testler, tek noktadan ve iki noktadan yapılan tekil yüklemeler altında gerçekleştirilmiş ve her bir kiriş tipi için iki tekrarlı olarak uygulanmıştır. Testlerin tekrarlı olarak gerçekleştirilmesi, sonuçların güvenilirliğini sağlamayı hedeflemektedir. Test elemanlarının açıklıkları, 5,5 metre olarak belirlenmiştir.

Düz formdaki kirişlerin mesnet düzenlemesi, bir ucu sabit, diğer ucu hareketli olarak tasarlanmıştır. Eğrisel forma sahip kirişlerde ise kiriş her iki uç noktasında sabit mesnetler kullanılmıştır. Eğrisel formdaki kirişlerin her iki ucunda sabit mesnet kullanılmasıyla kemer formuna ve mesnet şartlarına bağlı olarak eksenel kuvvet etkisinin artırılması hedeflenmiştir. Bu sayede, düz formdan eğrisel forma geçişte eksenel kuvvetlerdeki artışın kirişlerin davranışı ve göçme modları üzerindeki etkisi incelenmiş ve yük taşıma kapasitelerindeki performansları değerlendirilmiştir.

Deneysel süreçte test edilen kirişlerin özellikleri, Çizelge 3.2'de belirtilmiştir. Bu çizelge, her bir kirişin üzerine uygulanan yük tiplerini, test sayısını ve kiriş model isimlerini içermektedir.

Çizelge 3.2. Kirişlerin adlandırılması ve uygulanan yükleme tipleri

Kiriş	Form	Model ismi	Yükleme tipi	Test adet
Dairesel Boşluklu Kiriş	Düz	DBK350-D	Tek Noktadan	2
Dairesel Boşluklu Kiriş	Eğrisel	DBK350-E	Tek Noktadan	2
Dairesel Boşluklu Kiriş	Düz	DBK350-D	İki Noktadan	2
Dairesel Boşluklu Kiriş	Eğrisel	DBK350-E	İki Noktadan	2
Ondülin Gövdeli Kiriş	Düz	DBK350-D	Tek Noktadan	2
Ondülin Gövdeli Kiriş	Eğrisel	DBK350-E	Tek Noktadan	2
Ondülin Gövdeli Kiriş	Düz	DBK350-D	İki Noktadan	2
Ondülin Gövdeli Kiriş	Eğrisel	DBK350-E	İki Noktadan	2

OGK350 ve DBK350 kirişleri, eğrisel ve düz formda olmak üzere iki farklı modelde tasarlanmıştır. Her iki kiriş tipi 600 kN yükleme kapasitesine sahip olan bir yük hücresi altında eğrisel ve düz modelleri tek ve iki noktadan yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Her bir kiriş tipi için testler tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Eğrisel formdaki OGK350 kirişinin, iki noktadan yükleme altında olan genel görünümü Şekil 3.13'te verilmektedir.



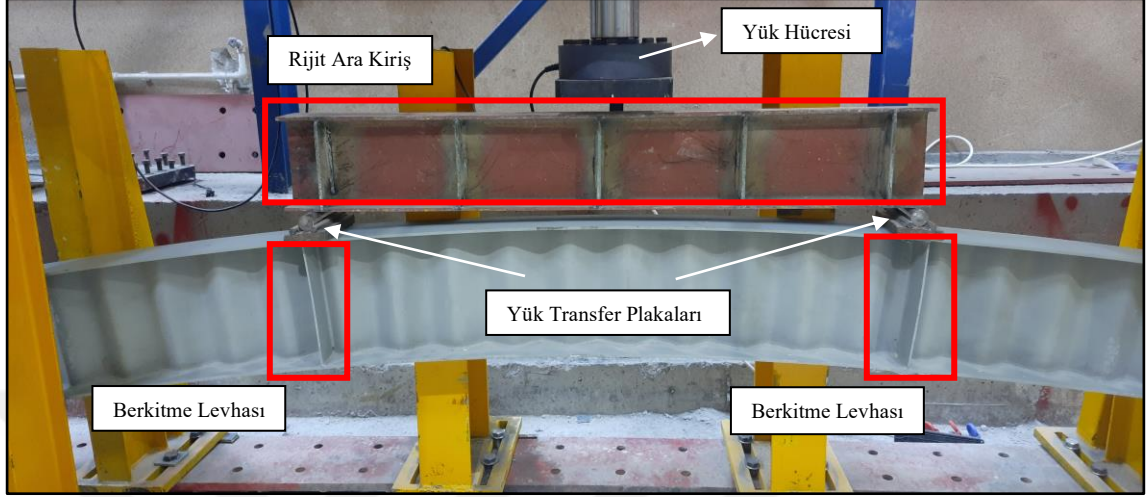
Şekil 3.13. Yükleme çerçevesi altında eğrisel ondülin gövdeli kiriş test düzeneği

Geniş açıklıklarda özellikle kirişin üst flanşında basınç gerilmelerinin oluşması, kesitin yanal olarak burkulmasına ve kirişin taşıma gücüne ulaşmadan göçmesine sebep olabilmektedir. Bu sorunu minimize etmek amacıyla, Şekil 3.14'te görüldüğü gibi yanal destekler açıklığın $L/6$, $2L/6$, $4L/6$ ve $5L/6$ bölgelerine yerleştirilmiştir. Bu şekilde, kirişin yanal burkulma etkisini azaltmak ve taşıma kapasitesini artırmak hedeflenmektedir. Bu tedbirler, kirişin dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü sağlayarak geniş açıklıklarda daha güvenli bir performans elde etmeyi amaçlamaktadır.



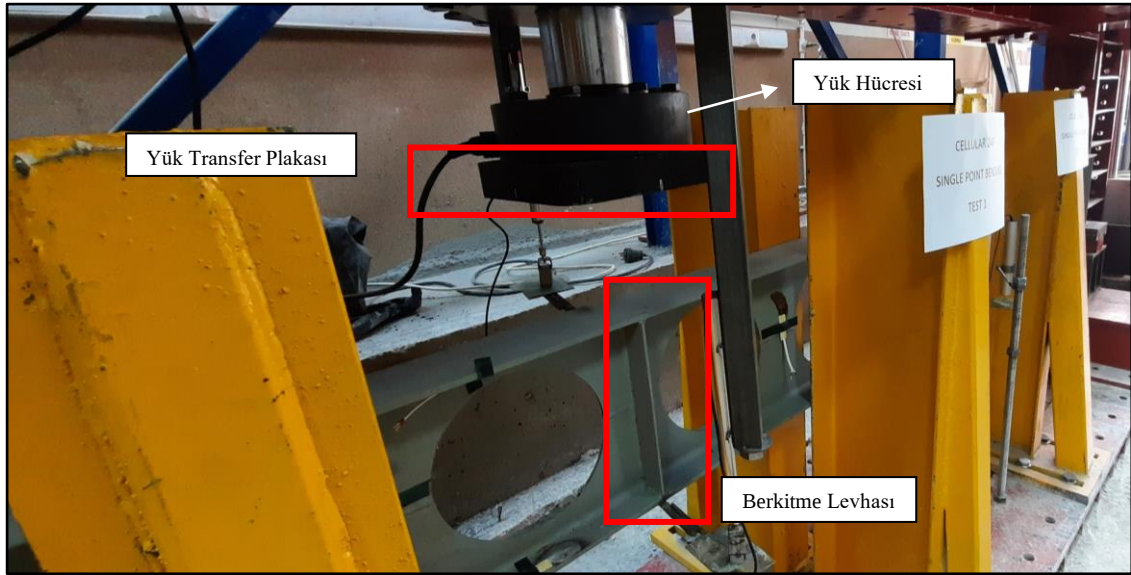
Şekil 3.14. Yanal desteklerin yerleşimi

İki noktadan yükleme durumunda, yük hücresinin altına yerleştirilen rijit ara kiriş aracılığıyla gelen yükler, test kirişinin iki noktasına simetrik bir şekilde iletilmiştir. Yüklerin aktarım bölgelerinde, kirişin üst flanşına 200x120x20mm ölçülerinde çelik plakalar yerleştirilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. İki noktadan yükleme, yük transfer bölgeleri

Tek noktadan yükleme durumunda ise, yük hücresinin altına yerleştirilen 280x280mm boyutlarında bir plaka kullanılarak yük etki ettirilmiştir. Berkitleme levhalarının konumları yük transfer noktalarına yerleştirilmiş ve böylece yüklerin etkin bir şekilde kirişte dağılması amaçlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Tek noktadan yükleme, yük transfer bölgeleri

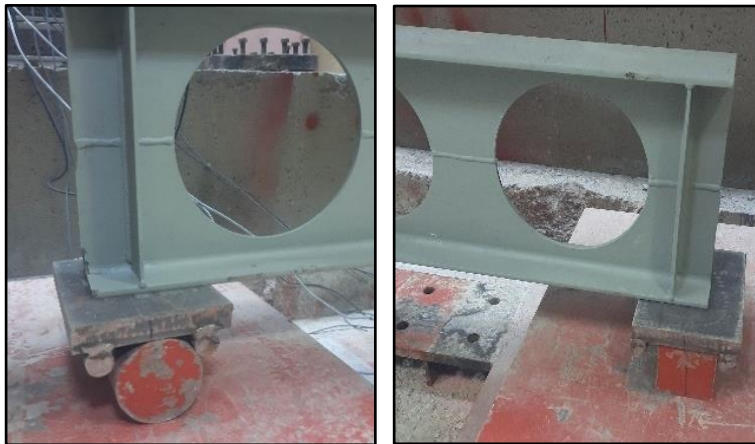
Eğrisel kiriş testlerinde mesnet koşulları olarak kirişin ötelenmeleri kısıtlı, dönme hareketi ise serbest olacak şekilde sabit mesnet tasarımı yapılmıştır. Mesnet, yükleme çerçevesine rijit bir şekilde bağlantısı yapılarak yatay ve dikey yönde hareket engellenmiştir. Kiriş-mesnet bağlantısında ise pim kullanılarak dönme hareketine izin verilmiştir (Şekil 3.17). Bu mesnet tasarımı ile kirişlerin kemer formundan dolayı hem yatay hem de dikey doğrultudaki mesnet tepki kuvvetlerinin kirişe aktarılması hedeflenmiştir. Bu sayede eğrisel kirişlerin yatay ve dikey yönlerdeki tepki kuvvetleri altında davranışı ve performansı beraber değerlendirilmiştir.

Mesnet taban levhasının kaymasını önlemek amacıyla, ilk olarak mesnet levhası ve yükleme çerçevesi kirişi temas yüzeyleri, sürtünme direncini azaltabilecek faktörler olan boya, toz ve kir gibi etkenlerden arındırılmıştır. Daha sonra, 10.9 kalitesindeki civatalara tork anahtarları kullanılarak öngerme uygulaması yapılmış ve böylece mesnet taban levhası yükleme çerçevesi kirişi üzerine sabitlenmiştir. Eğrisel formdaki OGK350 ve DBK350 kirişlerinin mesnet alın sacına bağlantısı ise kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



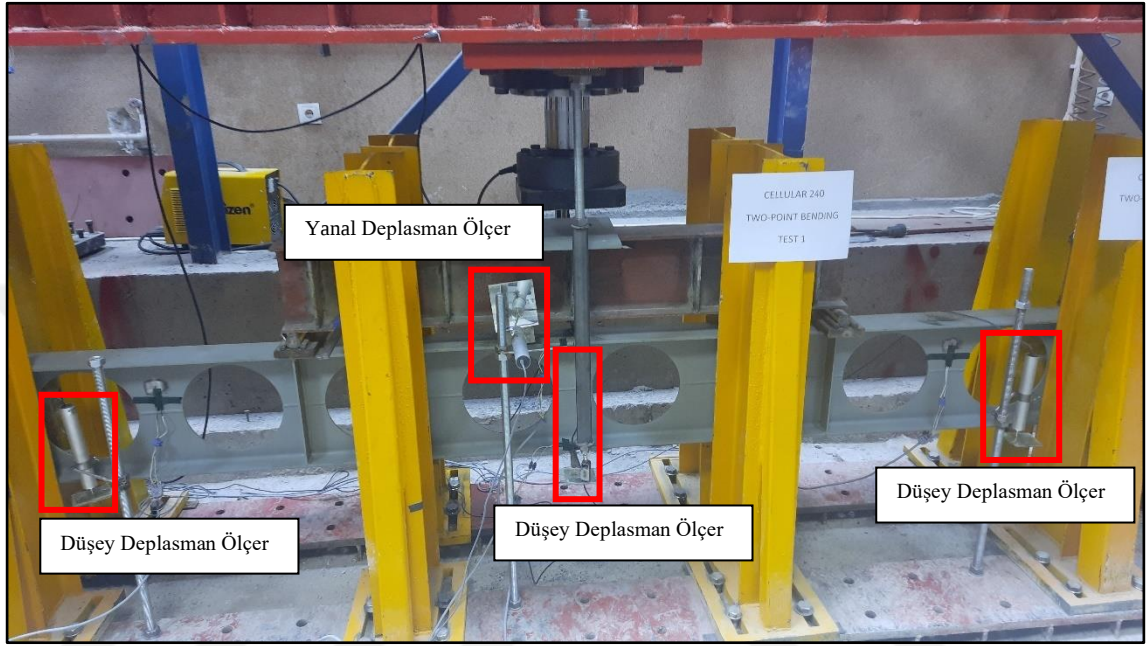
Şekil 3.17. Eğrisel kiriş testlerinde kullanılan sabit mesnet

Düz forma sahip kiriş testlerinde ise 25x10x10 cm ebatlarında çelik prizmatik kütükler kullanılarak sabit mesnet olarak değerlendirilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Düz kiriş testlerinde kullanılan mesnet

Testlerde yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesi için yükleme çerçevesine 600 kN kapasiteye sahip yük hücresinin (load cell) montajı yapılmıştır. Düşey yönde deplasman değerlerinin okunması için kiriş alt flanşın L/2 ve L/3 bölgelerine, olası yanıl burkulmalara bağlı oluşabilecek yanıl deplasmanlar için ise iki noktadan yükleme testlerinde kiriş L/2 noktasına, tek noktadan yükleme testlerinde ise yük hücresi ile ona en yakın yanıl destek arasına yanıl deplasman ölçerler (doğrusal değışken diferansiyel transformatörler-LVDT) yerleştirilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Düşey ve yanıl deplasmanların yerleşimi

Çizelge 3.3'te düz ve eğrisel formlara sahip DBK350 ve OGK350 kiriş modellerinin geometrik ölçüleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. OGK350 ve DBK350 kiriş modelleri geometrik özellikleri

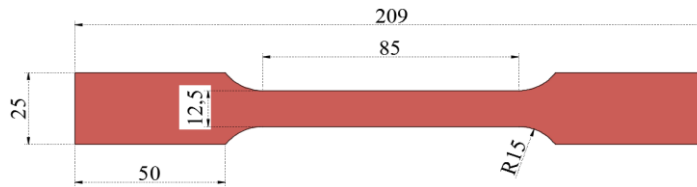
Geometrik Özellikler	Düz OGK350 (mm)	Eğrisel OGK350 (mm)	Düz DBK350 (mm)	Eğrisel DBK350 (mm)
Profil	Levha sac	Levha sac	IPE240	IPE240
Açıklık	5566	5491	5566	5491
Kesit Yüksekliği	346	346	351	351
Başlık Genişliği	160	160	120	120
Başlık Et Kalınlığı	8	8	9,8	9,8
Gövde Et Kalınlığı	3	3	6,2	6,2
Dalga Yüksekliği	43	43	-	-
Dalga Merkezleri arası Mesafe	155	155	-	-
Eğrilik Yarıçapı	-	9648	-	9648
Boşluk Çapı	-	-	269	269
Gövde Genişliği	-	-	120	120
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	-	-	389	389

3.5. Malzeme Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi

Mekanik özelliklerin belirlenmesi için, ASTM (*American Society for Testing and Materials*) E 8M yönetmeliğine göre boyutları belirlenen numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.21). O GK350 eğrisel ve düz üretiminde kullanılan her tabakadan iki (2) adet olmak üzere toplamda on dört (14) numune, DBK350 kirişi için ise artan parçaların flanş ve gövdelerinden her birinden üç (3) adet olmak üzere toplamda yirmi dört (24) numune, CNC (Bilgisayar Nümerik Kontrolü) ile alınmış ve çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testleri, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi laboratuvarında kalibrasyonları yapılmış 600 kN kapasiteli çekme testi cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Alınan numuneler ve çekme test cihazı



Şekil 3.21. Numune geometrik özellikleri

Çekme testi sonuçlarından elde edilen malzemelerin ortalama mekanik özellikleri, Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Malzeme mekanik özellikleri

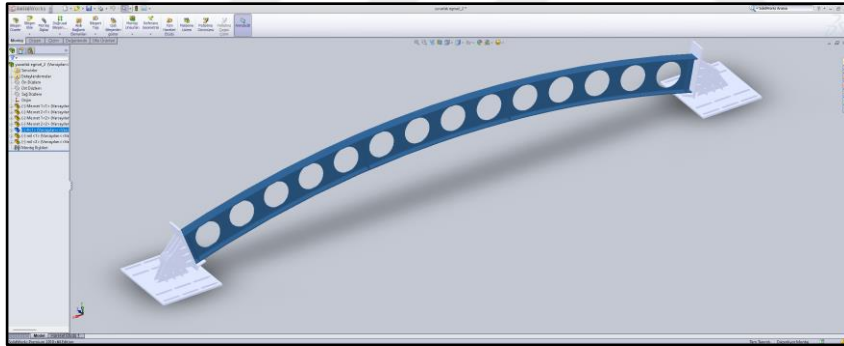
Kupon	Akma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)
DBK350	320	1,91x10 ⁵	1420
OGK350	311	1,91x10 ⁵	1420

3.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi

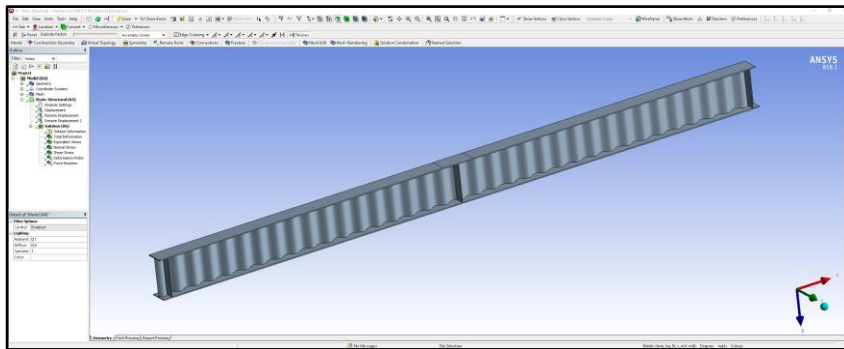
Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), mühendislik uygulamalarında karmaşık yapıların analizi, tasarımı ve optimize edilmesinde kritik bir öneme sahip sayısal bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, bir yapıyı sonlu küçük elemanlara ayırarak her bir elemanın davranışını matematiksel olarak ifade eder ve bu elemanları bir araya getirerek karmaşık yapıların davranışını simüle eder. SEA, farklı geometriler, malzemeler ve yükler altında yapıların nasıl davrandığını anlamaya olanak tanır.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar çelik kirişlerin davranışlarını anlamak için büyük bir önem taşımaktadır. Ancak, SEA bu deneylerin daha detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlar ve deneysel çalışmanın doğrulanması için kritik bir rol oynar. Bu bağlamda, deneysel çalışmalardan elde edilen veriler SEA ile birleştirilerek eğriselliğin çelik kirişlerin taşıma kapasitesine olan etkisi, hem deneysel hem de sayısal olarak ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Düz ve eğrisel formlara sahip DBK350 ve OGG350 kirişlerinin üç boyutlu katı modeli *SOLIDWORKS* programında, SEA ise *ANSYS-Workbench V18.1* yazılımında yapılmıştır. Deneysel çalışmada göçme yüklerine karşılık gelen deplasmanlar sonlu elemanlar analizinde de deplasman olarak verilmiş ve kuvvet reaksiyonlarının elde edilmesi ile yük-deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Aynı zamanda SEA ile model üzerindeki gerilme ve deplasman dağılımları, deformasyon özellikleri detaylı olarak elde edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi analiz adımları ana başlıklar halinde aşağıda açıklanmıştır (Şekil 3.22, 3.23).



Şekil 3.22. Solidworks programı arayüzü

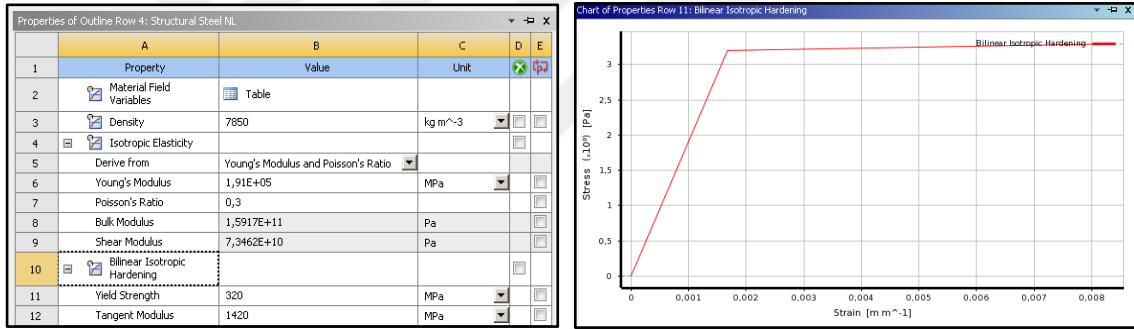


Şekil 3.23. Ansys-Workbench yazılımı arayüzü

3.6.1. Malzeme özellikleri

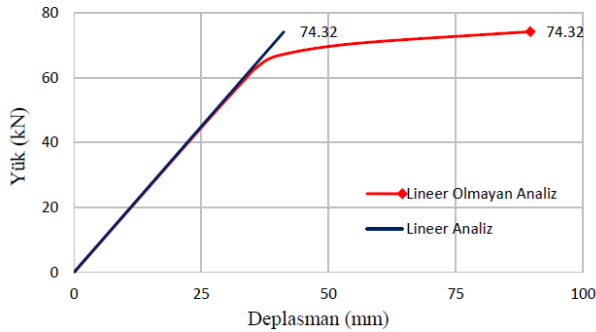
Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle SEA sonuçlarının karşılaştırılmasında, malzeme parametrelerinin yazılıma doğru ve güvenilir bir şekilde tanımlanması son derece önemlidir. Malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, sonlu elemanlar analizinin daha güvenilir ve geçerli sonuçlar üretmesine yardımcı olurken, deneysel veriler ile SEA sonuçlarının kıyaslanmasında oldukça önemlidir.

Birçok malzeme büyük yükler veya deformasyonlar altında lineer olmayan bir şekilde davranır. Bu, malzemenin elastik sınırlarını aşarak plastik deformasyona uğradığı, malzeme özelliklerinin yük altında değiştiği anlamına gelir. Lineer olmayan malzeme modelleri, bu gerçekçi davranışları daha iyi yakalayabilir. Deneysel çalışmalarla elde edilen verilerle uyumlu bir şekilde, malzemenin doğru davranışını modellemek için lineer olmayan malzeme modelleri gereklidir. Bu nedenle Ansys yazılımı malzeme kütüphanesinde “*General Non-Linear materials*” bölümünden “*Structurel Steel NL*” malzeme modeli seçilmiş ve kiriş numunelerinden elde edilen mukavemet özellikleri bu model üzerine tanımlanmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Malzeme parametrelerinin tanımlanması

Lineer olmayan malzeme davranışı, belirli yükleme koşulları altında lineer davranan modellerden önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Bu nedenle, malzeme özellikleri ve yapılan çözümleme lineer olmayan davranışı doğru bir şekilde yansıtmazsa, sonlu elemanlar analizi yanıltıcı sonuçlar verebilir. Şekil 3.26’da örnek olarak verilen grafiklerde bu durum açıkça görülmektedir.



Şekil 3.26. Lineer ve lineer olmayan analiz kıyaslanması

3.6.2. Mesh tipi ve boyutları

Sonlu elemanlar analizinde, mesh (ağ yapısı) tipi ve boyutlarının doğru bir şekilde belirlenmesi, analizin başarısı ve sonuçların güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Mesh tipi, geometrinin doğasına ve analiz türüne uygun bir biçimde seçilmelidir. Örneğin, düzlemsel geometriler için üçgen veya dörtgen elemanlar, karmaşık 3D geometriler için ise tetrahedral veya hexahedral elemanlar tercih edilebilir. Mesh tipi, analiz modeli ile en iyi uyumu sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Bu bağlamda, Ansys Workbench'in sunmuş olduğu "Tetrahedrons," "Automatic," ve "Hex-dominant" gibi mesh tipleri, hem DBK350 hem de OGK350 kiriş modellerine uygulanmış ve OGK350-E kirişi için elde edilen düğüm noktası, eleman sayıları Çizelge 3.5'te verilmiştir. SEA sonuçlarının hassasiyeti göz önüne alındığında, Tetrahedrons mesh tipi diğerlerine göre daha fazla düğüm noktası ve eleman sayısı sağladığı için "Tetrahedrons" mesh tipi tercih edilmiştir.

Çizelge 3.5. Mesh tiplerine göre düğüm ve eleman sayıları

Mesh Tipi	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı
Automatic	92709	22620
Hex-dominant	121898	60927
Tetrahedrons	122112	61155

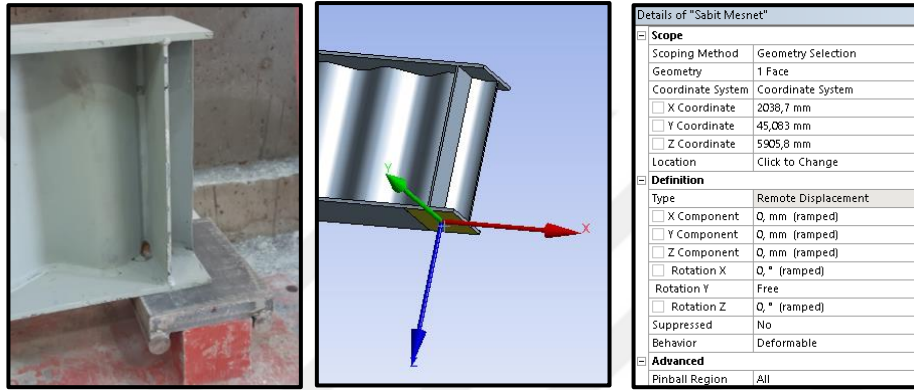
Mesh boyutları, elemanların boyutunu ve analizin ayrıntı düzeyini belirler. İnce bir mesh, daha hassas sonuçlar elde etmeye yardımcı olabilir, ancak hesaplama sürelerini uzatabilir. Kaba bir mesh, hesaplama sürelerini kısaltabilir, ancak sonuçların doğruluğunu düşürebilir. Yakınsama ilkesi, bu aşamada büyük bir öneme sahiptir. Yakınsama, bir sayısal analiz veya hesaplama sürecinin, tekrarlanan adımlarla daha hassas sonuçlara yaklaşılarak durduğu veya sabitlendiği noktayı ifade eder. Yani, analizin sonuçları her tekrarlama bir öncekine daha yakın hale gelir ve sonunda değişmez hale gelir. Mesh boyutları için başlangıçta daha kaba bir mesh ile başlanır ve sonuçlar mesh çözünürlüğü arttıkça istikrarlı hale gelir. Bu, sonuçların daha kesin ve güvenilir hale geldiği anlamına gelir.

DBK350 ve OGK350 kiriş modelleri üzerinde mesh boyutları, kademe kademe azaltılarak her farklı mesh boyutunda analiz tekrarlanmıştır. Farklı mesh boyutlarına karşılık gelen maksimum Von-Mises gerilmeleri elde edilmiş ve 25 mm mesh boyutunda gerilmelerin yakınsadığı görülmüştür. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere 25 mm mesh boyutu seçilmiştir.

3.6.3. Mesnetlerin tanımlanması

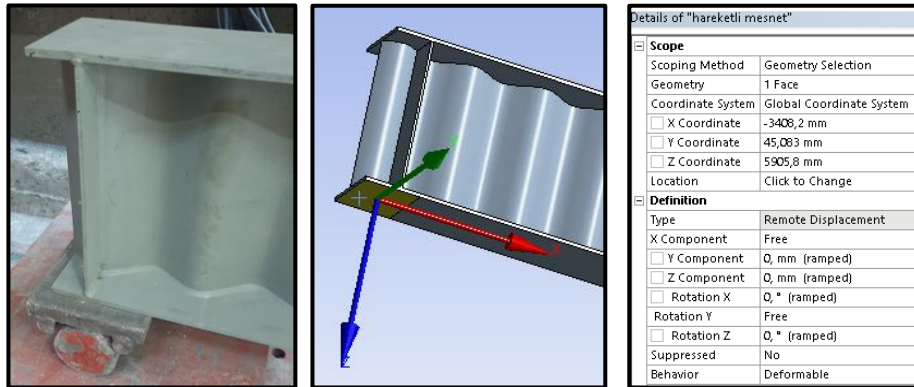
Sonlu elemanlar analizinde tanımlanan mesnetlerin deneysel çalışmalarla uyumlu olması, elde edilen sonuçların doğru ve deneysel verilerle karşılaştırılabilir olmasını sağlar, ayrıca kirişlerin davranışını doğrudan etkiler.

Deneylerde DBK350 ve OGK350 kiriş modellerinde sabit mesnet ve hareketli mesnet kullanılmıştır. Bu mesnetlerin davranışı Ansys-Workbench programında “Remote Displacement” ile simüle edilmiştir. Düz formda olan modellere deneysel çalışma ile uyumlu olarak sabit mesnet özelliği tanımlanabilmesi için X, Y, Z doğrultularındaki hareketleri, X ve Z eksenleri etrafındaki dönmesi engellenmiştir. Y eksenini etrafındaki dönme ise serbest bırakılmıştır (Şekil 3.27).



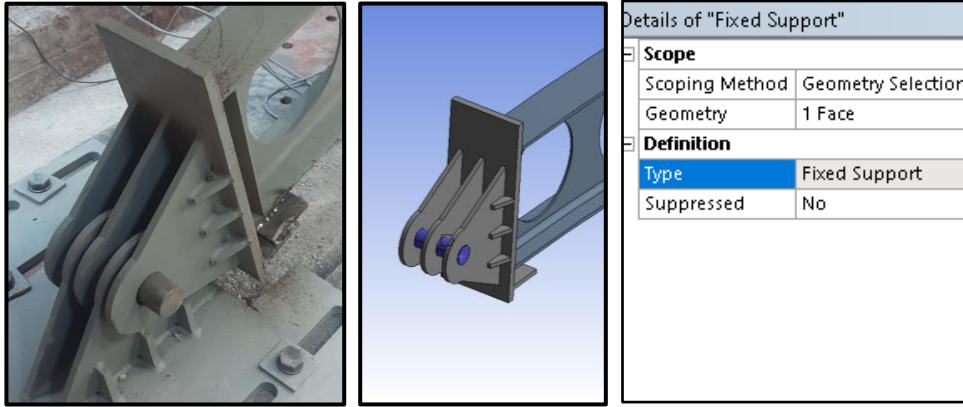
Şekil 3.27. Sabit mesnet tanımlamaları

Düz form kirişlerde hareketli mesnet özelliği verilmesi için Şekil 3.28’de görüldüğü üzere X eksenini doğrultusunda hareketi, Y eksenini etrafında ise dönmesi serbest bırakılmıştır. Diğer eksenlerde ise hareket ve dönmeler tutulmuştur.



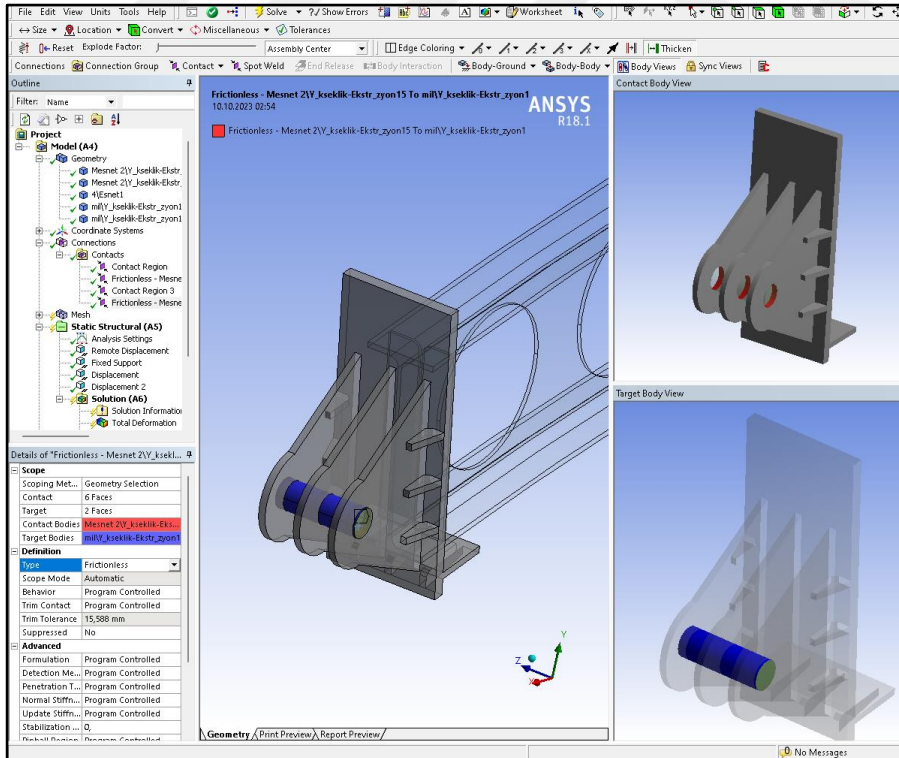
Şekil 3.28. Hareketli mesnet tanımlamaları

Eğrisel formda olan kiriş modellerinde ise Şekil 3.29’da görüldüğü gibi, ilk aşamada mesnetin dönme merkezi olan pim, “fixed support” olarak programda tanımlanması ile ankastre mesnet özelliği kazandırılmıştır.



Şekil 3.29. Mesnet-pim bağlantısı

Sonrasında bu pime temas eden bağlantı parçalarının pim etrafında serbest olarak dönebilmesi, moment aktarmaması için aralarındaki sürtünme kuvveti ihmal edilmiş ve sadece kuvvet aktarımı sağlanmıştır. Bunun için Şekil 3.30’da da görüldüğü gibi “Contact” bölümünde “Frictionless” seçilerek deneysel çalışmada kullanılan mesnet simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

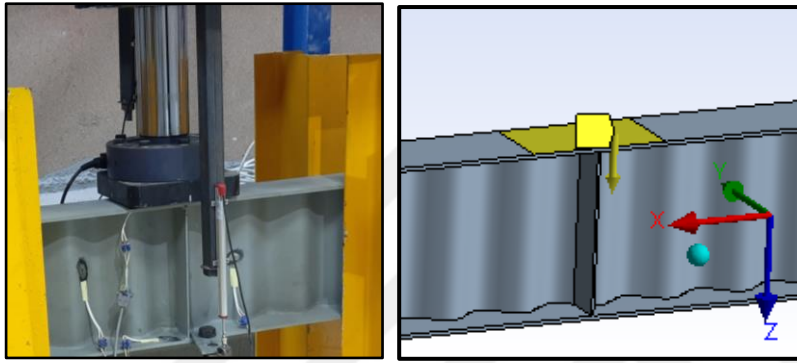


Şekil 3.30. Sabit mesnet bağlantı tipinin tanımlanması

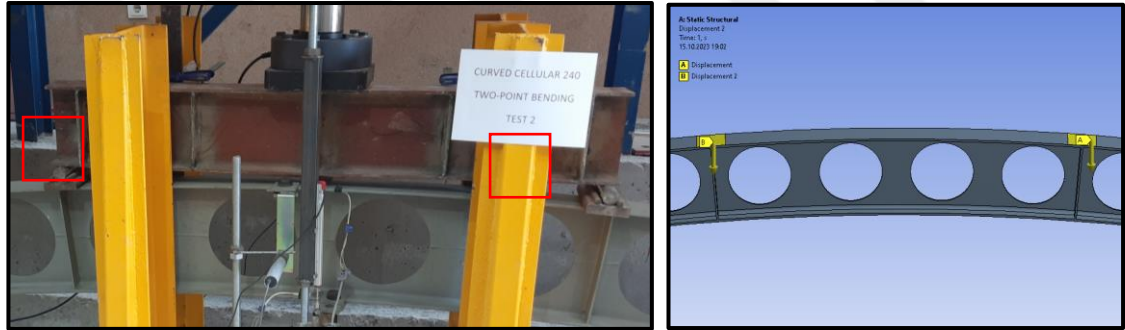
3.6.4. Yük ve deplasmanlar

Deneyisel olarak düz ve eğrisel formlara sahip DBK350 ve OGG350 kiriş tiplerinin yük taşıma kapasiteleri ile bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar belirlenmiş ve eğriselliğin yük taşıma kapasitesine etkisi değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, SEA aşamasında da, bu etkinin belirlenebilmesi için kiriş modellerinin yük etki bölgelerine deplasman verilmiş ve bu deplasman verilen bölgeden kuvvet reaksiyonları hesaplanmıştır.

Ansys-Workbench yazılımında kuvvetlerin elde edilebilmesi için ilk etapta Şekil 3.31 ve Şekil 3.32’de görüldüğü gibi, yük hücresinin (Load Cell) kirişle temas ettiği alan model üzerinde oluşturulmuş ve bu alana deplasman verilmiştir.

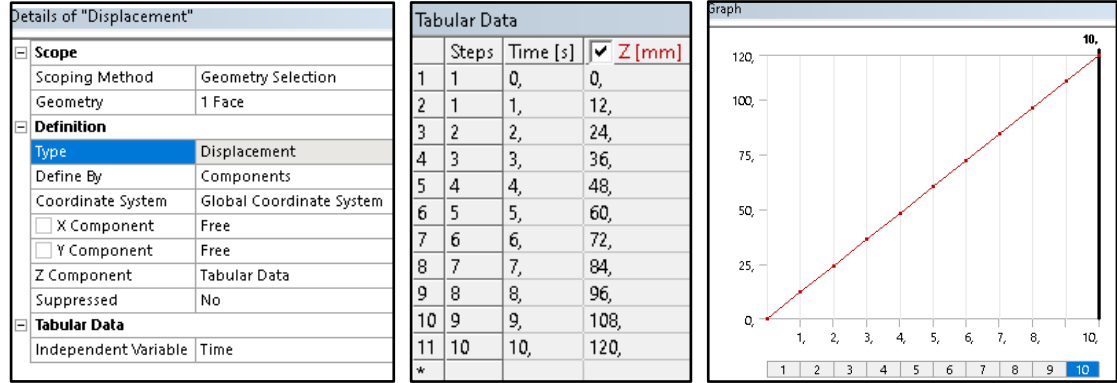


Şekil 3.31. Tek noktadan deplasman verilmesi



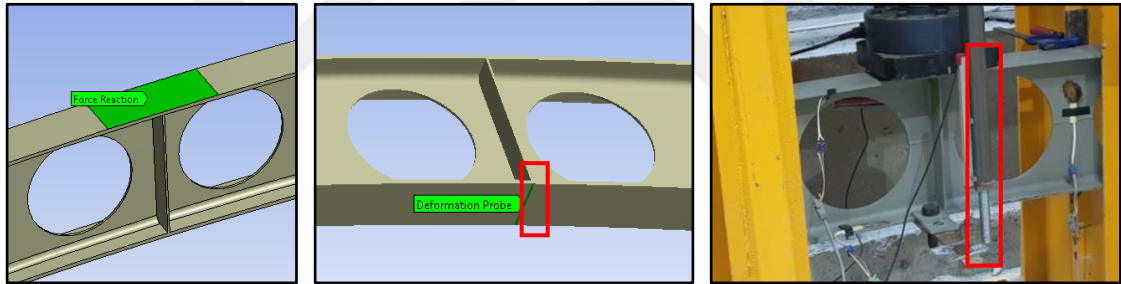
Şekil 3.32. İki noktadan deplasman verilmesi

Nihai deplasman Şekil 3.33’te görüldüğü gibi 10 adımda aşamalı olarak tanımlanmıştır. Deplasmanın adım adım verilmesi non-lineer olarak yapılan statik analizlerde doğrusal olmayan etkilerin daha hassas bir şekilde hesaplanabilmesini, analizin güvenilirliğinin artırılmasını ve yakınsama sorunlarının etkili bir şekilde ele alınabilmesini sağlar.



Şekil 3.33. Yük etki alanına deplasman verilmesi

Ansys Workbench yazılımı, yapısal analizlerde, belirli yük etki bölgelerine uygulanan deplasmanlar ile ilişkili kuvvet reaksiyonlarını tespit edilmesinde önemli bir işleve sahiptir. "force reaction" özelliğiyle, belirlenen deplasman noktalarında oluşan kuvvet reaksiyonları hassas bir şekilde belirlenmektedir. Ayrıca, "deformation probe" ile model üzerinde belirli noktalardaki deformasyon ölçümleri yapılabilir. Deneyisel çalışmada kiriş merkezi alt flanşından düşey deplasman verileri alındığı için kiriş modellerinde alt flanşa probe yerleştirilerek düşey yöndeki deplasmanlar elde edilmiştir (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. Yük ve deplasmanların elde edilmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, dairesel boşluklu kirişlerin (DBK) ve ondülin gövdeli çelik kirişlerin (OGK) düz ve eğrisel formlarının yük taşıma kapasiteleri, göçme modları ve davranışları üzerine yapılan deneysel verilere odaklanılmıştır. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi yapı laboratuvarında, 1000 kN yük kapasitesine sahip yükleme çerçevesinde test edilen kirişlerden elde edilen verilerin doğrulanması amacıyla ANSYS Workbench yazılımı kullanılarak, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve kirişler kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

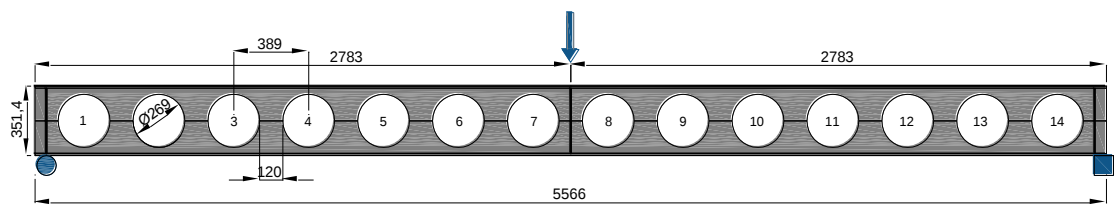
4.1. Dairesel Boşluklu Kiriş Testleri

4.1.1 DBK-D tek noktadan yükleme

Geometrik özellikleri Şekil 4.2’de verilen düz forma sahip DBK350-D kirişi ile tekrarlı olarak iki adet test yapılmıştır. Kirişin orta merkezine uygulanan tek noktadan yük altında yükleme çerçevesindeki genel yerleşimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



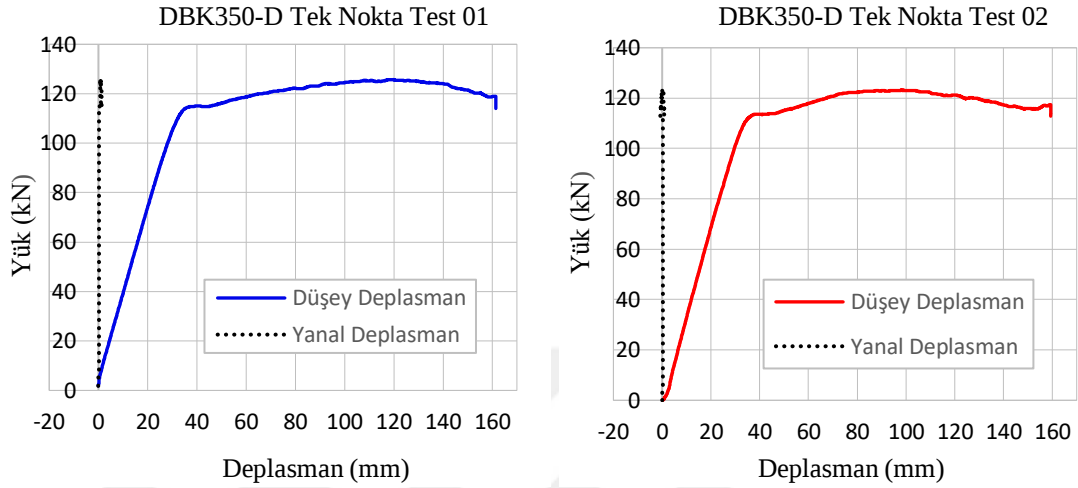
Şekil 4.1. DBK350-D tek noktadan yükleme genel yerleşimi



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

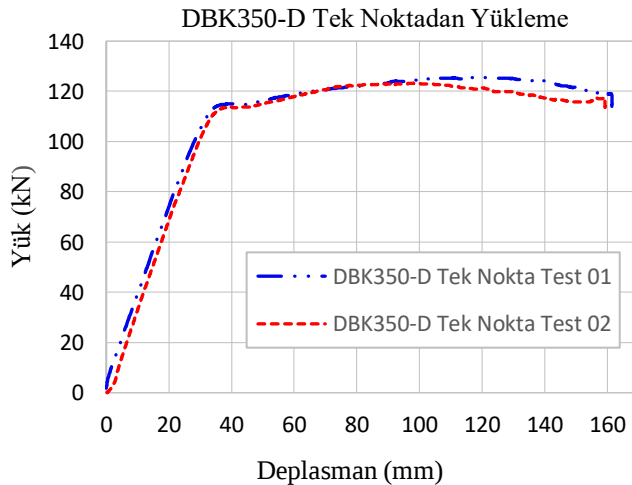
Şekil 4.2. DBK350-D kiriş geometrik özellikleri

Tek noktadan yük altında DBK350-D kirişi ile tekrarlı olarak yapılan testler sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 125,8 kN ve 123,2 kN, bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar ise 119,7 mm ve 98,1 mm olarak ölçülmüştür. Yanal deplasmanlar ise 1,3 mm ve 1,4 mm olarak oldukça düşük mertebededir (Şekil 4.3).



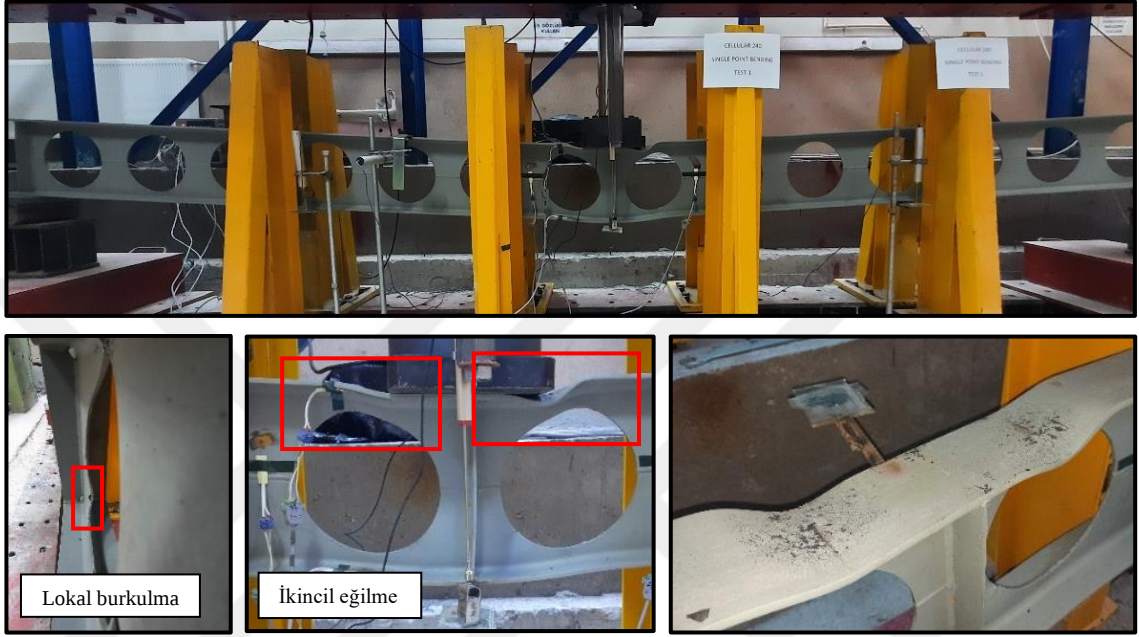
Şekil 4.3. DBK350-D tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri

Düz forma sahip DBK350 tek noktadan yükleme altında testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre ortalama taşıma gücü 124,5 kN, maksimum yüklere karşılık gelen deplasmanların ortalaması ise 108,9 mm olarak belirlenmiştir. Kirişler non-lineer bölgede kararlı bir davranış sergilemiş olup yükte azalma olmadan deplasman yapmaya devam etmiştir. Yük etki noktasına yerleştirilen berkitme levhalarının, gövde burkulması gibi kiriş kapasitesini sınırlayan etkileri önlemede oldukça etkin olduğu, kirişin sünek bir davranış göstermesine katkıda bulunduğu ifade edilebilir (Şekil 4.4).

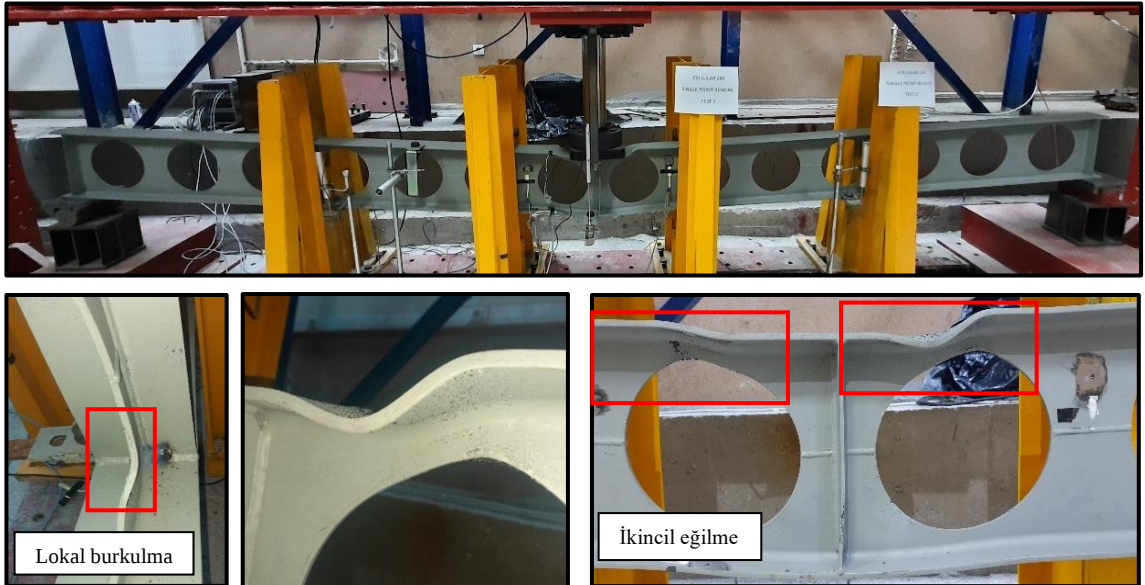


Şekil 4.4. DBK350-D tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması

Kirişlerde kesme kuvvetlerinin her bir boşluk boyunca aktarılmasından kaynaklanan ikincil momentlerin etkisiyle ikincil (Vierendeel) eğilmeler ortaya çıkmış, gövde boşluk çevrelerinde ise basınç gerilmelerine bağlı olarak lokal burkulmalar tespit edilmiştir. Web post burkulması, yanal burkulma veya kaynaklarda herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Yük etki bölgesinde, üst flanşa oluşan ikincil eğilmeler kirişlerin göçmesine neden olmuştur. Deneylere ait fotoğraflar Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.5. DBK350-D tek noktadan yükleme, test-01 göçme modları



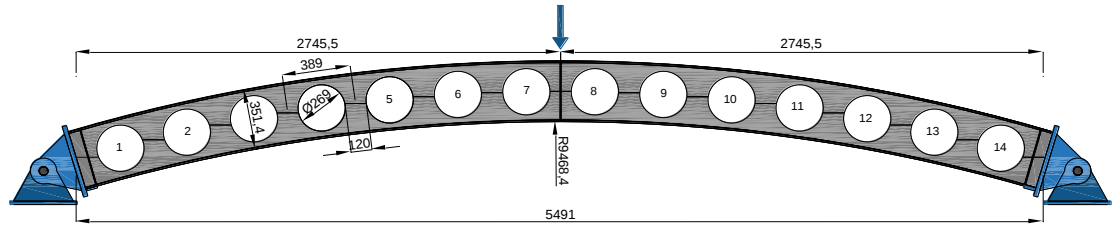
Şekil 4.6. DBK350-D tek noktadan yükleme, test-02 göçme modları

4.1.2. DBK-E tek noktadan yükleme

DBK350-E kiriş modeli, geometrik özellikleri Şekil 4.8'de gösterilen eğrisel formuyla incelenerek, tek noktadan uygulanan yükleme altında iki farklı testten geçirilmiştir. Yük hücresi ile yük hücresinin kirişe temas ettiği yüzey arasında oluşan yatay sürtünmelerden dolayı yük etki bölgelerinde yanal deplasman oluşmamaktadır. Yük hücresi aynı zamanda yanal destek görevini üstlenmektedir. Bu bağlamda, yanal deplasman ölçer, açıklık ortası yerine kiriş uzunluk boyunca L/3 bölgesindeki iki yanal destek arasına konumlandırılmıştır. Eğrisel kirişin yükleme çerçevesindeki genel görünümü Şekil 4.7'de verilmiştir.



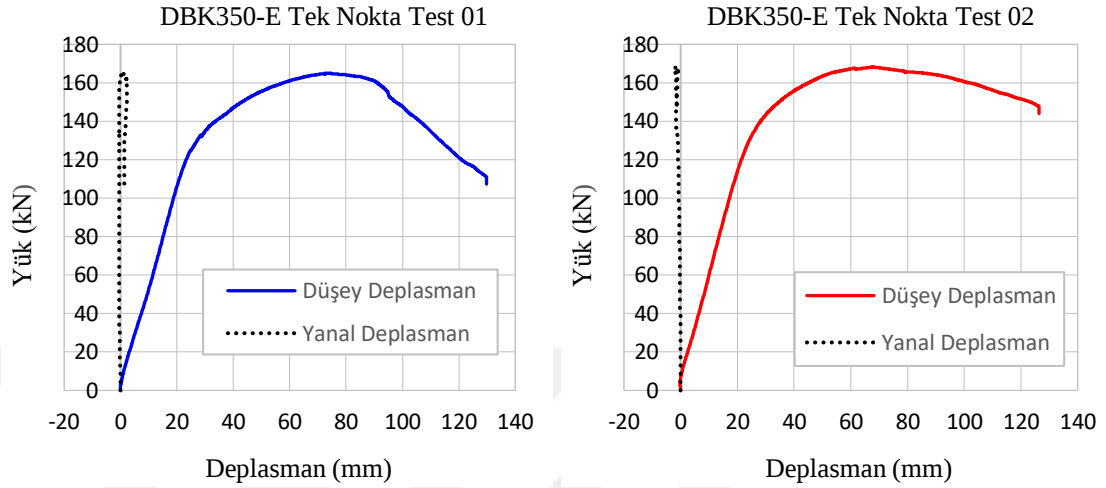
Şekil 4.7. DBK350-E tek noktadan yükleme genel görünümü



Kiriş İlk Yükseklik	240 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	120 mm
Kiriş Son Yükseklik	351,4 mm	Boşluk Adet	14
Boşluk Çapı	269 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5491 mm
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	389 mm	Eğrilik Yarıçapı	9468 mm

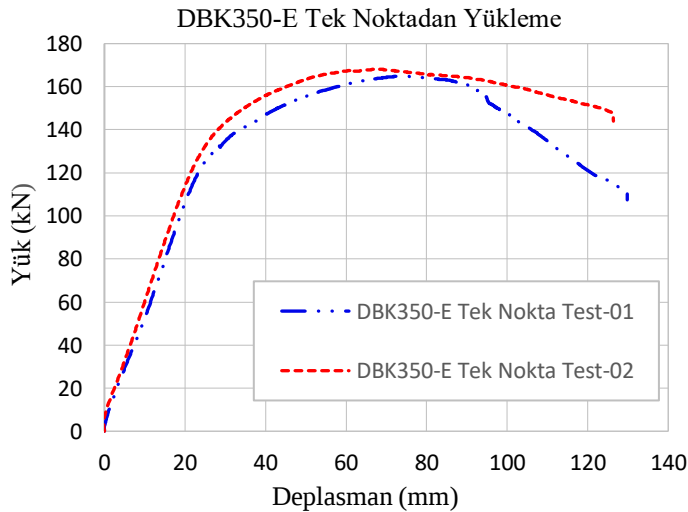
Şekil 4.8. DBK350-E kirişi geometrik özellikleri

Eğrisel formdaki DBK350-E kirişi, tek noktadan uygulanan iki tekrarlı yükleme sonucunda sırasıyla 164,8 kN ve 168,2 kN yük taşıma kapasitelerine ulaşmıştır. Bu kapasitelerle ilişkilendirilen deplasman değerleri ise 74,3 mm ve 67,8 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca, maksimum yanal deplasman 2 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.9).



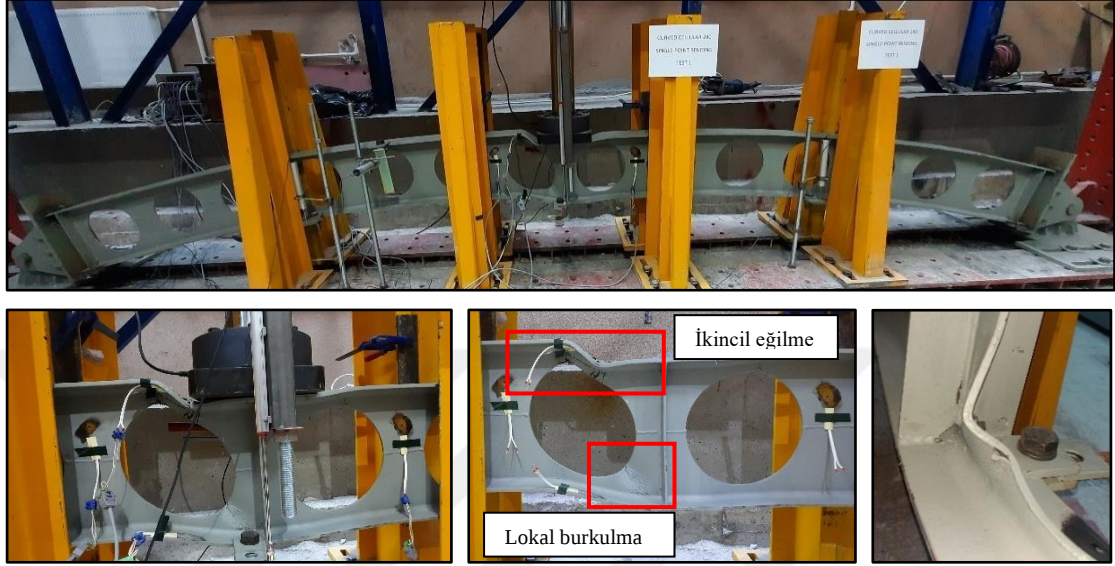
Şekil 4.9. DBK350-E tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri

Test sonuçlarına göre, ortalama taşıma gücü 166,5 kN ve maksimum yüke karşılık gelen ortalama deplasman 71,1 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.10'da yük-deplasman grafiğinden anlaşılabileceği üzere, non-lineer bölgede yük belirgin bir artış ile maksimum değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünde önemli bir ölçüde azalma olmadan taşımaya ve deplasman yapmaya devam etmiştir. Ayrıca, tekrarlanan iki test, kendi içinde oldukça tutarlı sonuçlar vermiştir. Maksimum yüklerin yanı sıra bu yüklere karşılık gelen deplasman değerleri de birbirine son derece yakın bulunmuştur.

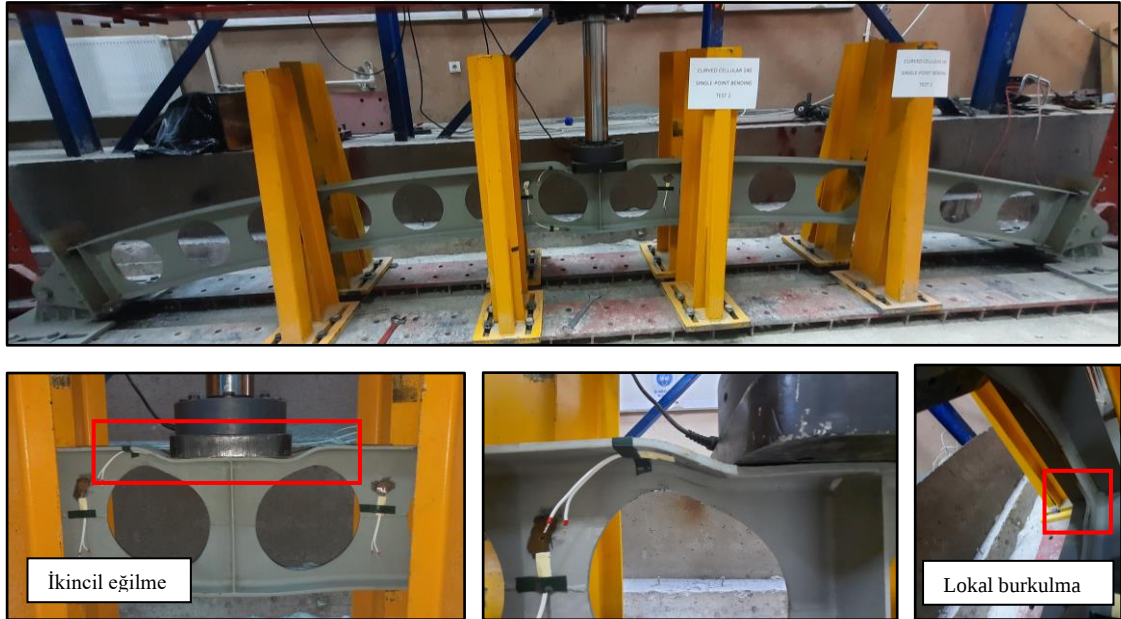


Şekil 4.10. DBK350-E tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma

Kemer formundaki DBK350 kirişlerinde, kiriş merkezi yük etki bölgesinde ikincil eğilmelerin belirgin hale gelmesiyle birlikte yük artışında bir düşüş gözlenmiştir. Kirişin üst flanşındaki ikincil eğilmeler ve çevresindeki lokal burkulmalar, kirişin taşıma gücünü kısıtlayan göçme modları olarak etkili olmuştur. 1. teste ait deney sonrası çekilen fotoğraflar Şekil 4.11’de 2. teste ait fotoğraflar ise Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.11. DBK350-E tek noktadan yükleme, test 01 göçme modları

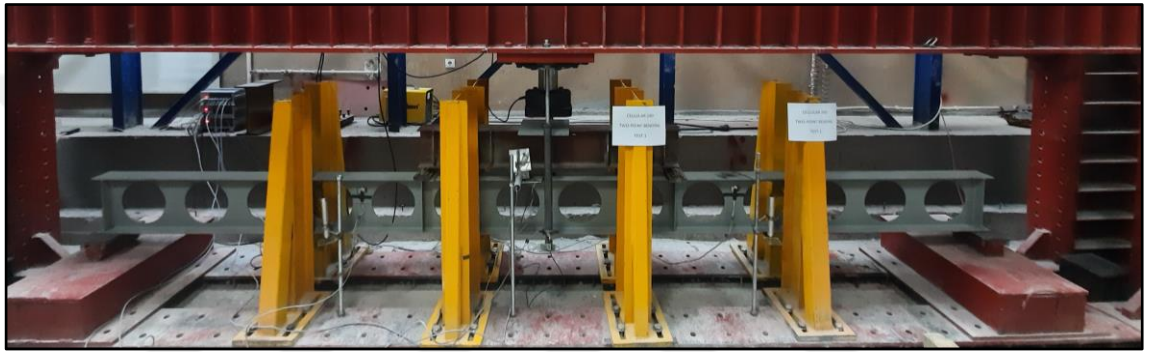


Şekil 4.12. DBK350-E tek noktadan yükleme, test 02 göçme modları

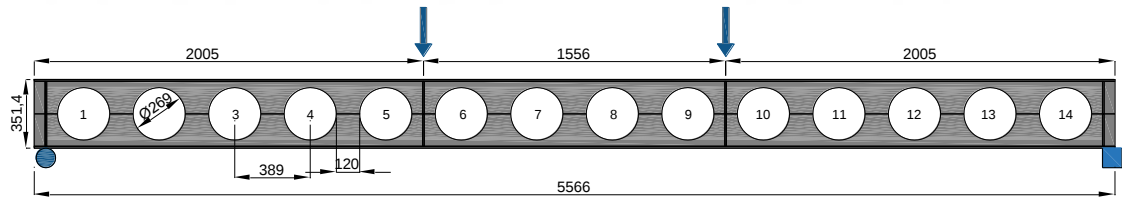
4.1.3. DBK-D iki noktadan yükleme

Geometrik özellikleri Şekil 4.14'te verilen düz forma sahip DBK350 kiriş modeli üzerinde iki noktadan yükleme altında iki adet test yapılmıştır. Yükleme çerçevesindeki genel görünümü Şekil 4.13'te verilmiştir.

Yük hücresinin altına yerleştirilen rijit ara kiriş ve bu ara kirişin her iki ucuna konumlandırılan moment aktarmayan rijit çelik plakalar aracılığıyla, 5,5 metre açıklıklı ana kirişe yük uygulanmıştır. Bu rijit çelik plakalar, boşluk merkezlerinin ortasına (web-post) 155 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Ara kirişten gelen yükleri ana kirişe aktaracak olan moment aktarmayan çelik plakaların merkezlerine çelik silindirler yerleştirilmiştir. Bu sayede, yüklerin çelik plakaların merkezinden ve ana kiriş başlığına dik olarak aktarılması sağlanmıştır.



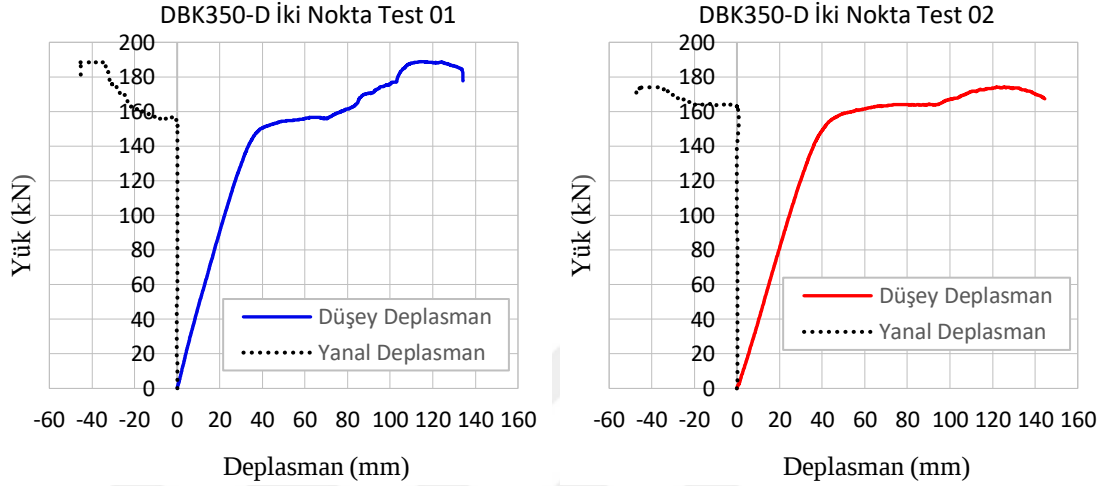
Şekil 4.13. DBK350-D iki noktadan yükleme genel görünümü



Kiriş İlk Yükseklik	240 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	120 mm
Kiriş Nihai Yükseklik	351,4 mm	Boşluk Adet	14
Boşluk Çapı	269 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5566 mm
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	389 mm		

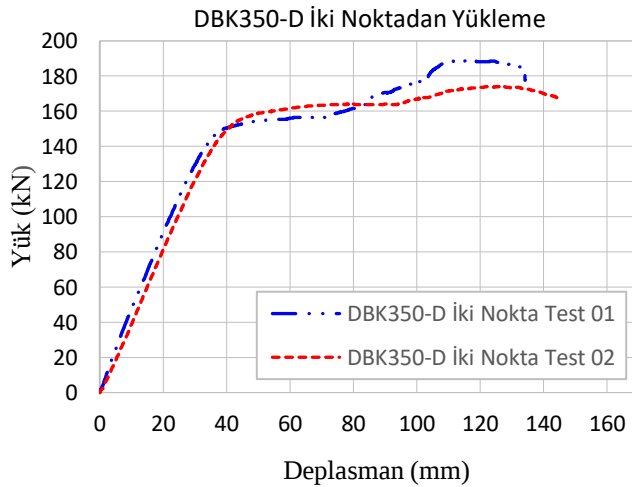
Şekil 4.14. DBK350-D kirişi geometrik özellikleri

Düz forma sahip DBK350-D kiriş modeli ile tekrarlı olarak yapılan iki noktadan yapılan yükleme testleri ile kirişlerin yük taşıma kapasiteleri sırası ile 188,9 kN ve 174,1 kN, bu kapasitelere karşılık gelen deplasman değerleri 114,4 mm ve 125,6 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yanıl deplasman ise 48 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.15).



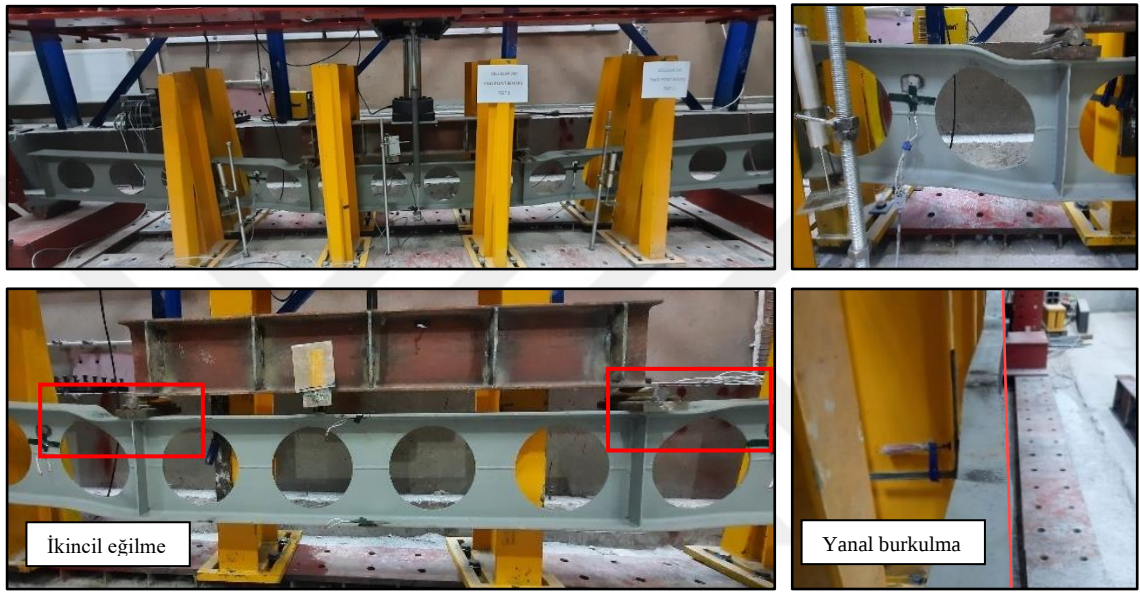
Şekil 4.15 DBK350-D iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri

Deney sonuçlarına göre, iki kirişin ortalama taşıma kapasitesinin 181,5 kN olduğu ve maksimum yüklere karşılık gelen ortalama deplasmanın 120 mm olduğu belirlenmiştir. Her iki deneyde, kirişler elastik bölgeyi aştıktan sonra, yükte azalma olmaksızın önemli ölçüde düşey deplasman yapmıştır. Bu, kirişlerin belirli bir yük seviyesine kadar plastikleşme gösterdiğini ve taşıma kapasitesini artırdığını göstermektedir. Belirgin bir şekilde plastik deformasyonların artması ile beraber kirişlerde yapısal bütünlük bozulmuş ve kiriş nihai kapasitesine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra yükte gözlenen düşüş, malzemenin taşıma kapasitesinin sınırlarını aştığı ve kirişin göçme sürecine girdiği anlamına gelmektedir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. DBK350-D İki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma

Eğilme momentlerinin etkisi ile kiriş üst flanşında yüksek mertebede normal basınç kuvvetlerine maruz kalması sonucu her iki deneyde de kiriş merkezinde yanal burkulma ve de yük etki bölgelerinde ikincil eğilmeler meydana gelmiştir. Ayrıca ikincil eğilmelerin meydana geldiği boşluk çevrelerinde lokal burkulmalar görülmüştür. Kiriş gövdesinde yatay kesme kuvvetlerinden kaynaklanan veya global kesme kuvvetlerine bağlı olarak, açıklık ve mesnet bölgelerinde herhangi bir gövde burkulması oluşumu gözlemlenmemiştir. Yük etki noktalarının berkitme levhaları ile güçlendirilmesi gövde burkulmalarının engellenmesinde oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. 1. teste ait deney sonrası çekilen fotoğraflar Şekil 4.17’de 2. teste ait fotoğraflar ise Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.17. DBK350-D iki noktadan yükleme, test 01 göçme modları



Şekil 4.18. DBK350-D iki noktadan yükleme, test 02 göçme modları

4.1.4. DBK-E iki noktadan yükleme

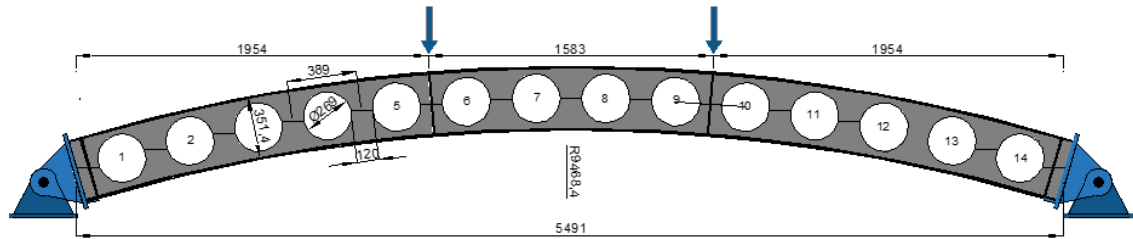
Geometrik özellikleri Şekil 4.20’de verilen eğrisel forma sahip DBK350 kiriş modeli üzerinde iki noktadan yükleme altında tekrarlı olarak iki adet test yapılmıştır. Yükleme çerçevesindeki genel görünümü Şekil 4.19’da verilmiştir.

Yük hücresi ile ana kiriş arasına yerleştirilen rijit ara kiriş ve bu ara kirişin her iki ucuna konumlandırılan moment aktarmayan rijit çelik plakalar aracılığıyla, 5,5 metre açıklıklı ana kirişe yük uygulanmıştır. Bu rijit çelik plakalar, boşluk merkezlerinin ortasına (web-post) 155 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Ara kirişten gelen yükleri ana kirişe aktaracak olan moment aktarmayan çelik plakaların merkezlerine çelik silindirler yerleştirilmiştir. Bu sayede, yüklerin çelik plakaların merkezinden ve ana kiriş başlığına dik olarak aktarılması sağlanmıştır.

Ana kirişte oluşabilecek lokal burkulmaların önüne geçmek, yüklerin kesit boyunca dengeli bir şekilde aktarılmasını sağlamak için yük etki bölgelerine berkitme levhaları kaynatılmıştır.



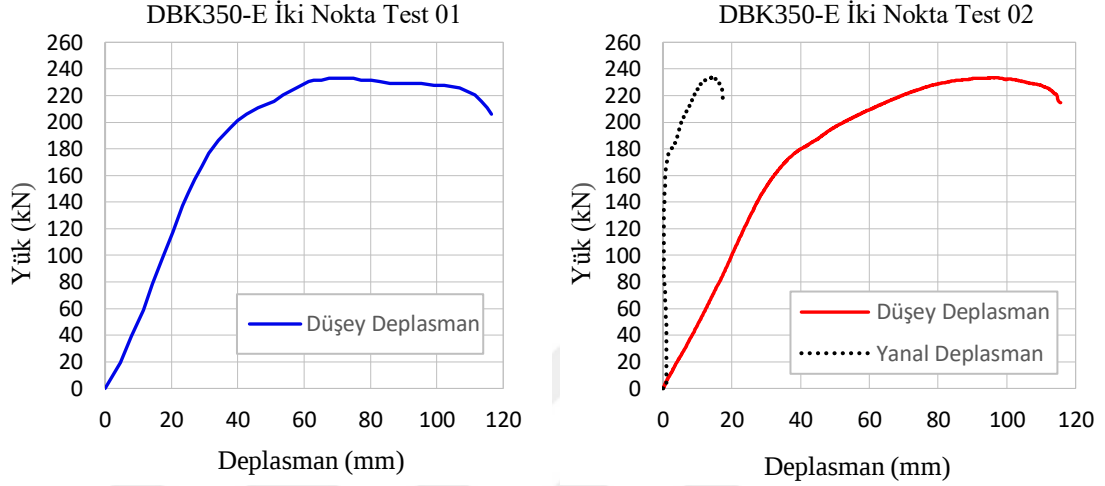
Şekil 4.19. DBK350-E İki noktadan yükleme altında genel görünümü



Kiriş İlk Yükseklik	240 mm	Yatay Çizgi Uzunluğu	120 mm
Kiriş Nihai Yükseklik	351,4 mm	Boşluk Adet	14
Boşluk Çapı	269 mm	Toplam Yatay Uzunluk	5491 mm
Boşluk Merkezleri Arası Mesafe	389 mm	Eğrilik Yarıçapı	9468 mm

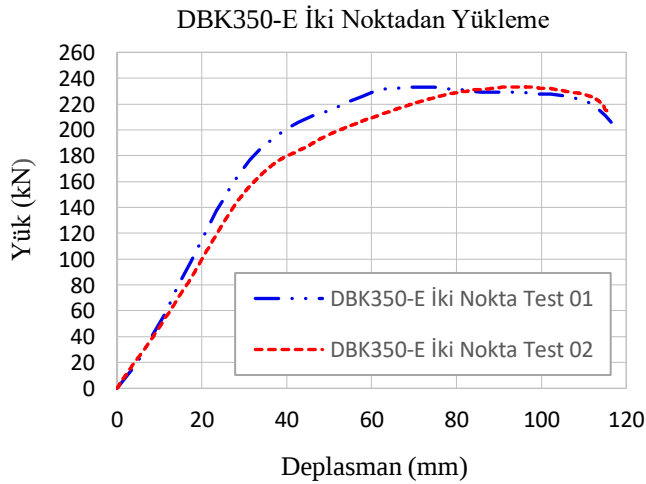
Şekil 4.20. DBK350-E kirişi Geometrik Özellikleri

DBK350-E kiriş modeli iki noktadan yapılan tekrarlı iki yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırası ile 233 kN ve 233,4 kN, bu kapasitelere karşılık gelen deplasman değerleri ise 74,1 mm ve 96,3 mm olarak ölçülmüştür. 1. Deneyde yanal deplasman ölçerin arıza vermesi sebebi ile ölçüm alınamamış olup 2. deneyde maksimum yanal deplasman 17 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.21).



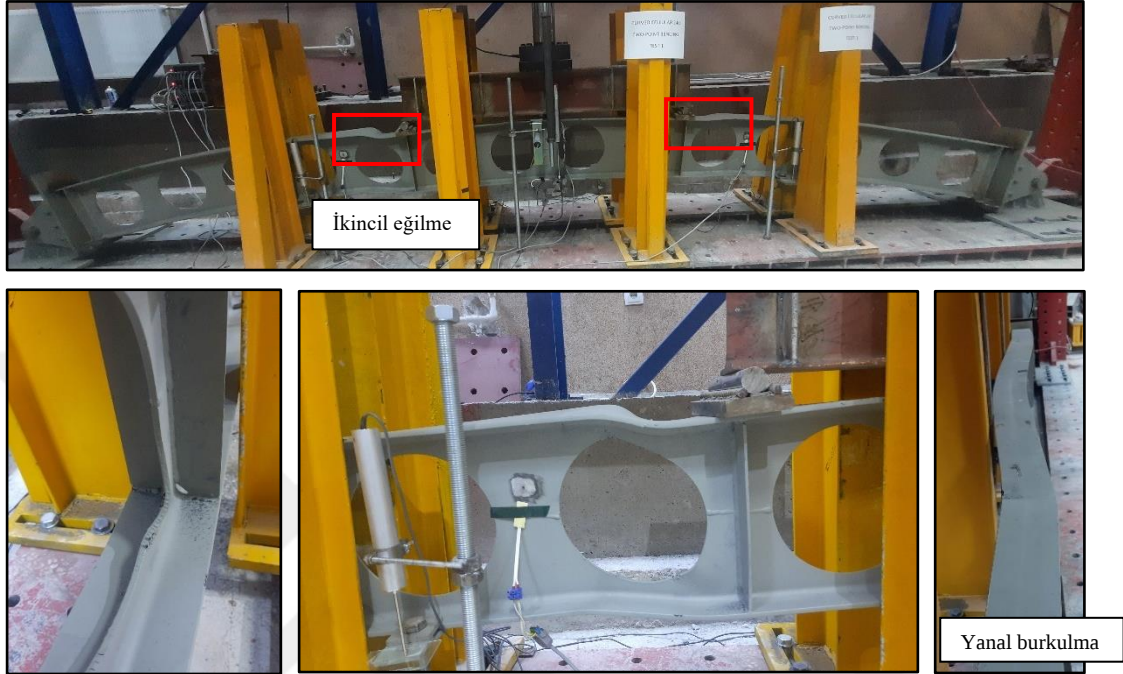
Şekil 4.21. DBK350-E iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri

Test sonuçlarına göre, ortalama taşıma gücü 233,2 kN olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, maksimum yüklere karşılık gelen ortalama deplasman da 85,2 mm olarak ölçülmüştür. Her iki deneyde elde edilen maksimum yük değerleri birbirine oldukça yakın çıkarken, kirişler non-lineer bölgeye geçtikten sonra yükte belirgin bir artış göstermiş ve bu süreçte önemli bir düşey deplasman gerçekleştirmiştir. Kirişlerdeki ikincil eğilmelerin etkin bir şekilde gözlemlenmesi ile eğrisel kirişler, nihai yüke ulaştıktan sonra yükte bir düşüş yaşanmıştır (Şekil 4.22).

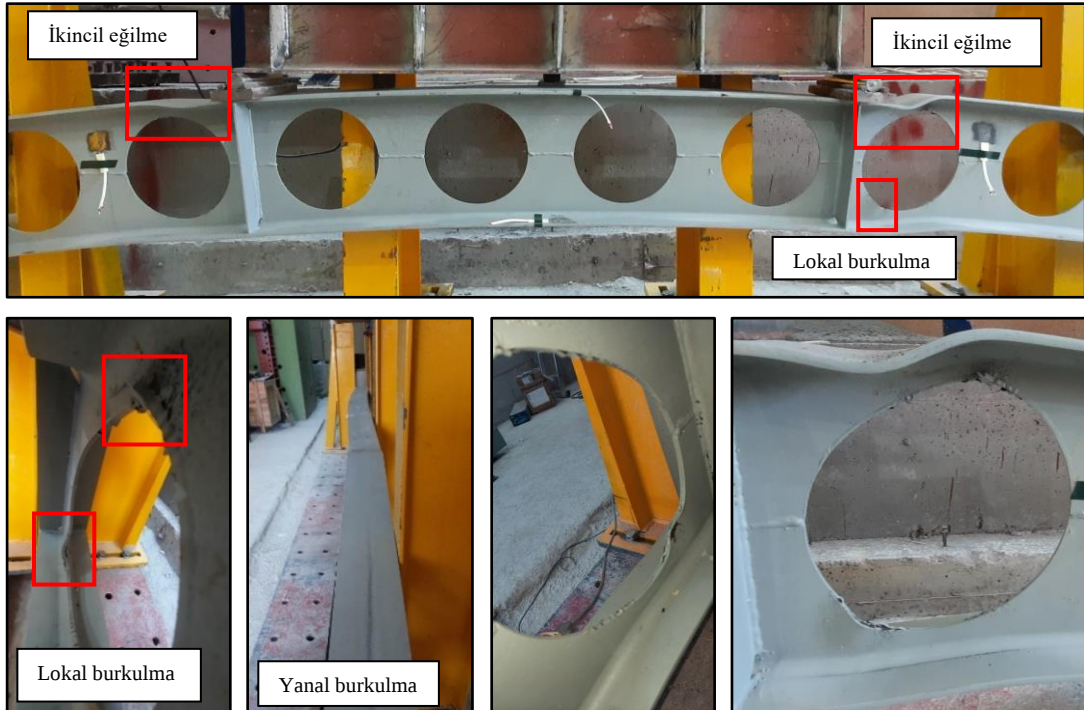


Şekil 4.22. DBK350-E iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma

Eğrisel form DBK350 kiriş modelleri üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testlerinde, yük etki bölgelerinde ikincil eğilme, kiriş merkezinde yanal burkulma ve gövde boşluk çevrelerinde, yüksek stress konsantrasyonlarına bağlı olarak lokal burkulmalar gözlemlenmiştir. Gövde burkulması, kaynak hasarı gibi bulgular görülmemiştir. Deney fotoğrafları Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.23. DBK350-E iki noktadan yükleme, test 01 göçme modları



Şekil 4.24. DBK350-E iki noktadan yükleme, test 02 göçme modları

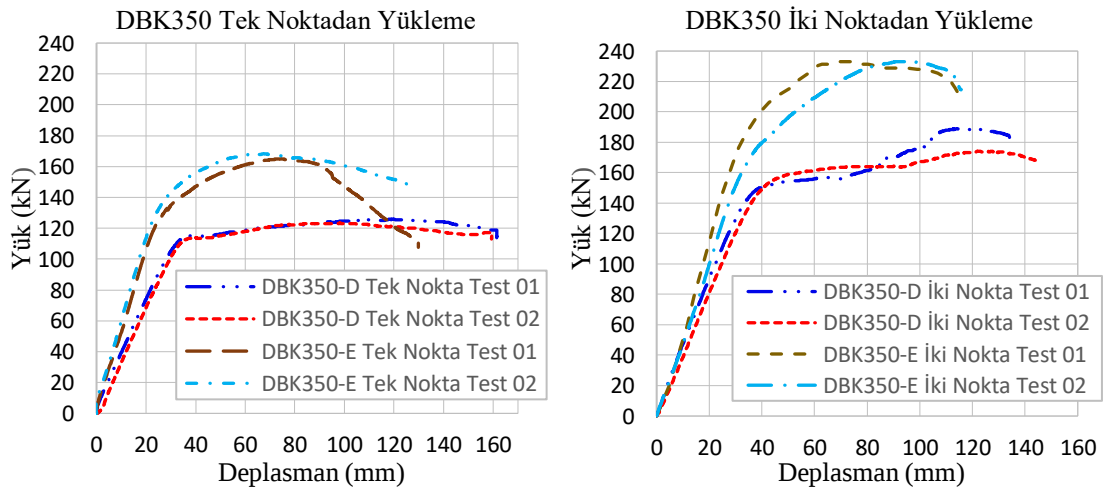
4.1.5. DBK kirişlerde eğriselliğin etkisi

Gövde yüksekliğinin artması ile birlikte atalet momentindeki artış, kapasitede bir artışa neden olur. Ancak, bu durumda gövde daha narin hale gelir ve gövde burkulma riski ortaya çıkar. Gövdede boşlukların varlığı ise ikincil (vierendeel) eğilmelere neden olabilir. Gövde yüksekliğinin artması ile beraber güçlü eksendeki atalet momentindeki artış oranı, aynı şekilde zayıf ekseninde gerçekleşmez ve bu durum yanal burkulma riskini ön plana çıkarır. Bununla beraber, bu kirişler düz form yerine eğrisel formda yapılmasıyla bu risk daha da artabilir. Çünkü eğrisel forma getirilen kirişin tarafsız eksenini kesitin merkezinden uzaklaştırır ve kiriş üst flanşında göreceli olarak daha fazla normal aksenal basınç kuvvetleri oluşturur. İç kuvvetlerdeki denge dağılımlarının eğriselliğe bağlı olarak değişmesi ise kiriş stabilitesini etkileyebilir. Bu bağlamda; DBK kirişlerde eğriselliğin performansa etkisini değerlendirmek amacıyla aynı yük koşulları altında yapılan testlerde, tek noktadan yüklemede; düz formdan eğrisel forma geçişte %33,8 lik bir artış, iki noktadan yüklemede ise; %28,5 lik bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca, düz ve eğrisel formlarda benzer göçme modları gözlemlenmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. DBK350 kirişleri yük kapasiteleri ve göçme modları

Kiriş	Form	Yükleme Tipi	Ortalama Deplasman (mm)	Ortalama Yük (kN)	Yük Artışı (%)	Göçme Tipi
DBK350	Düz	Tek Nokta	108,9	124,5	33,8	İkincil Eğilme Yanal Burkulma lokal Burkulma
DBK350	Eğrisel	Tek Nokta	71,1	166,5		
DBK350	Düz	İki Nokta	120,0	181,5	28,5	İkincil Eğilme Yanal Burkulma lokal Burkulma
DBK350	Eğrisel	İki Nokta	85,2	233,2		

Deneysel sonuçlara göre eğrisel formda basınç başlığındaki normal kuvvetlerin artmasına rağmen DBK350 kirişlerinde eğrisel formun mekanik performansın artırılmasında oldukça etkili bir katkı sağladığından ve iki noktadan yükleme durumunda görülen yanal ötelenmelerin eğrisel formdaki kirişlerin performansını önemli ölçüde etkilemediğinden bahsedilebilir. DBK350 kirişleri eğrisel ve düz formlarının Yük-Deplasman grafikleri karşılaştırılması Şekil 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.25. DBK350 kirişleri, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması

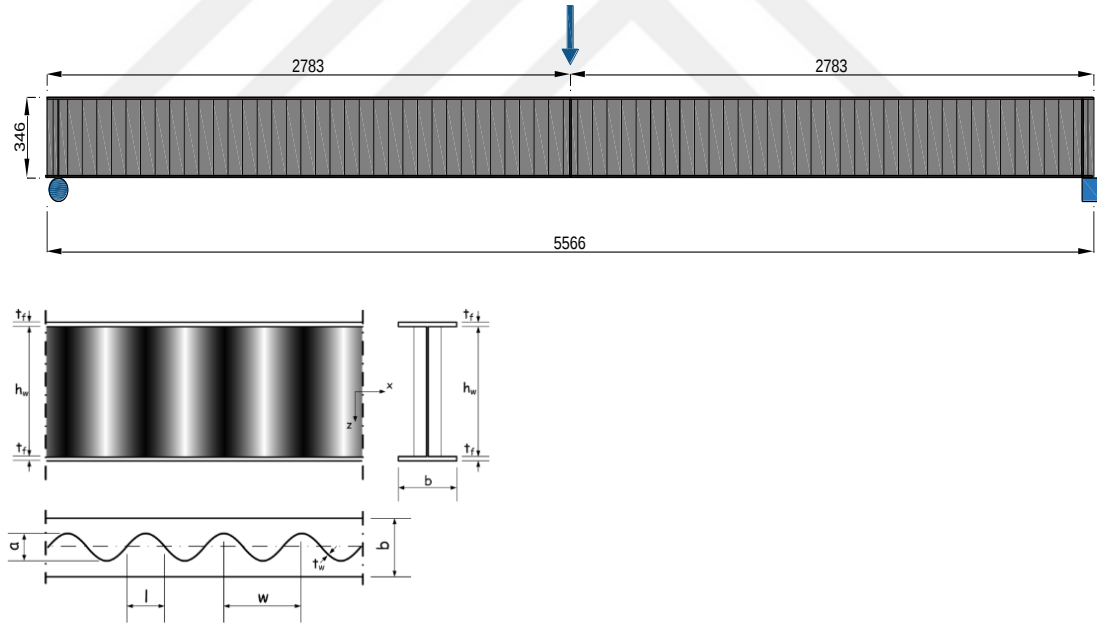
4.2. Ondülin Gövdeli Kiriş Testleri

4.2.1. OGK-D tek noktadan yükleme

Geometrik özellikleri Şekil 4.27’de verilen OGK350-D kirişi üzerinde tek noktadan yükleme altında iki adet test yapılmıştır. Yükleme çerçevesindeki genel görünümü Şekil 4.26’da verilmiştir.



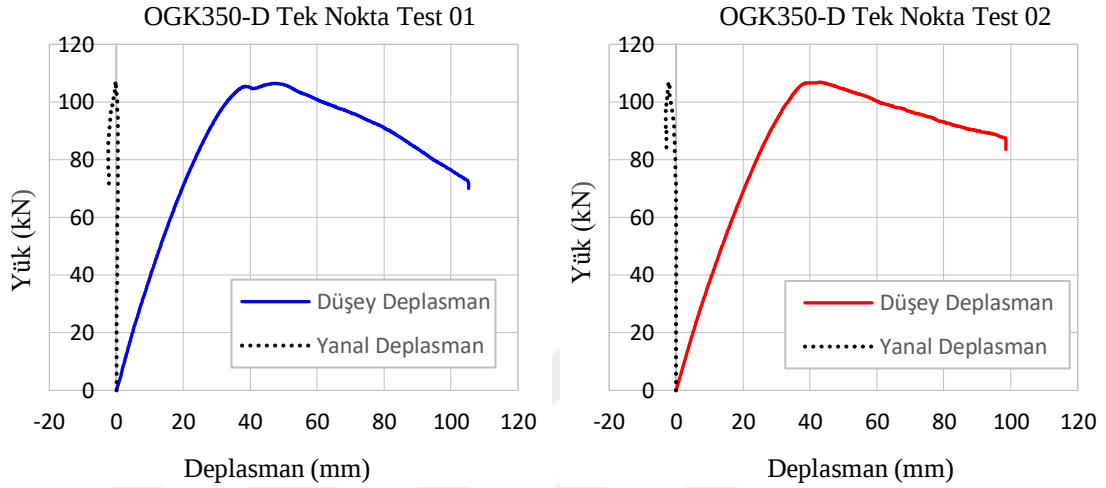
Şekil 4.26. OGK350-D tek noktadan yükleme altında genel görünümü



Kesit Yükseklik	346 mm	Dalga Yüksekliği (a)	43 mm
Başlık Genişliği (b)	160 mm	Dalga Merkezleri Arası (w)	155 mm
Başlık Et Kalınlığı (t_f)	8 mm	Kiriş Açıklık	5566
Gövde Et Kalınlığı (t_w)	3 mm	Eğrilik Yarıçapı	-

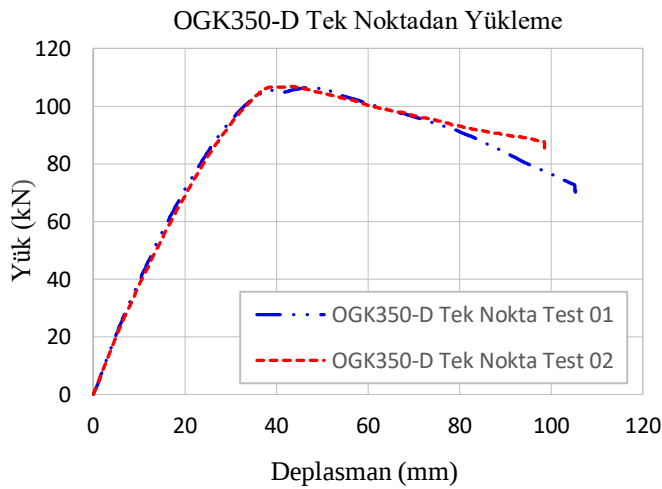
Şekil 4.27. OGK350-D kirişi geometrik özellikleri

OGK350-D kirişi tek noktadan yapılan tekrarlı iki yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırası ile 106,4 kN ve 106,8 kN, bu kapasitelere karşılık gelen deplasman değerleri 46,4 mm ve 42,7 mm olarak belirlenmiştir. Maksimum yanal deplasmanlar ise 2,5 mm ve 3 mm olarak oldukça düşük mertebede ölçülmüştür (Şekil 4.28).



Şekil 4.28. OGK350-D tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri

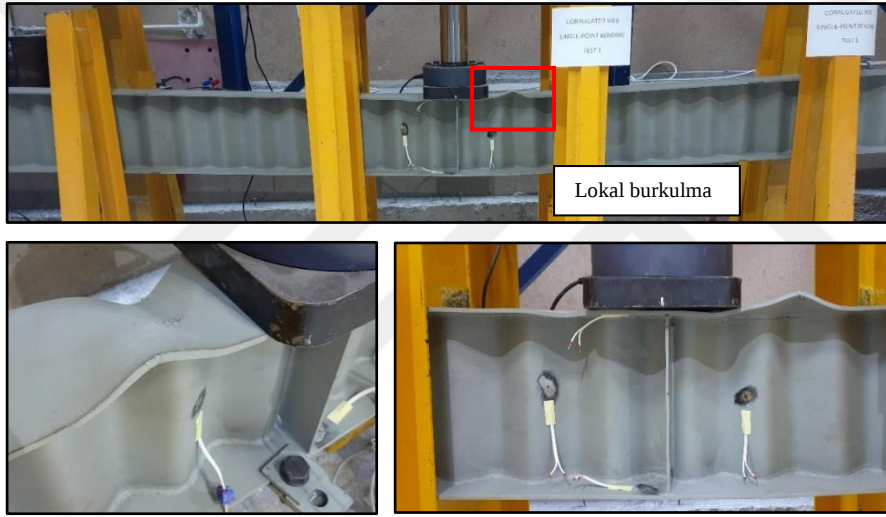
Testler sonucunda ortalama taşıma gücü 106,6 kN ve maksimum yüklere karşılık gelen ortalama deplasman ise 44,6 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.29’da görüleceği üzere hem lineer hem de non-lineer bölgedeki yük ve deplasman verileri örtüşmektedir. Bu durum deneylerin kendi içerisinde tutarlı olduğunu göstermektedir. Kirişler elastik bölgeyi aştıktan, nihai yüke eriştikten sonra yükte ani bir düşüş olmadan, yaklaşık %20’lik bir yük kaybı ile önemli ölçüde deplasman yapmaya devam etmiştir.



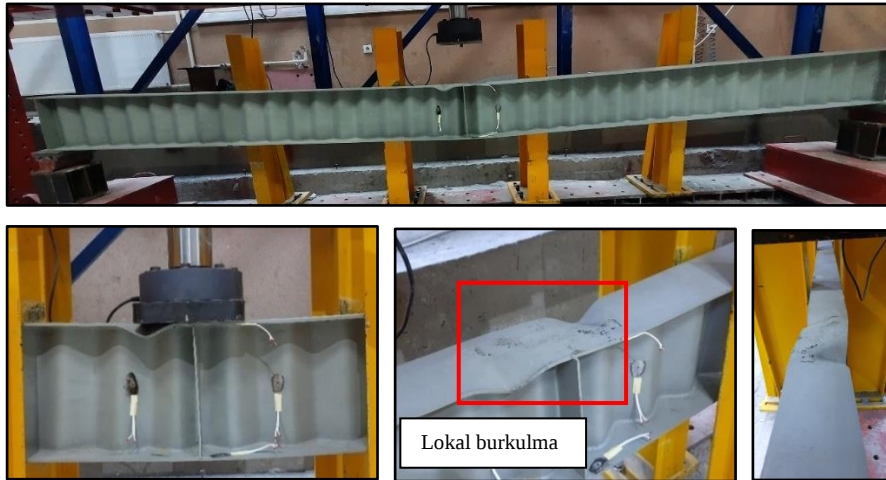
Şekil 4.29. OGK350-D tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma.

Tek noktadan yükleme altında gerçekleştirilen her iki deneyde, OGK350 kiriş üst flanşlarında basınç gerilmelerine bağlı olarak, lokal burkulmalar gözlemlenmiştir. Bu burkulmalar, üst ve alt flanşlara yerleştirilen gerinim ölçer (strain gauge) verilerine dayanarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Gerinim ölçer verileri ve yapılan gözlemler, flanşlarda plastikleşme gerçekleştikten sonra lokal burkulmaların meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 4.30, 4.31).

Ondülin gövdeli kirişlerin, dalgalı gövde yapısı nedeniyle normal ekseninde gövde rijitliği oldukça düşüktür ve eğilme durumunda flanşlarda oluşan normal kuvvetler gövdeye aktarılamamaktadır. Deneylerde, flanşların burkulmaya başlamasıyla birlikte flanşlardaki normal kuvvet transferinin efektif olarak yapılamaması, nihai yükten sonra yükte düşüşe neden olmuştur. Bu durum, kirişin davranışının gövde rijitliği ve dalgalı yapı tarafından nasıl etkilendiğini göstermektedir. Flanşlardaki burkulma, normal kuvvet transferinin kısıtlanmasına ve sonuç olarak kirişin taşıma kapasitesinde azalmaya yol açmıştır.



Şekil 4.30. OGK350-D tek noktadan yükleme, test 01 göçme modları



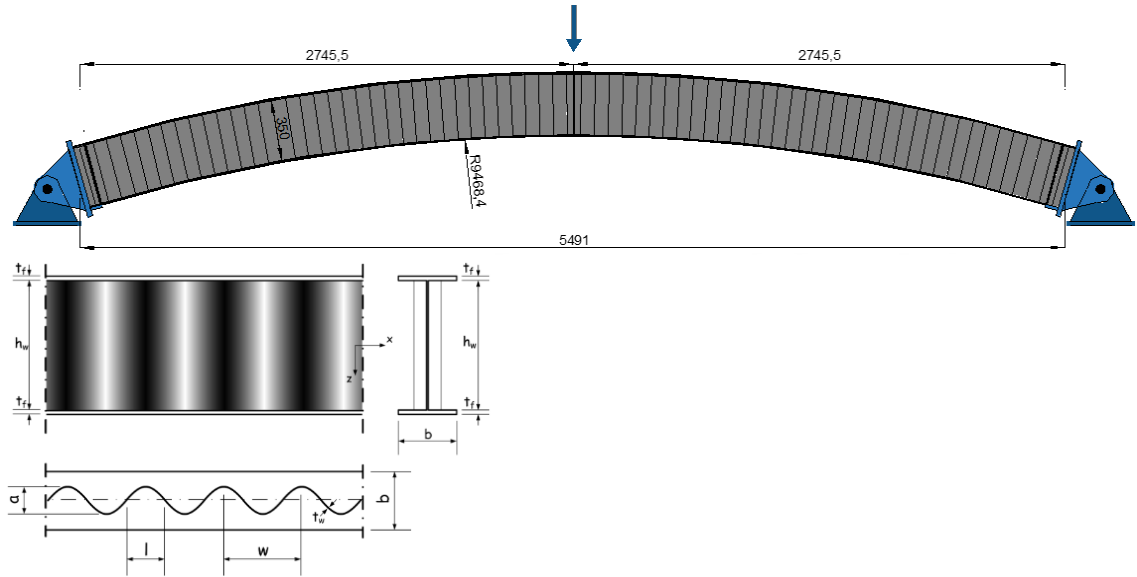
Şekil 4.31. OGK350-D tek noktadan yükleme, test 02 göçme modları

4.2.2. OGK-E tek noktadan yükleme

Geometrik özellikleri Şekil 4.33'te verilen OGK350-E kirişi üzerinde tek noktadan yükleme altında iki adet test yapılmıştır. Yükleme çerçevesindeki genel görünümü Şekil 4.32'de verilmiştir.



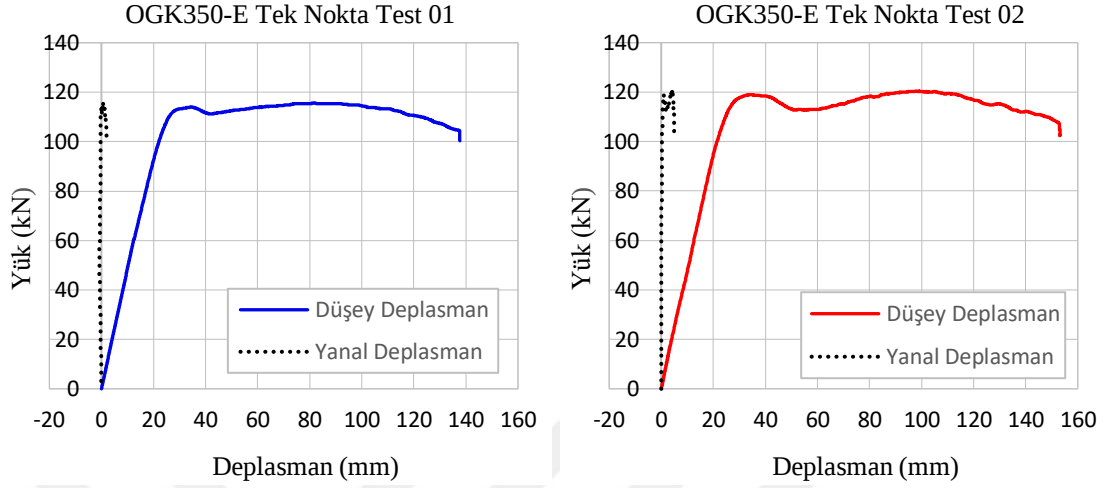
Şekil 4.32. OGK350-E tek noktadan yükleme genel görünümü



Kesit Yükseklik	346 mm	Dalga Yüksekliği (a)	43 mm
Başlık Genişliği (b)	160 mm	Dalga Merkezleri Arası (w)	155 mm
Başlık Et Kalınlığı (t_f)	8 mm	Kiriş Açıklık	5491 mm
Gövde Et Kalınlığı (t_w)	3 mm	Eğrilik Yarıçapı	9468 mm

Şekil 4.33. OGK350-E kirişi geometrik özellikleri

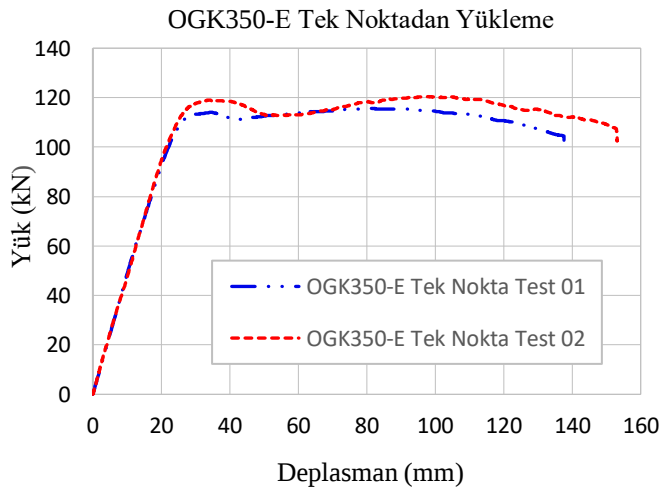
OGK350-E tek noktadan yapılan yükleme neticesinde kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 115,6 kN ve 120,4 kN, deplasmanlar 81,7 mm ve 97,7 mm, maksimum yanal deplasman ise 2 mm olarak tespit edilmiştir. (Şekil 4.34)



Şekil 4.34. OGK350-E tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri

Test sonuçlarına göre, ortalama taşıma gücü 118 kN, ortalama deplasman 89,7 mm olarak ölçüldü. Şekil 4.35'te grafik incelendiğinde, veriler birbirine oldukça yakın çıkmış, grafikler örtüşmüştür. Her iki deneyde de, yükte önemli bir düşüş olmaksızın düşey yönde önemli ölçüde deplasman gerçekleşmiştir. Bu durum, malzemenin elastik bölgeden sonra plastik deformasyona geçtiğini ve bu deformasyonun mukavemet kaybına neden olmadan önemli deplasmanlara yol açtığını göstermektedir.

Malzemenin plastik deformasyona dayanıklı olması ve yük altında sünek bir davranış sergilemesi, yapısal tasarım açısından önemli bir avantajdır. Özellikle elastik bölge sonrası meydana gelen plastik deformasyonların mukavemet üzerindeki etkilerini anlamak, yapısal elemanların güvenilir bir şekilde tasarlanması için önemlidir.



Şekil 4.35. OGK350-E tek noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma

Eğrisel forma sahip OGK350 kirişlerin tek nokta yüklemesi altında, normal basınç gerilmelerine bağlı olarak oluşan lokal flanş burkulması gözlemlenmiştir (Şekil 4.36, 4.37). Flanşların burkulmaya başlaması ile beraber kirişler nihai yüke ulaştıktan sonra yükte düşüş başlamıştır. Yapılan gözlemlerde kirişlerin gövdesinde herhangi bir burkulma modu veya kaynaklarda hasar tespit edilmemiştir.

Dalgalı gövde formunun 3x330 mm enkesitinde göreceli olarak narin bir yapıda olmasına rağmen, lokal veya global burkulma modlarının olmaması gövdenin genel bütünlüğünün korunduğunu, sinusoidal dalga formunun oldukça efektif bir performans sergilediğini işaret etmektedir.



Şekil 4.36. OGK350-E tek noktadan yükleme, test 01 göçme modları



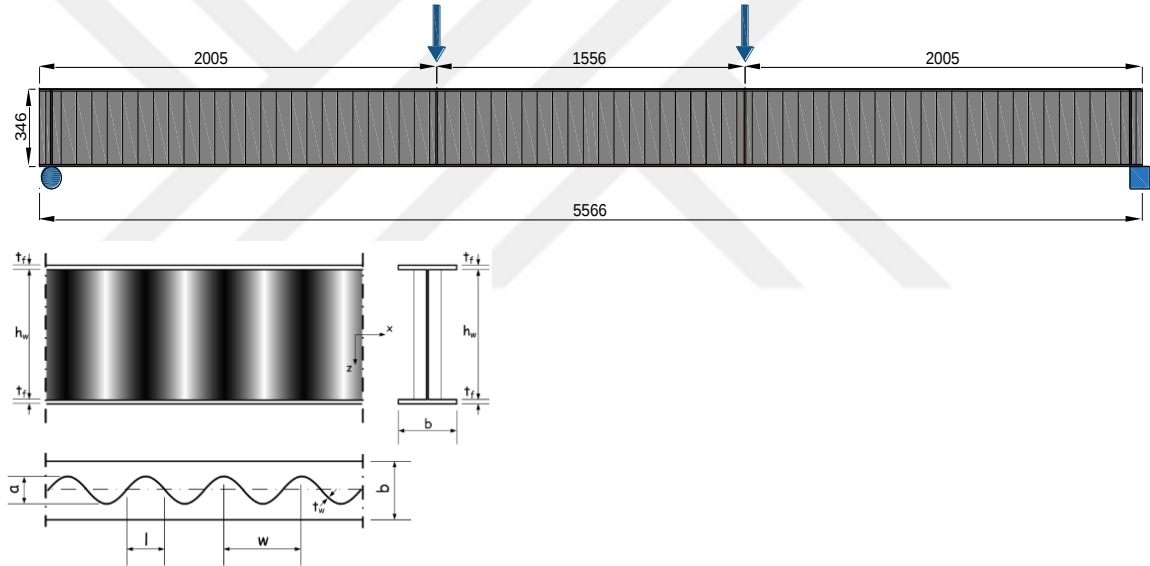
Şekil 4.37. OGK350-E tek noktadan yükleme, test 02 göçme modları

4.2.3. OGK-D iki noktadan yükleme

Geometrik özellikleri Şekil 4.39’da verilen OGK350-D kirişi üzerinde iki noktadan yükleme altında iki adet test yapılmıştır. Yükleme çerçevesindeki genel görünümü Şekil 4.38’de verilmiştir.



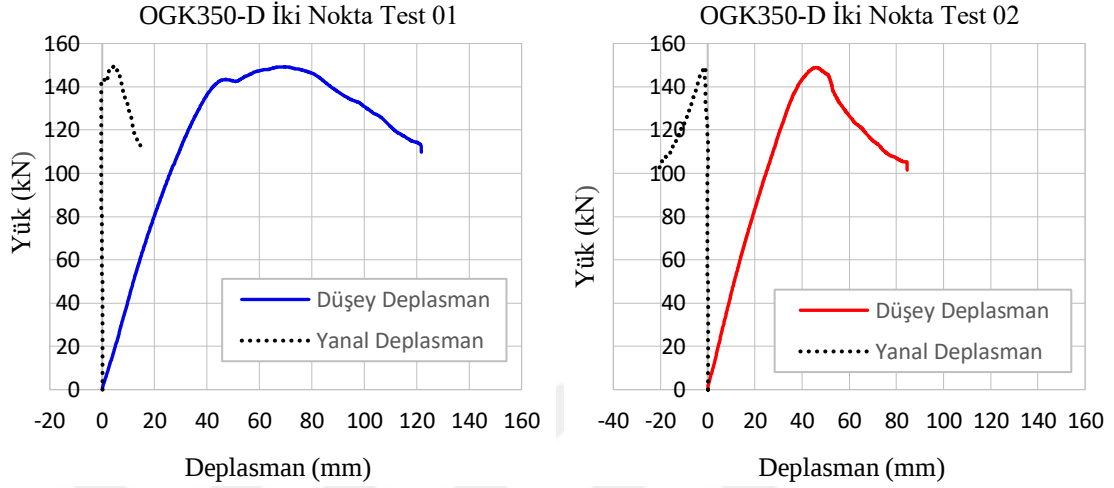
Şekil 4.38. OGK350-D iki noktadan yükleme genel görünümü



Kesit Yükseklik	346 mm	Dalga Yüksekliği (a)	43 mm
Başlık Genişliği (b)	160 mm	Dalga Merkezleri Arası (w)	155 mm
Başlık Et Kalınlığı (t_f)	8 mm	Kiriş Açıklık	5566 mm
Gövde Et Kalınlığı (t_w)	3 mm	Eğrilik Yarıçapı	-

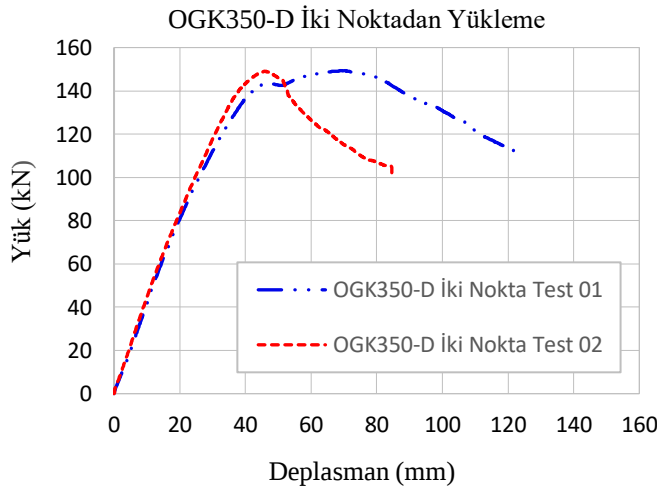
Şekil 4.39. OGK350-D kirişi geometrik özellikleri

Düz forma sahip OGK350 kirişi iki noktadan yapılan tekrarlı iki yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 149,3 kN ve 149 kN, bu kapasitelere karşılık gelen deplasman değerleri 70 mm ve 46 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yanal deplasman ise 20,4 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.40).



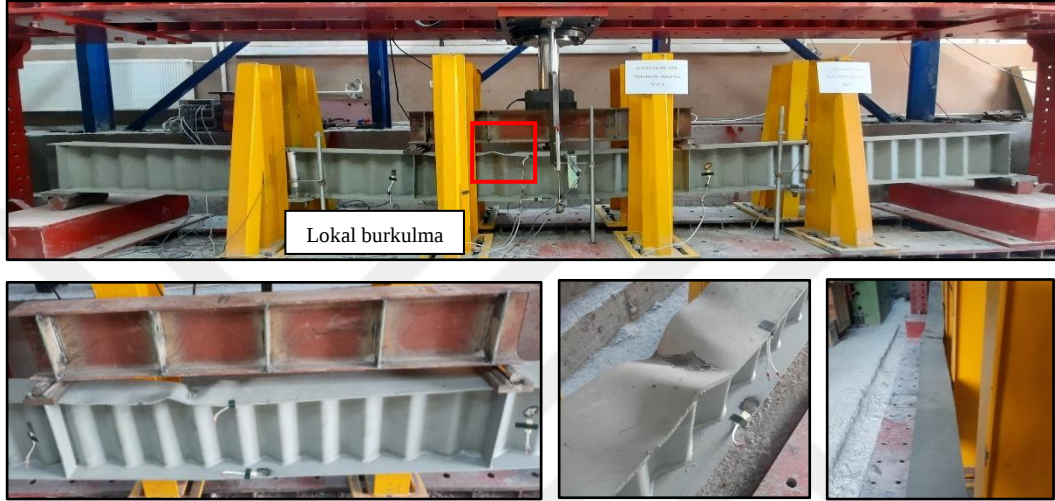
Şekil 4.40. OGK350-D iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri

OGK350 kirişlerinin test sonuçlarına göre ortalama taşıma gücü 149,1 kN ve maksimum yüklere karşılık gelen ortalama deplasman 58 mm olarak belirlenmiştir. Elastik bölgede benzer yük-deplasman grafiklerine sahip olan kirişler, non-lineer bölgede maksimum yük değerlerinin neredeyse eşit olmasına rağmen, bu maksimum yüklere karşılık gelen deplasman değerlerinde 25 mm'ye kadar varan farklılıklar göstermektedir (Şekil 4.41). Ayrıca, her iki deneyde kiriş üst flanşında lokal burkulmalar gözlemlenmiştir.

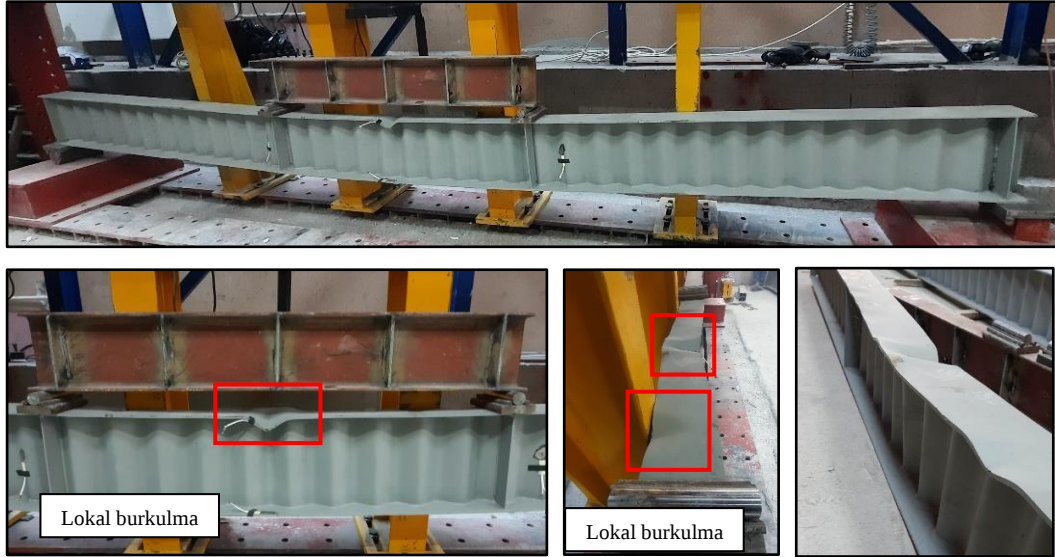


Şekil 4.41. OGK350-D iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma

Kirişlerin burkulmaya bağlı olarak göçtüğü göz önüne alındığında, deplasman farklılıklarını etkileyen faktörler arasında; kullanılan malzemelerdeki heterojenitelerin plastik deformasyon sürecini etkilemesi, kiriş geometrisi ve kesit özelliklerinin plastik bölgedeki deformasyon paternlerini belirlemesi, kirişlerin üretim toleranslarındaki ihlallerin veya üretimindeki küçük farklılıkların ikinci mertebe etkilerinin ve plastik deformasyonun şekillenmesine olan etkisi ya da yük dağılımı ile uygulama şeklinin burkulma sonucu oluşan plastik deformasyonları yönlendirmesi gibi faktörlerden bahsedilebilir. Testlere ait deney sonrası çekilen fotoğraflar Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.42. O GK350-D iki noktadan yükleme, test 01 göçme modları



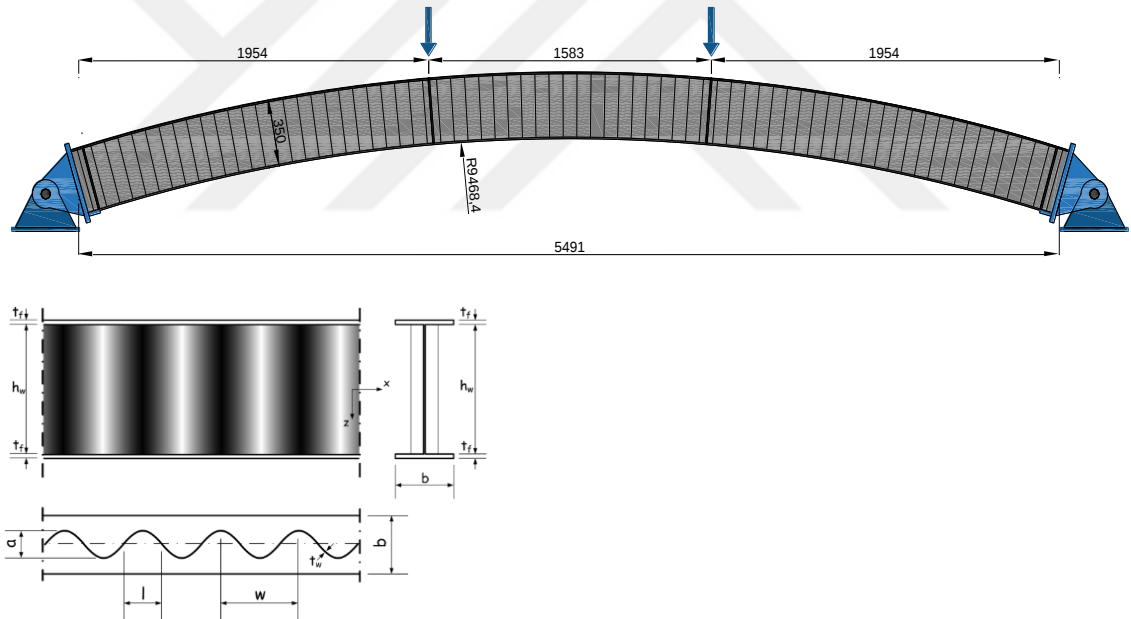
Şekil 4.43. O GK350-D iki noktadan yükleme, test 02 göçme modları

4.2.4. OGK-E iki noktadan yükleme

Geometrik özellikleri Şekil 4.45'te verilen Eğrisel OGK350 kirişi üzerinde iki noktadan yükleme altında tekrarlı olarak testleri yapılmıştır. Yükleme çerçevesindeki genel görünümü Şekil 4.44'te verilmiştir.



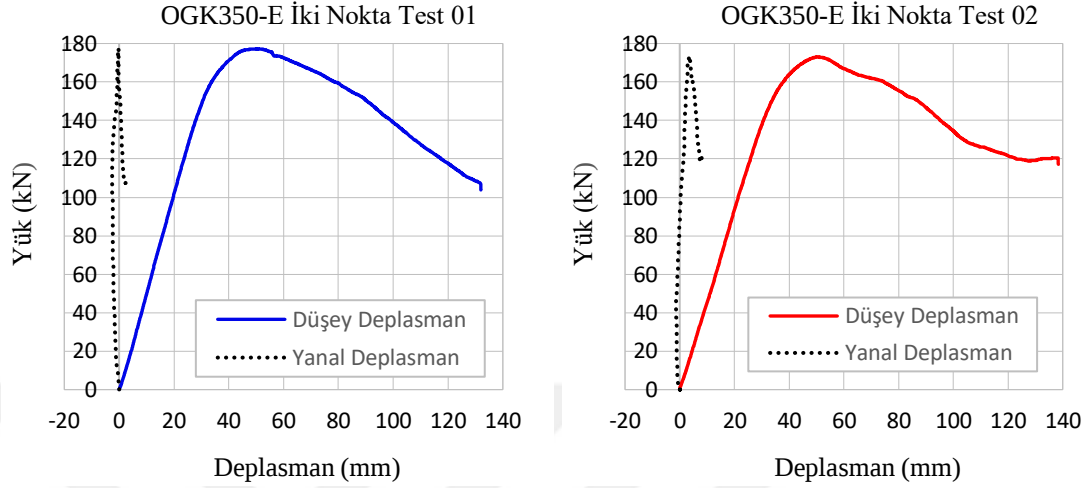
Şekil 4.44. OGK350-E iki noktadan yükleme genel görünümü



Kesit Yükseklik	346 mm	Dalga Yüksekliği (a)	43 mm
Başlık Genişliği (b)	160 mm	Dalga Merkezleri Arası (w)	155 mm
Başlık Et Kalınlığı (t_f)	8 mm	Kiriş Açıklık	5491 mm
Gövde Et Kalınlığı (t_w)	3 mm	Eğrilik Yarıçapı	9468

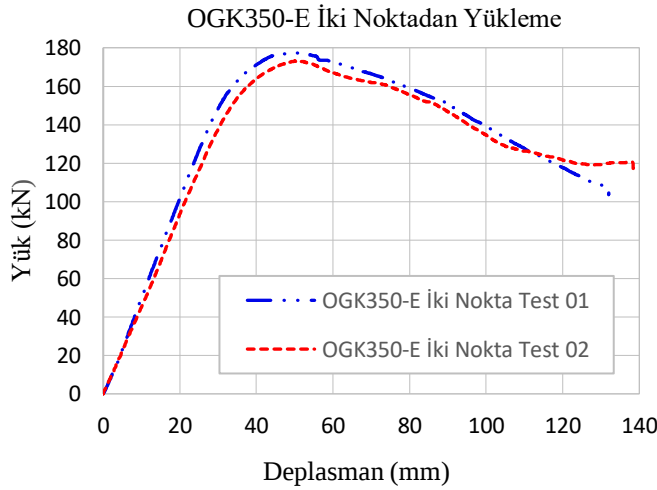
Şekil 4.45. OGK350-E kirişi geometrik özellikleri

Eğrisel OGK350 kirişi, iki noktadan yapılan yüklemeler sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 177,3 kN ve 173 kN, bu kapasitelere karşılık gelen deplasman değerleri 50,3 mm ve 50,1 mm olarak ölçülmüştür. Maksimum yanal deplasman ise 8 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.46).



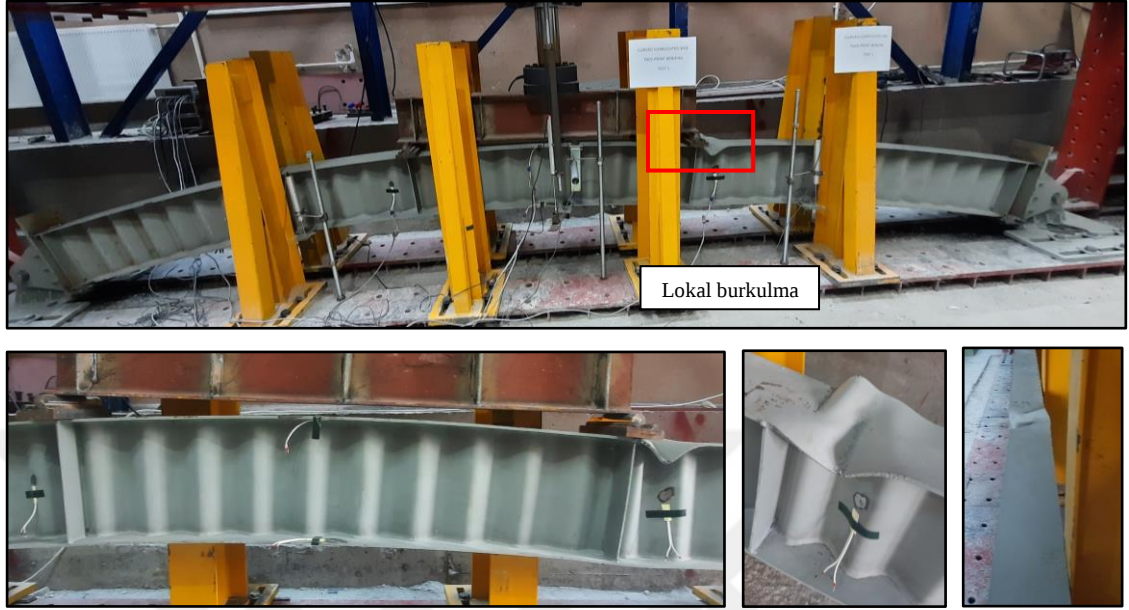
Şekil 4.46. OGK350-E iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri

Testler sonucunda ortalama taşıma gücü 175,1 kN ve maksimum yüklere karşılık gelen ortalama deplasman ise 50,2 mm olarak belirlenmiştir. Deneyler kendi içerisinde tutarlı sonuçlar vermiş olup kirişlerin maksimum yük ve bu yük ile ilişkilendirilen deplasman verileri oldukça yakındır. Nihai yüke ulaştıktan sonra %30'luk bir yük kaybı ile testler sonlandırılmıştır (Şekil 4.47).

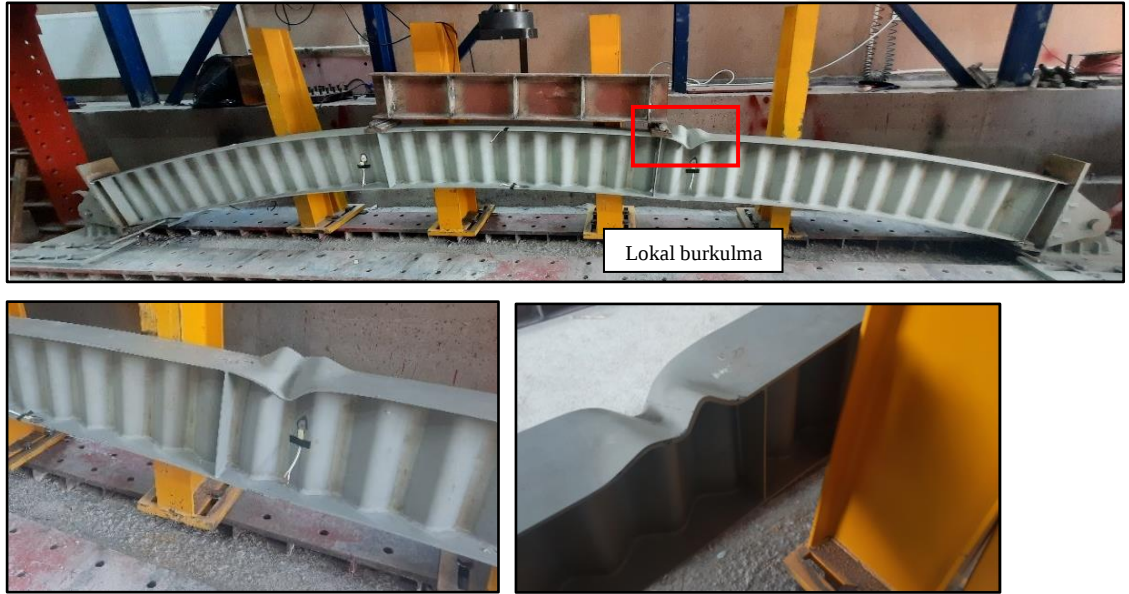


Şekil 4.47. OGK350-E iki noktadan yükleme, yük-deplasman grafikleri karşılaştırma

Her iki deneyde de nihai yük sonrasında görülen yük kaybında, üst flanşın lokal olarak burkulması etkili olmuştur. Gövdede ise herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir. Deney fotoğrafları Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da verilmiştir.



Şekil 4.48. O GK350-E iki noktadan yükleme, test 01 göçme modları



Şekil 4.49. O GK350-E iki noktadan yükleme, test 02 göçme modları

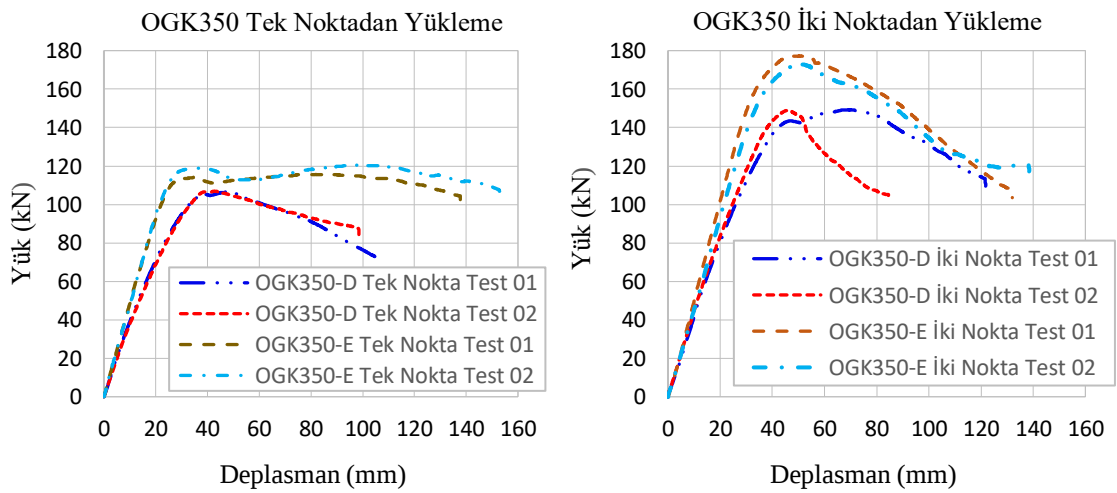
4.2.5. OGK kirişlerde eğriselliğin etkisi

OGK kirişlerde gövde sacının sinusoidal formu, kirişin plastik limit yüküne ulaşmadan stabilite kaybına bağlı burkulmasına engel olurken, aynı zamanda, sinusoidal dalga, lokal burkulmaları engellemeye etkilidir. Ancak, gövdenin eksenel rijitliğinin oldukça düşük olmasından dolayı flanşlardaki normal gerilmeler, sinusoidal gövdeye iletilmemektedir. Öte yandan, bu kirişlerin eğrisel formda yapılması ile, kirişin iç kuvvet denge dağılımlarını değiştirmekte ve statik olarak hem normal tepki kuvvetlerinin hem de kemer formuna bağlı olarak özellikle açıklık orta bölgesi, üst flanşta normal gerilmelerin etkin bir şekilde artması beklenmektedir.

Çizelge 4.2. DBK350 kirişleri yük kapasiteleri ve göçme modları

Kiriş	Form	Yükleme Tipi	Ortalama Deplasman (mm)	Ortalama Yük (kN)	Yük Artışı (%)	Göçme Tipi
OGK350	Düz	Tek Nokta	44,6	106,6	10,7	- lokal Burkulma (flanş)
OGK350	Eğrisel	Tek Nokta	89,7	118,0		
OGK350	Düz	İki Nokta	58	149,1	17,4	- lokal Burkulma (flanş)
OGK350	Eğrisel	İki Nokta	50,2	175,1		

OGK350 kirişleri eğrisel formun performansının değerlendirilebilmesi amacıyla tek ve iki noktadan yükleme altında test edilmiştir. Tek nokta yüklemesinde OGK350 kirişleri düz formdan eğrisel forma geçişte %10,7'lik bir artış olurken, İki noktadan yükleme testlerinde ise bu artış %17,4 olarak gerçekleşmiştir (Çizelge 4.2). OGK350 ve DBK350 kirişleri karşılaştırıldığında bu artış oranlarının DBK350 kirişlerinde %33,8 ve %28,5 olarak daha efektif olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, OGK350 testlerinin tamamında görülen flanş burkulma oluşumu göz önüne alındığında, nihai yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde, bu burkulma mekanizmalarının etkili olduğu ve normal kuvvet aktarımlarının OGK350 kirişlerinin performansı üzerinde belirleyici olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.50).



Şekil 4.50. DBK350 kirişleri, yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması

4.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi

Dairesel boşluklu ve ondülin gövdeli eğrisel ve düz formdaki çelik kirişlerin tek noktadan ve iki noktadan yükleme altında yük taşıma kapasiteleri, deplasmanları, göçme modları deneysel yöntemler ile belirlenmiştir. Bu deneysel verilerin, SEA verileri ile karşılaştırılması, doğrulanması bu bölümde değerlendirilmiştir.

Deneysel verilerden elde edilen deplasmanlar sonlu elemanlar analizinde kiriş modellerinin yük etki bölgelerine 10 adımda verilmiş ve analiz sonucunda bu deplasmanlara karşılık gelen yüklerin elde edilmesi ile yük-deplasman grafikleri oluşturulmuştur.

Çizelge 4.3'te SEA analizinde kullanılan parametreler ile beraber ortalama deplasman ve uygulanan deplasman değerleri verilmiştir. Burada “ortalama deplasman” deneysel çalışmada tekrarlı olarak yapılan iki testin maksimum yüklerine karşılık gelen kiriş merkezi alt flanşından elde edilen deplasmanların ortalamasını ifade etmektedir. “uygulanan deplasman” ise sonlu elemanlar analizinde yine kiriş modeli merkezi alt flanşından analiz sonucu ortalama deplasman değerini elde edebilmek için kiriş modeli yük etki bölgelerine (üst flanş) verilen deplasmanı belirtmektedir.

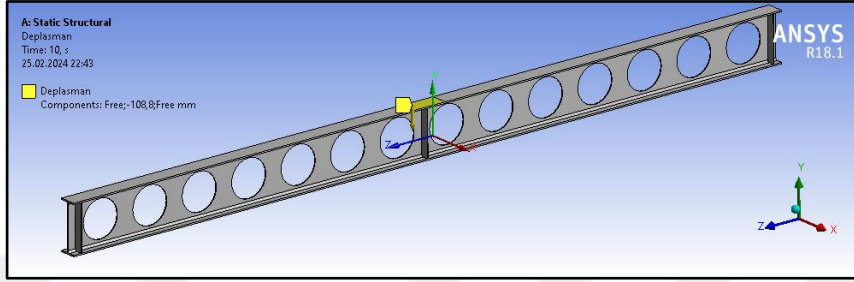
Çizelge 4.3. Sonlu elemanlar analizi parametreleri

Kiriş	Form	Yükleme Tipi	Deneysel Ortalama Deplasman (mm)	SEA Uygulanan Deplasman (mm)	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Tanjant Modülü (MPa)	Mesh Tipi	Mesh Boyutu (mm)
DBK350	Düz	Tek Nokta	108,9	108,8	320	191000	1420	Tetrahedrons	25
DBK350	Eğrisel	Tek Nokta	68,5	68,5	320	191000	1420	Tetrahedrons	25
DBK350	Düz	İki Nokta	120,0	117,1	320	191000	1420	Tetrahedrons	25
DBK350	Eğrisel	İki Nokta	85,2	82,8	320	191000	1420	Tetrahedrons	25
OGK350	Düz	Tek Nokta	44,6	44,6	311	191000	1420	Tetrahedrons	25
OGK350	Eğrisel	Tek Nokta	89,7	89,7	311	191000	1420	Tetrahedrons	25
OGK350	Düz	İki Nokta	58	52,6	311	191000	1420	Tetrahedrons	25
OGK350	Eğrisel	İki Nokta	50,2	46,9	311	191000	1420	Tetrahedrons	25

4.3.1. Dairesel boşluklu kirişlerin sonlu elemanlar analizi

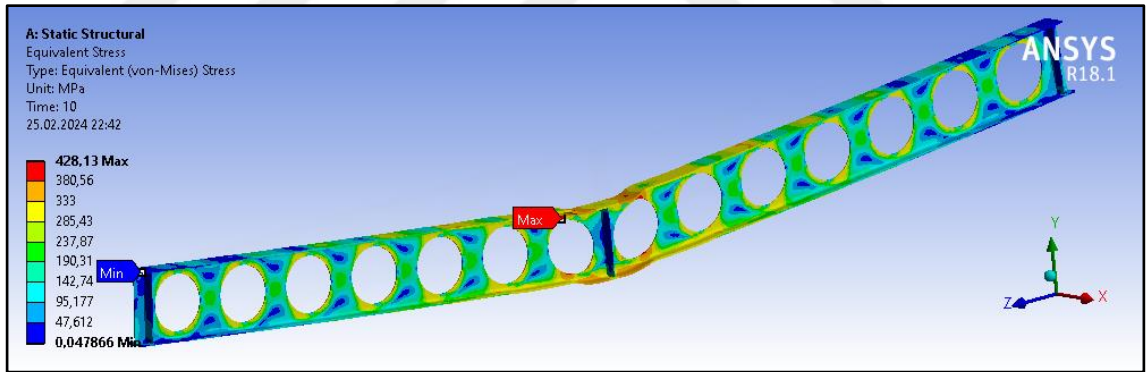
4.3.1.1. DBK-D tek noktadan yükleme

Genel görünümü Şekil 4.51’de verilen DBK350-D kiriş modeli tek noktadan yükleme altında doğrusal olmayan SEA yapılmıştır. Kiriş üst flanşına tanımlanan 280x120 mm ebatlarında plakaya deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 108,8 mm deplasman Ansys-Workbench programında 10 adımda uygulanmıştır.

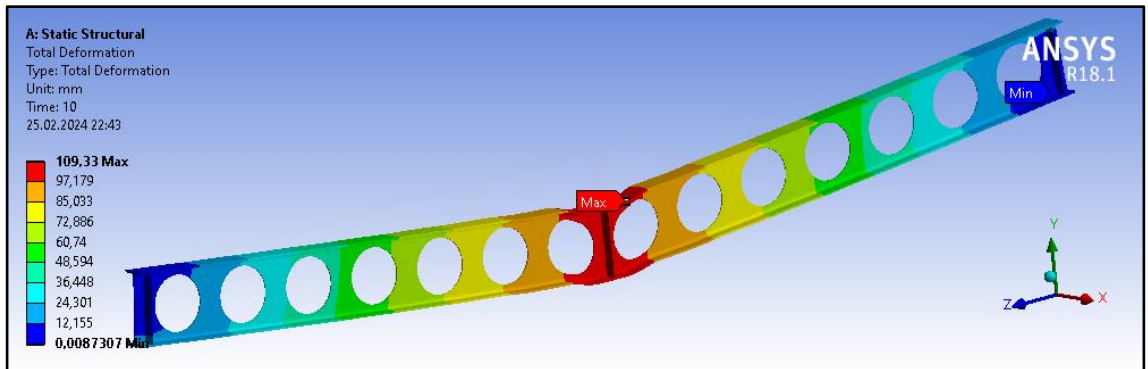


Şekil 4.51. DBK350-D sonlu elemanlar analizi, tekil yükleme durumu

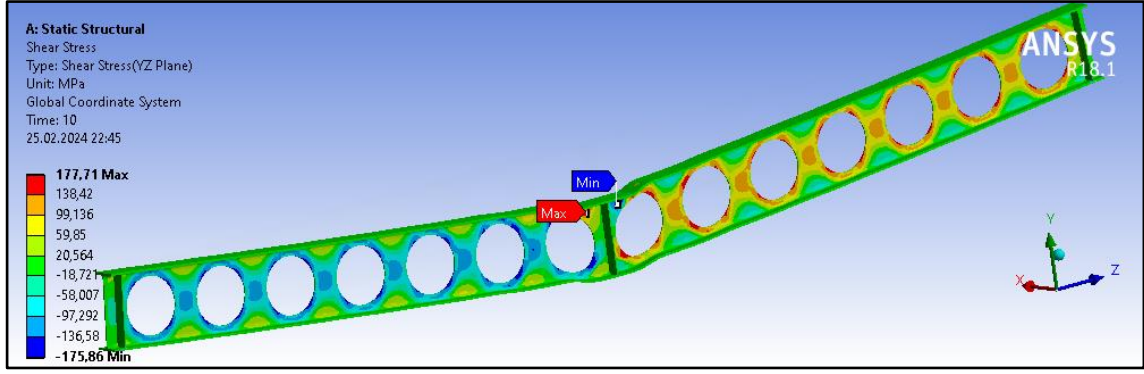
DBK350-D kiriş modelinde doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kiriş üzerinde oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises Stress) ve deformasyon dağılımları Şekil 4.52 ve Şekil 4.53’te, kesme ve normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.54 ve Şekil 4.55’te verilmiştir.



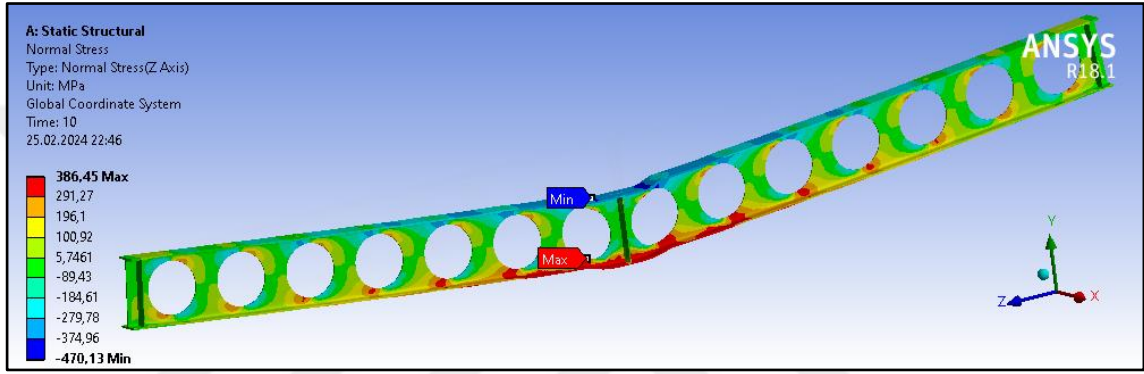
Şekil 4.52. DBK350-D kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.53. DBK350-D kirişi üzerindeki tekil yük altında deplasmanlar

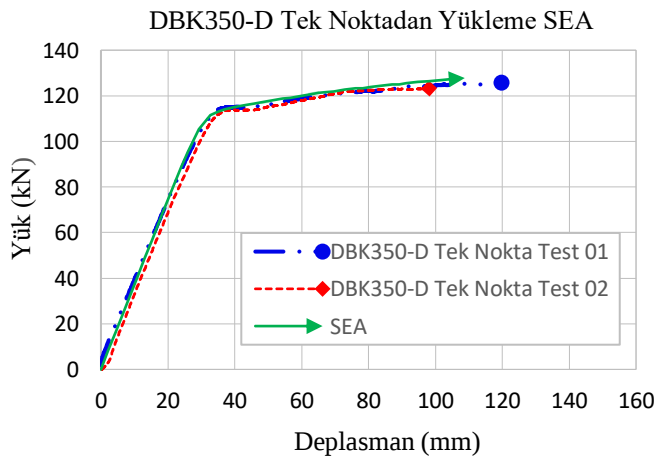


Şekil 4.54. DBK350-D kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri



Şekil 4.55. DBK350-D kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler

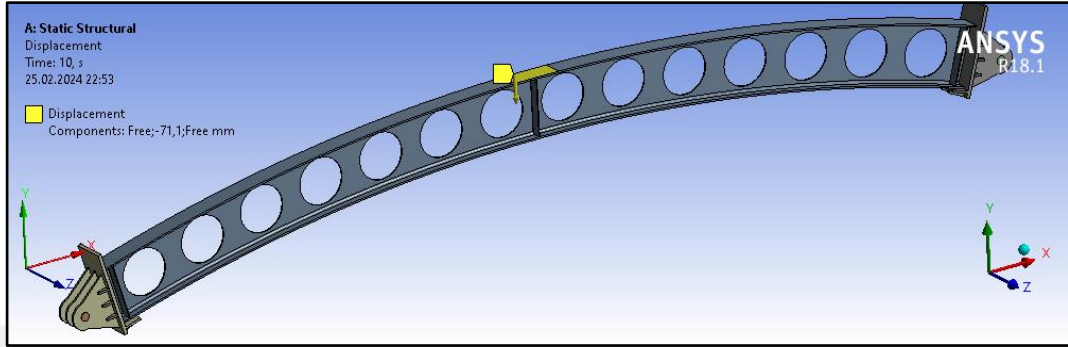
DBK350-D kirişi üzerinde deneysel olarak tekrarlı yapılan testler sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri 125,8 kN ve 123,2 kN (ortalama 124,5 kN), bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar 119,7 ve 98,1 mm (ortalama 108,9 mm) olarak elde edildi. Bu veriler doğrultusunda Ansys-Workbench programında yük etki noktalarına 10 adımda deplasman verildiğinde yine aynı bölgeden 127,8 kN yük elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 4.56’da verilmiştir.



Şekil 4.56. DBK350-D kirişleri SEA ve deney yük-deplasman grafikleri karşılaştırma

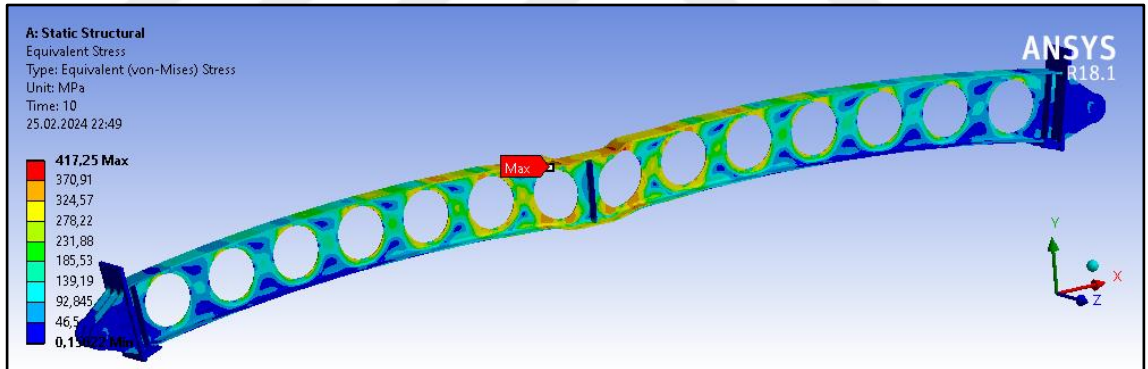
4.3.1.2. DBK-E tek noktadan yükleme

Genel görünümü Şekil 4.57’de verilen DBK350-E kiriş modeli tek noktadan yükleme altında doğrusal olmayan SEA yapılmıştır. Üst flanşına tanımlanan 280x120 mm ebatlarında plakaya deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 71,1 mm deplasman Ansys workbench yazılımında 10 adımda uygulanmıştır.

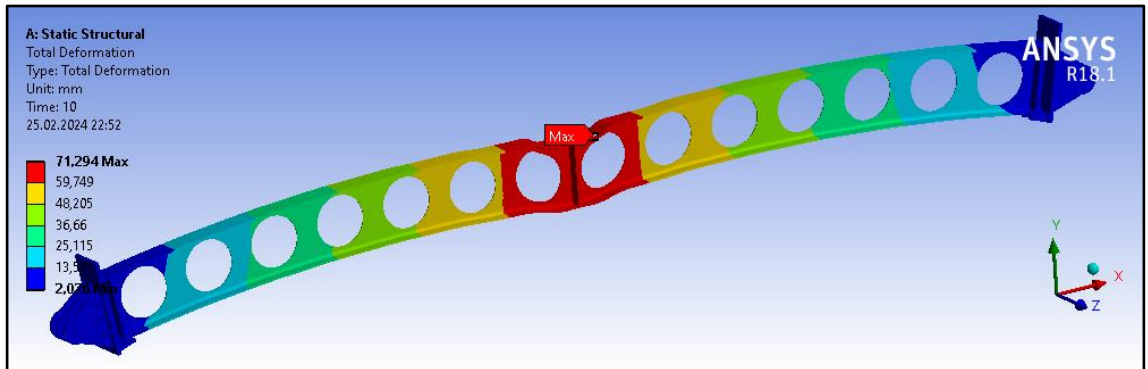


Şekil 4.57. DBK350-E sonlu elemanlar analizi; tekil yükleme durumu

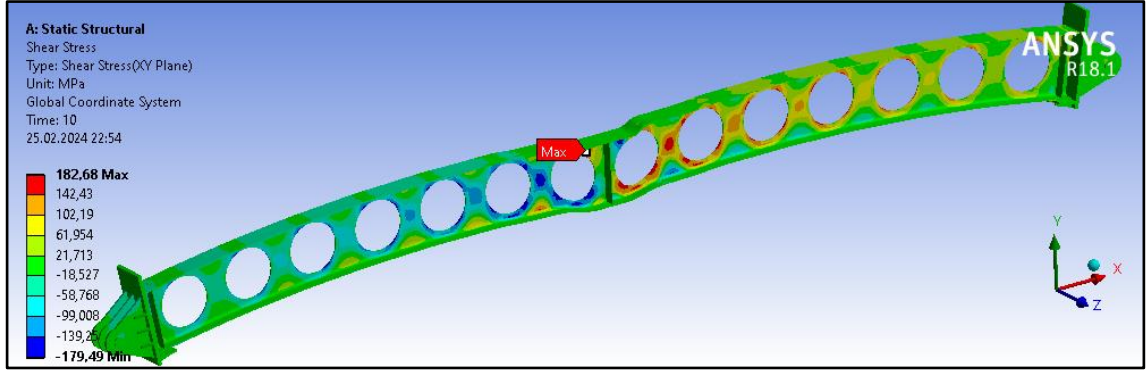
DBK350-E kiriş modelinde doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kiriş üzerinde oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises Stress) ve deformasyon dağılımları Şekil 4.58 ve Şekil 4.59’da, kesme ve normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.60 ve Şekil 4.61’de verilmiştir.



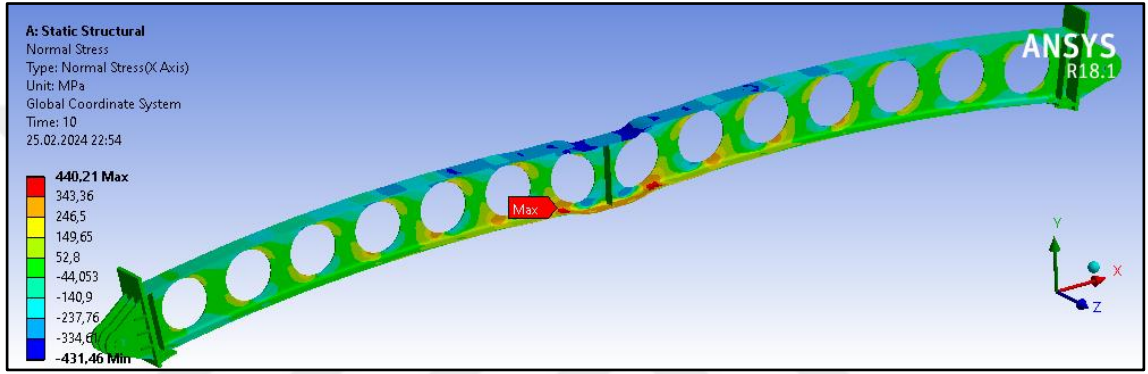
Şekil 4.58. DBK350-E kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.59. DBK350-E kirişi üzerindeki tekil yük altında deplasmanlar

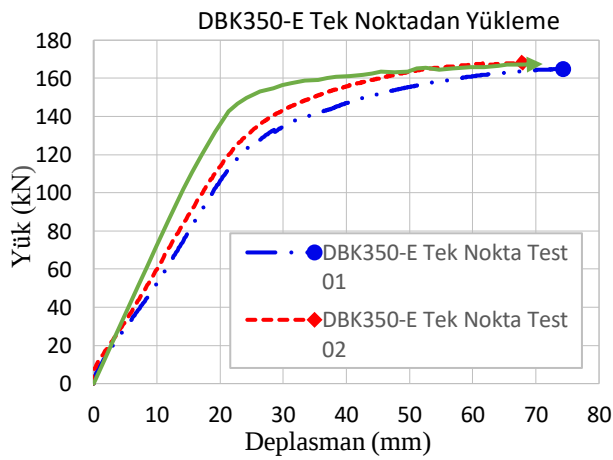


Şekil 4.60. DBK350-E kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmeleri



Şekil 4.61. DBK350-E kirişi üzerindeki tekil yük altında normal gerilmeler

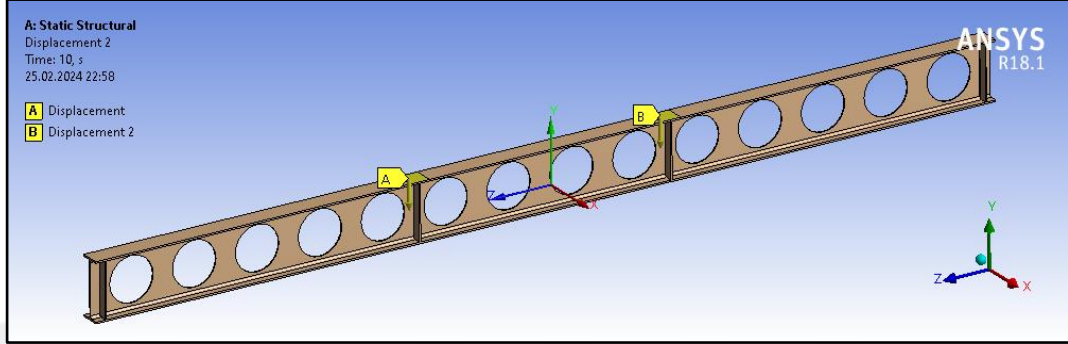
DBK350-E kirişi üzerinde deneysel olarak tekrarlı yapılan testler sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri 164,8 kN ve 168,2 kN (ortalama 166,5 kN), bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar 74,3 ve 67,8 mm (ortalama 71,1 mm) olarak elde edildi. Bu veriler doğrultusunda Ansys workbench yazılımında yük etki noktalarına 10 adımda deplasman verildiğinde yine aynı bölgeden 167,5 kN yük elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 4.62’de verilmiştir.



Şekil 4.62. DBK350-E kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri

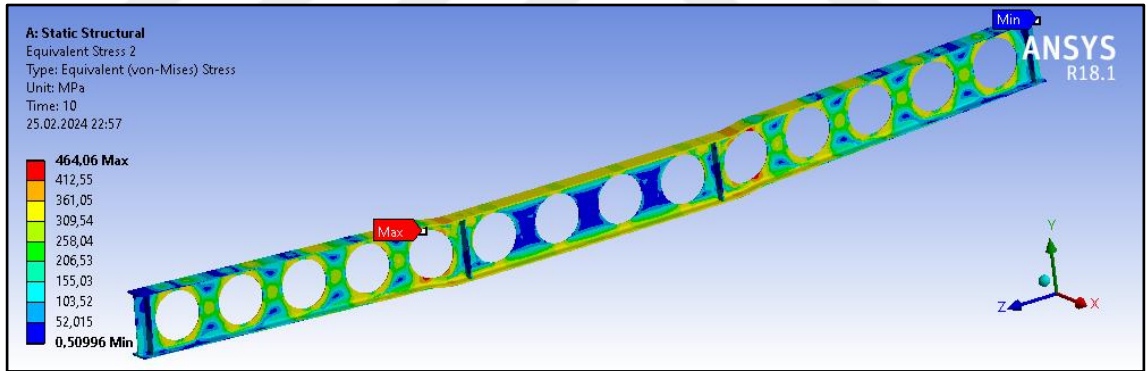
4.3.1.3. DBK-D iki noktadan yükleme

Genel görünümü Şekil 4.63'te verilen DBK350-D kiriş modeli iki noktadan yükleme altında non-lineer sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Üst flanşa tanımlanan 120x120 mm ebatlarında plakaya deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 117,1 mm deplasman Ansys-Workbench yazılımında 10 adımda uygulanmıştır.

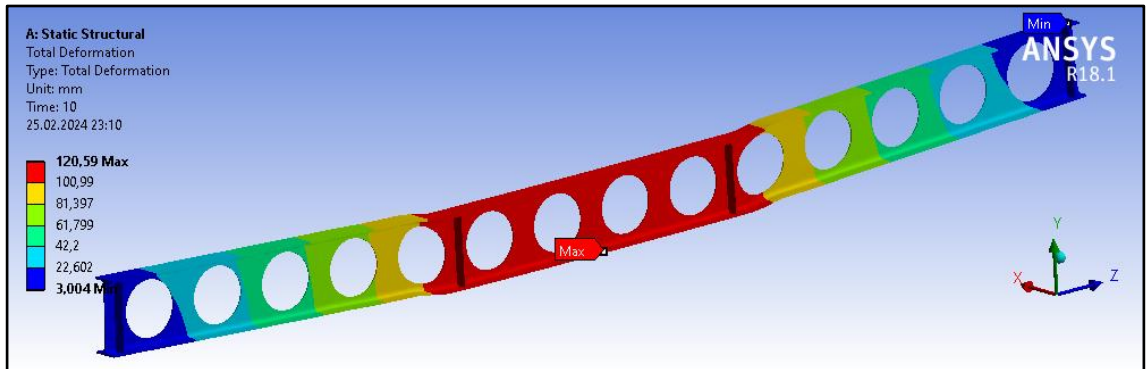


Şekil 4.63. DBK350-D iki noktadan yükleme durumu

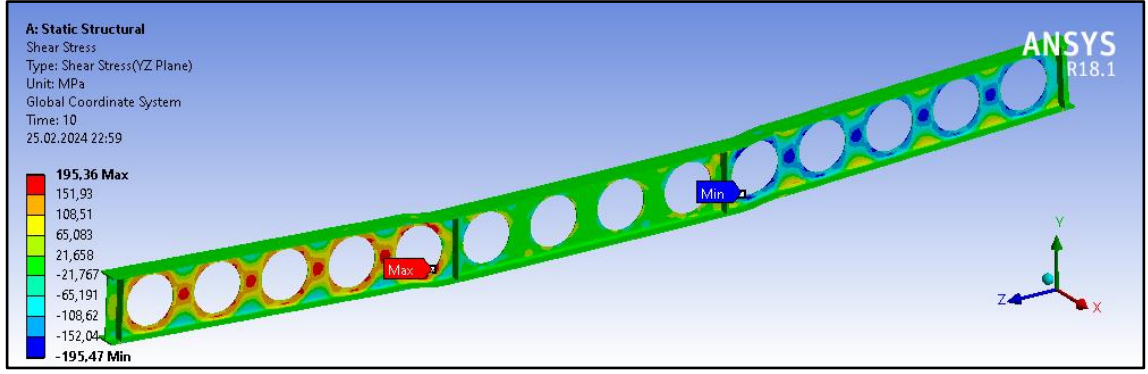
DBK350-D kiriş modelinde doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kiriş üzerinde oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises Stress) ve deformasyon dağılımları Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te, kesme ve normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.66 ve Şekil 4.67'de verilmiştir.



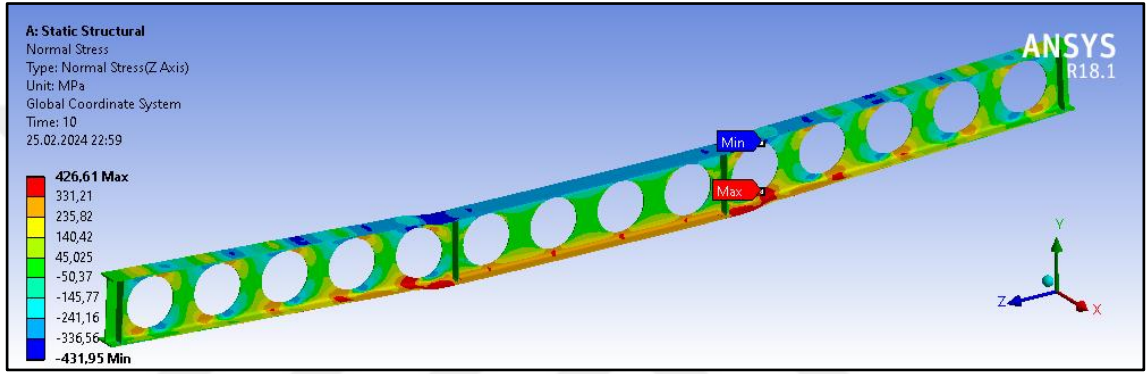
Şekil 4.64. DBK350-D kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.65. DBK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında deplasmanlar

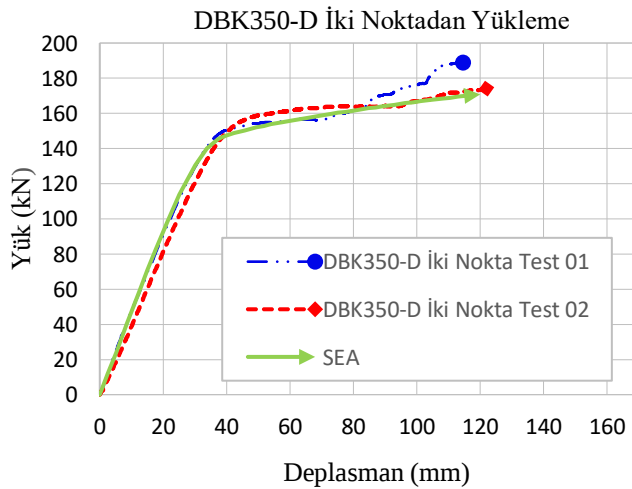


Şekil 4.66. DBK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmeleri



Şekil 4.67. DBK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında normal gerilmeler

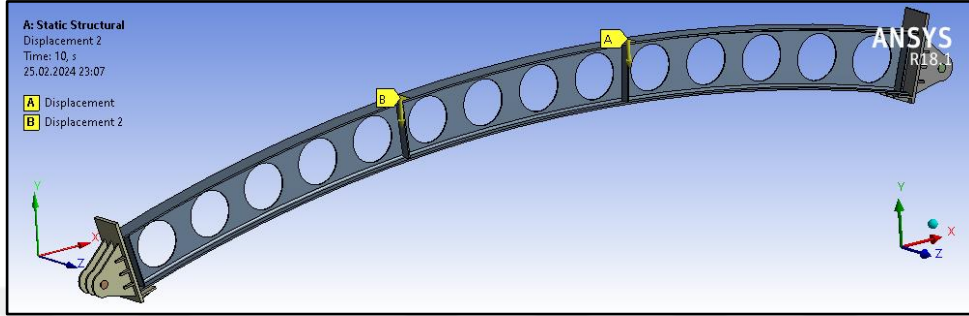
DBK350-D kirişi üzerinde deneysel olarak tekrarlı yapılan testler sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri 188,9 kN ve 174,1 kN (ortalama 181,5 kN), bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar 114,4 ve 125,6 mm (ortalama 120 mm) olarak elde edildi. Bu veriler doğrultusunda Ansys-Workbench programında yük etki noktalarına 10 adımda deplasman verildiğinde yine aynı bölgeden 170,8 kN yük elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 4.68’de verilmiştir.



Şekil 4.68. DBK350-D SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri karşılaştırma

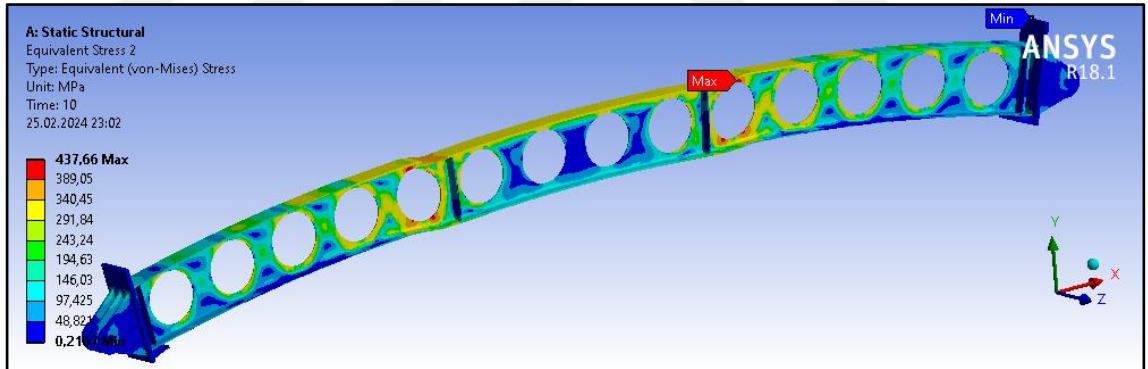
4.3.1.4. DBK-E iki noktadan yükleme

Genel görünümü Şekil 4.69’da verilen DBK350-E kiriş modeli iki noktadan yükleme altında doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Kiriş merkezi üst flanşına tanımlanan 120x120 mm ebatlarında plakaya deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 82,8 mm deplasman Ansys-Workbench programında 10 adımda uygulanmıştır.

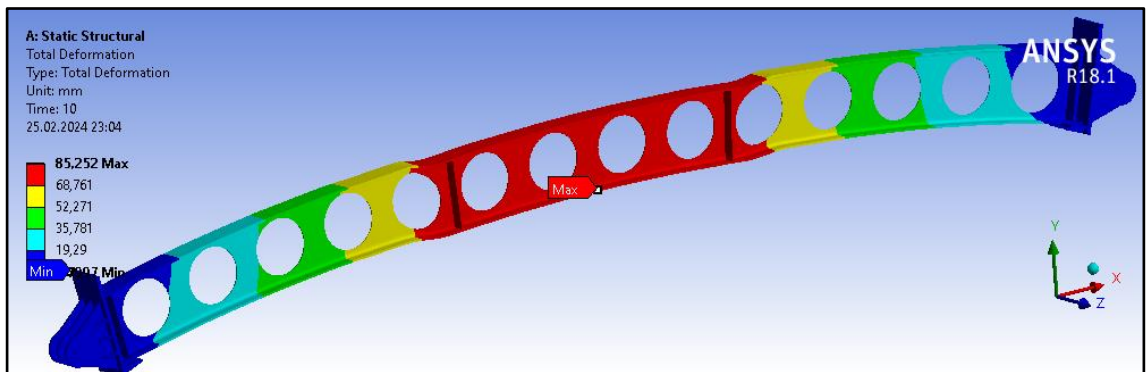


Şekil 4.69. DBK350-E sonlu elemanlar analizi; iki noktadan yükleme durumu

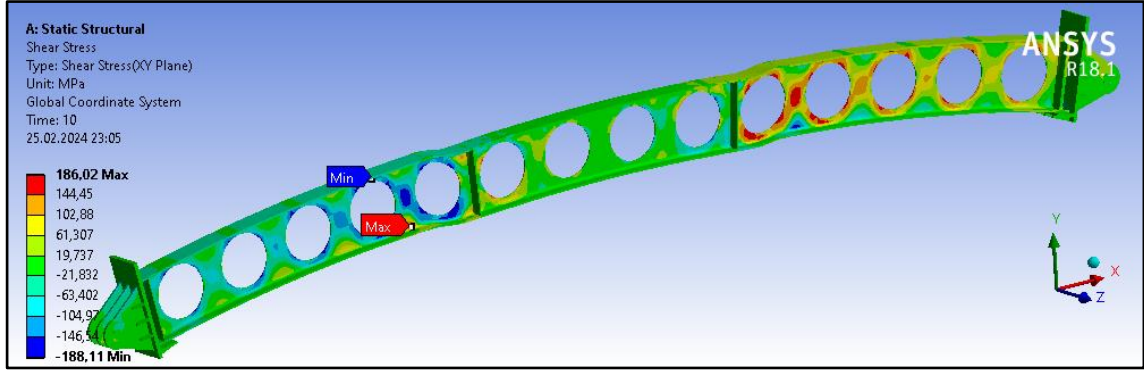
DBK350-E kiriş modelinde doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kiriş üzerinde oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises Stress) ve deformasyon dağılımları Şekil 4.70 ve Şekil 4.71’de, kesme ve normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.72 ve Şekil 4.73’te verilmiştir.



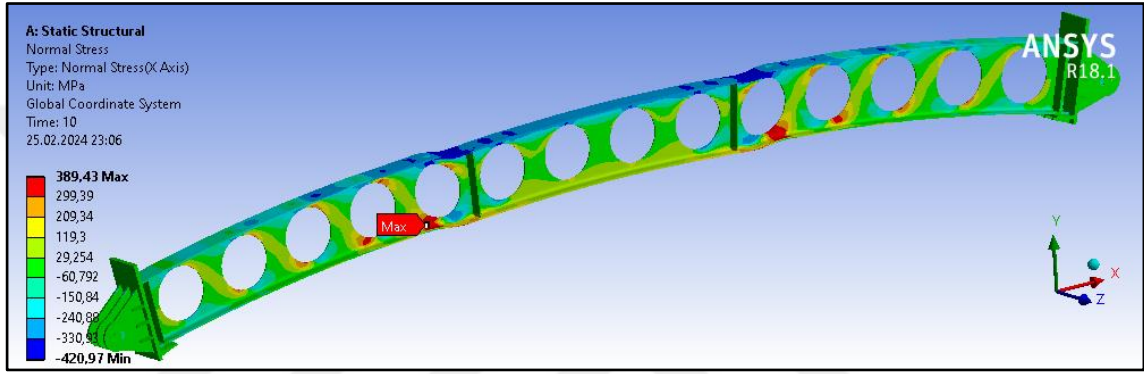
Şekil 4.70. DBK350-E kirişi orta bölgesi SEA eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.71. DBK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında deplasmanlar

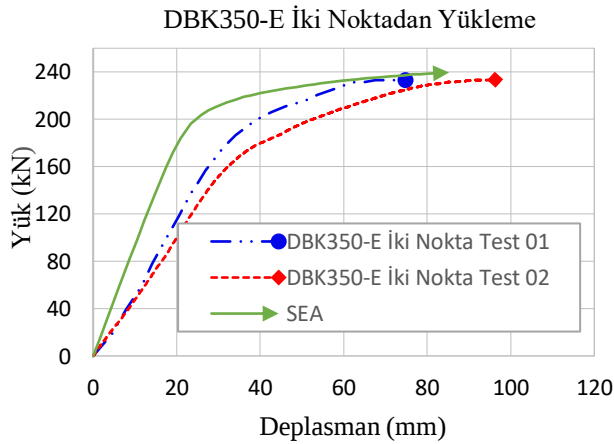


Şekil 4.72. DBK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmeleri



Şekil 4.73. DBK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında normal gerilmeler

DBK350-E kirişi üzerinde deneysel olarak tekrarlı yapılan testler sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri 233 kN ve 233,4 kN (ortalama 233,2 kN), bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar 74,1 ve 96,3 mm (ortalama 85,2 mm) olarak elde edildi. Bu veriler doğrultusunda Ansys-Workbench programında yük etki noktalarına 10 adımda deplasman verildiğinde yine aynı bölgeden 239,5 kN yük elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 4.74'te verilmiştir.

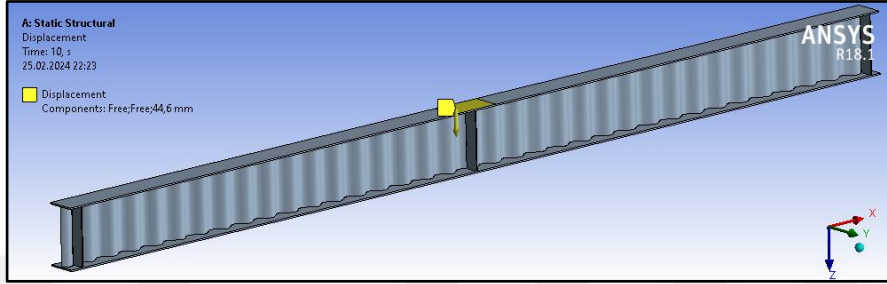


Şekil 4.74. DBK350-E kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri

4.3.2. Ondülin gövdeli kirişlerin sonlu elemanlar analizi

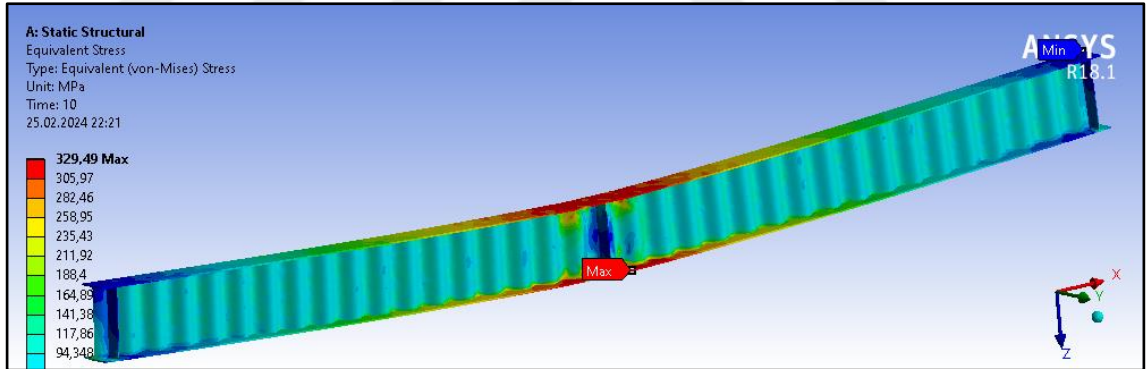
4.3.2.1. OGK-D tek noktadan yükleme

Genel görünümü Şekil 4.75'te verilen OGK350-D kiriş modeli tek noktadan yükleme altında non-linear SEA yapılmıştır. Üst flanşına tanımlanan 280x120 mm ebatlarında plakaya deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 44,6 mm deplasman 10 adımda uygulanmıştır.

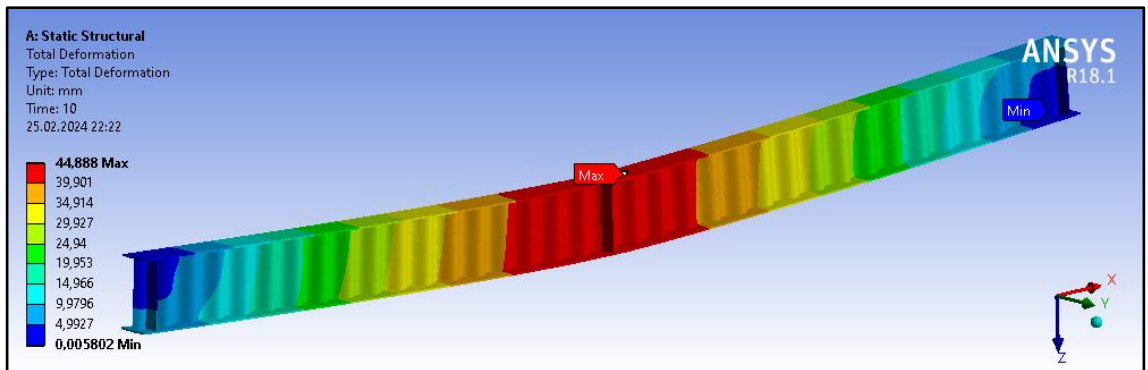


Şekil 4.75. OGK350-D sonlu elemanlar analizi; tek noktadan yükleme durumu

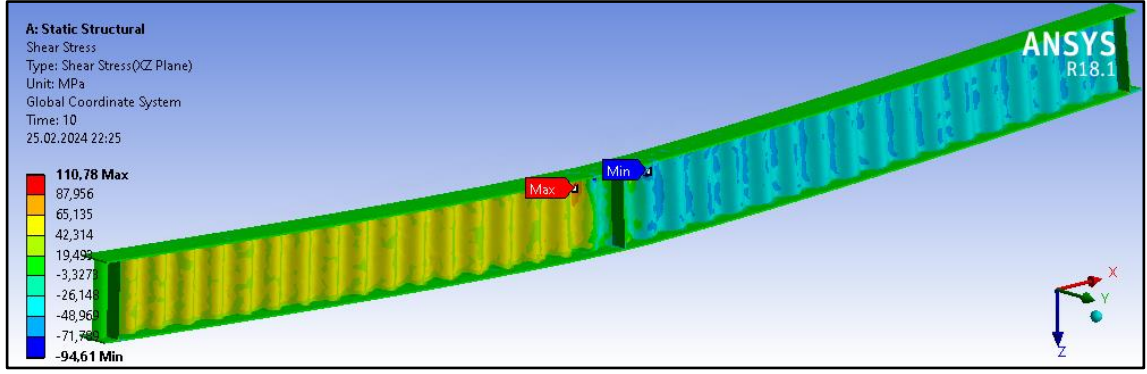
OGK350-D kiriş modelinde doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kiriş üzerinde oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises Stress) ve deformasyon dağılımları Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de, kesme ve normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.78 ve Şekil 4.79'da verilmiştir.



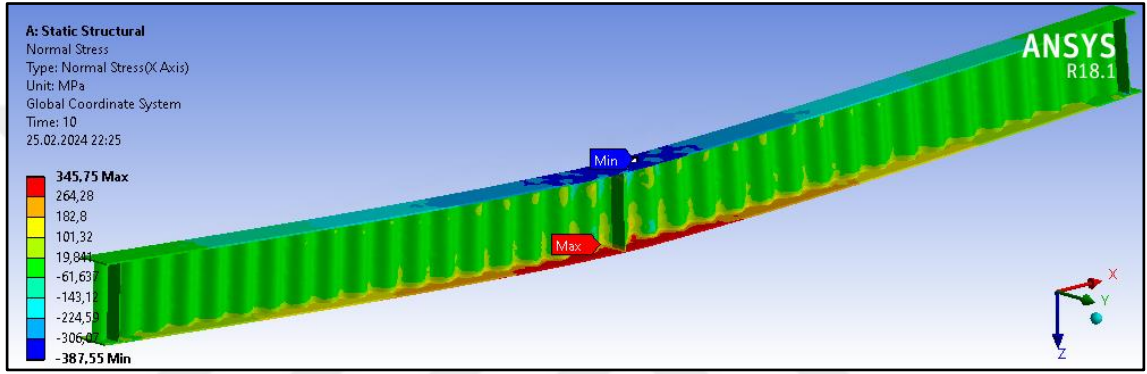
Şekil 4.76. OGK350-D kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.77. OGK350-D kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında deplasmanlar

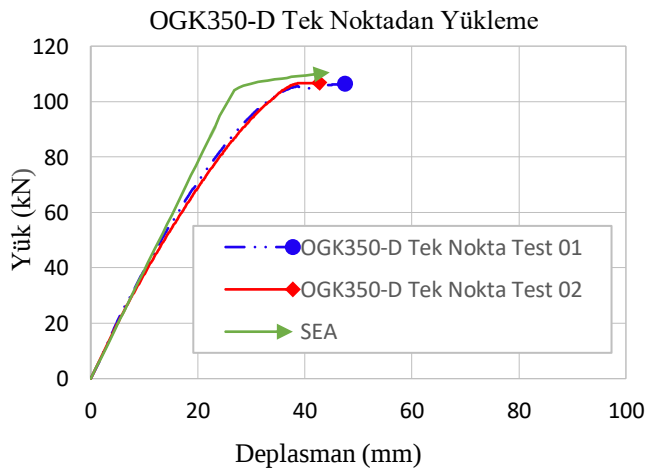


Şekil 4.78. OGK350-D kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında kesme gerilmeleri



Şekil 4.79. OGK350-D kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında normal gerilmeler

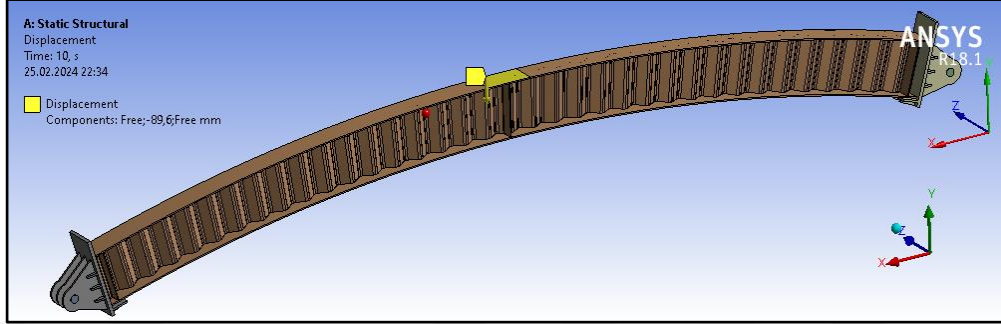
OGK350-D kirişi üzerinde deneysel olarak tekrarlı yapılan testler sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri 106,4 kN ve 106,8 kN (ortalama 106,6 kN), bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar 46,4 ve 42,7mm (ortalama 44,6 mm) olarak elde edildi. Bu veriler doğrultusunda Ansys-Workbench programında yük etki noktalarına 10 adımda deplasman verildiğinde yine aynı bölgeden 110,5 kN yük elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 4.80’de verilmiştir.



Şekil 4.80. OGK350-D SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri karşılaştırması

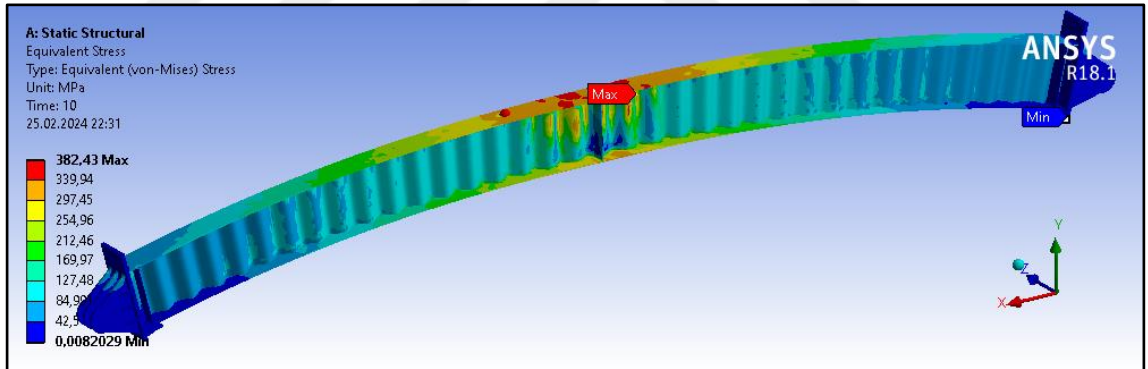
4.3.2.2. OGK-E tek noktadan yükleme

Genel görünümü Şekil 4.81’de verilen OGK350-E kiriş modeli tek noktadan yükleme altında non-linear SEA yapılmıştır. Kiriş merkezi üst flanşına tanımlanan 280x120 mm ebatlarında plakaya deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 89,6 mm deplasman 10 adımda uygulanmıştır.

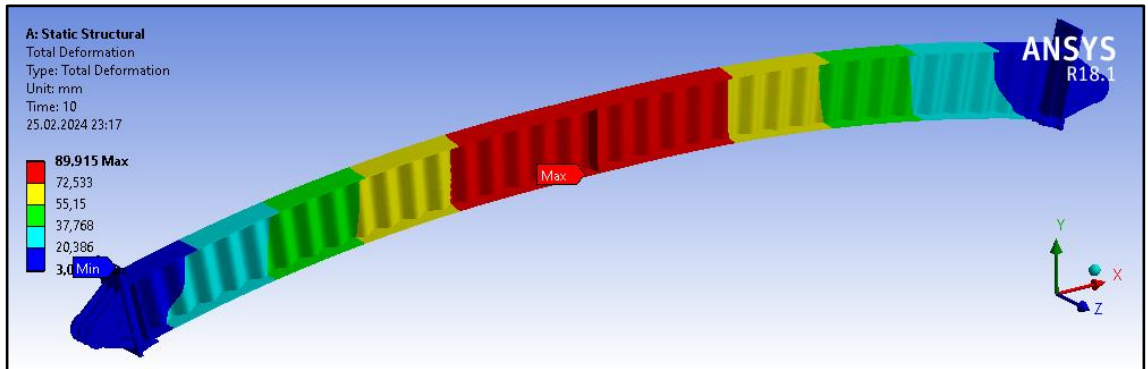


Şekil 4.81. OGK350-E sonlu elemanlar analizi; tek noktadan yükleme durumu

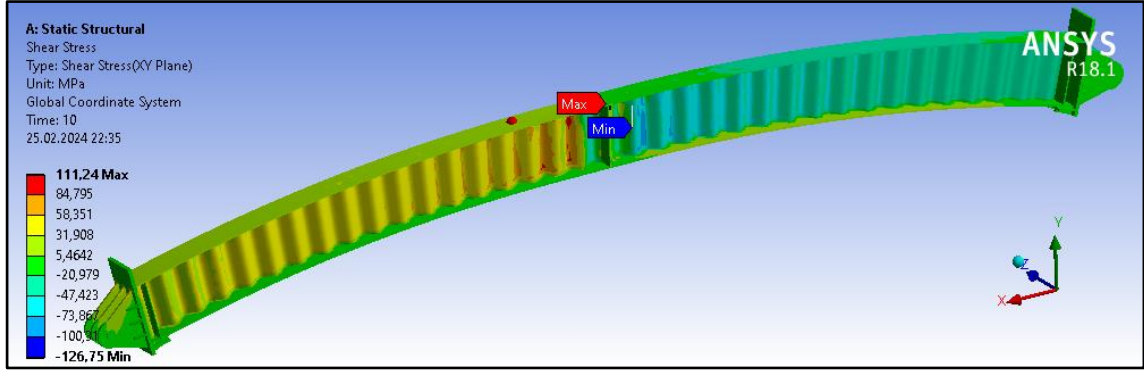
OGK350-E kiriş modelinde doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kiriş üzerinde oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises Stress) ve deformasyon dağılımları Şekil 4.82 ve Şekil 4.83’te, kesme ve normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.84 ve Şekil 4.85’te verilmiştir.



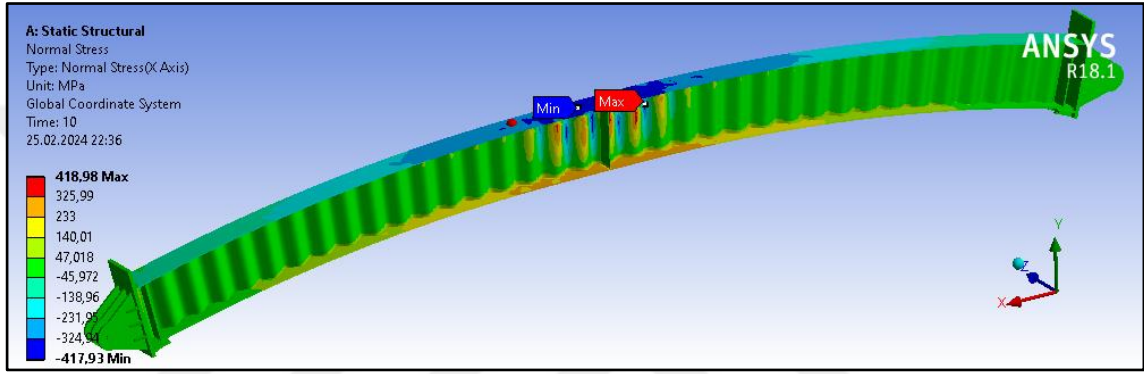
Şekil 4.82. OGK350-E kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.83. OGK350-E kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında deplasmanlar

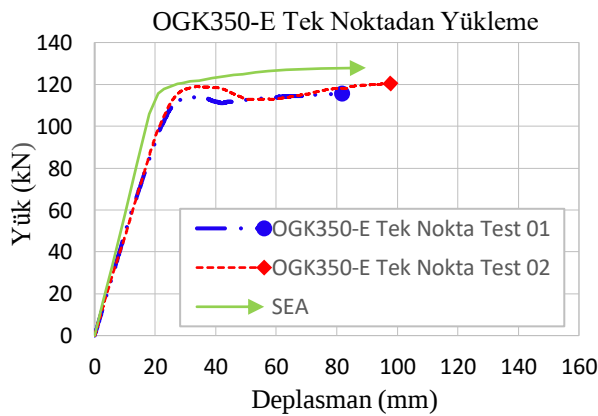


Şekil 4.84. OGK350-E kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında kesme gerilmeleri



Şekil 4.85. OGK350-E kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında normal gerilmeler

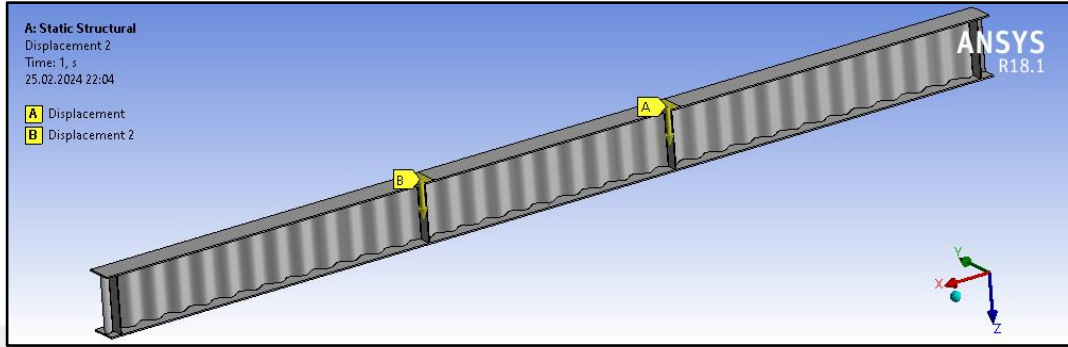
OGK350-E kirişi üzerinde deneysel olarak tekrarlı yapılan testler sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri 115,6 kN ve 120,4 kN (ortalama 118 kN), bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar 81,7 ve 97,7 mm (ortalama 89,7 mm) olarak elde edildi. Bu veriler doğrultusunda Ansys-Workbench programında yük etki noktalarına 10 adımda deplasman verildiğinde yine aynı bölgeden 127,9 kN yük elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 4.86’da verilmiştir.



Şekil 4.86. OGK350-E kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri

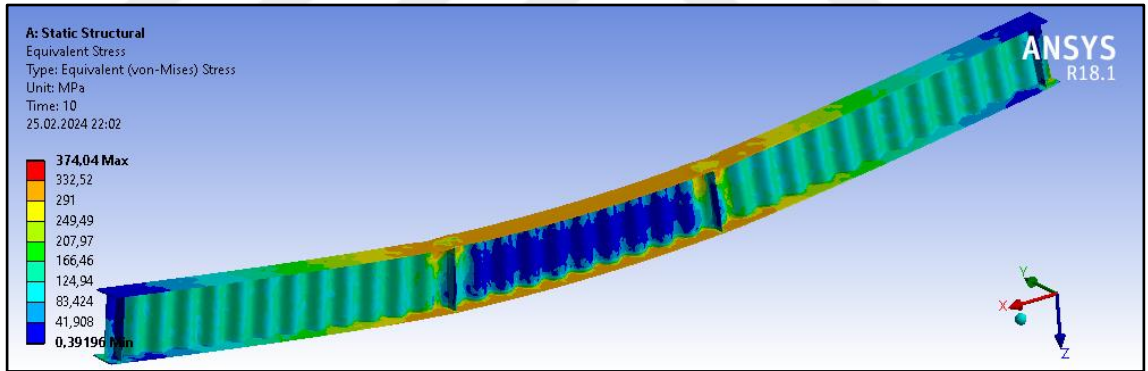
4.3.2.3. OGK-D iki noktadan yükleme

Genel görünümü Şekil 4.87’de verilen OGK350-D kiriş modeli iki noktadan yükleme altında non-lineer SEA yapılmıştır. Üst flanşa tanımlanan 120x120 mm ebatlarında plakaya deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 52,6 mm deplasman 10 adımda uygulanmıştır.

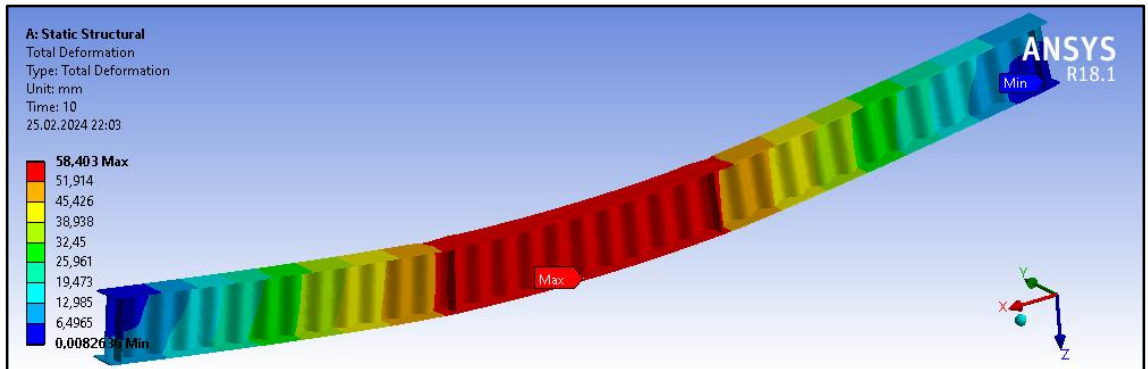


Şekil 4.87. OGK350-D iki noktadan yükleme durumu

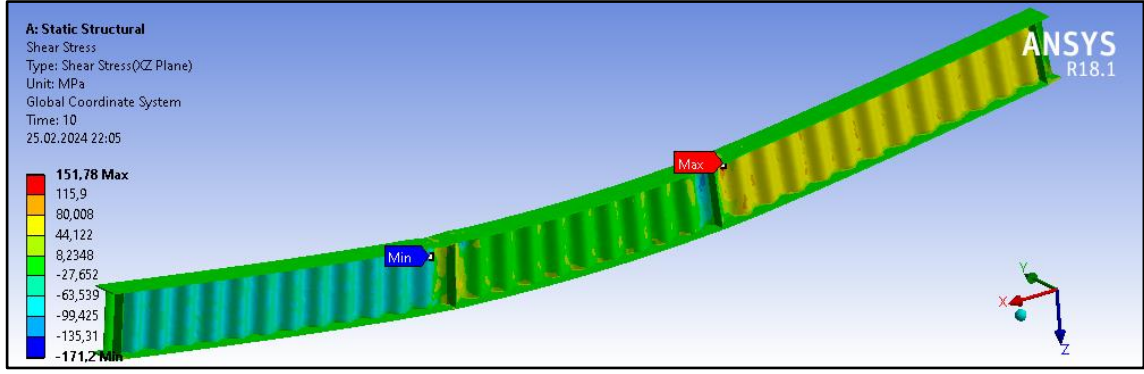
OGK350-D kiriş modelinde doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kiriş üzerinde oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises Stress) ve deformasyon dağılımları Şekil 4.88 ve Şekil 4.89’da, kesme ve normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.90 ve Şekil 4.91’de verilmiştir.



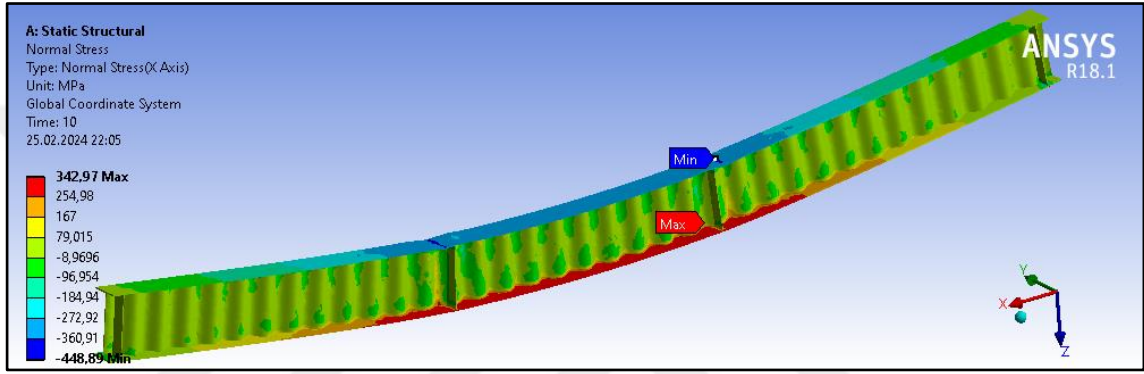
Şekil 4.88. OGK350-D kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.89. OGK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında deplasmanlar

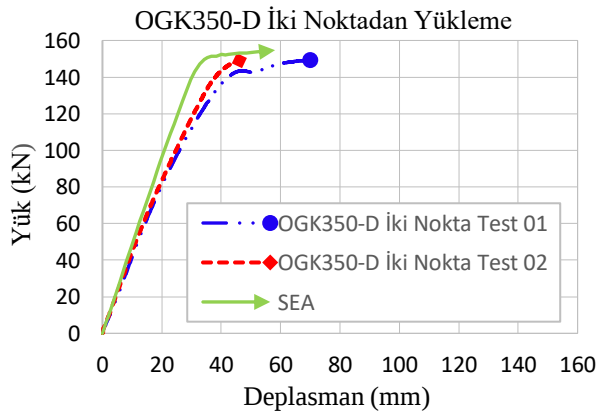


Şekil 4.90. OGK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmeleri



Şekil 4.91. OGK350-D kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında normal gerilmeler

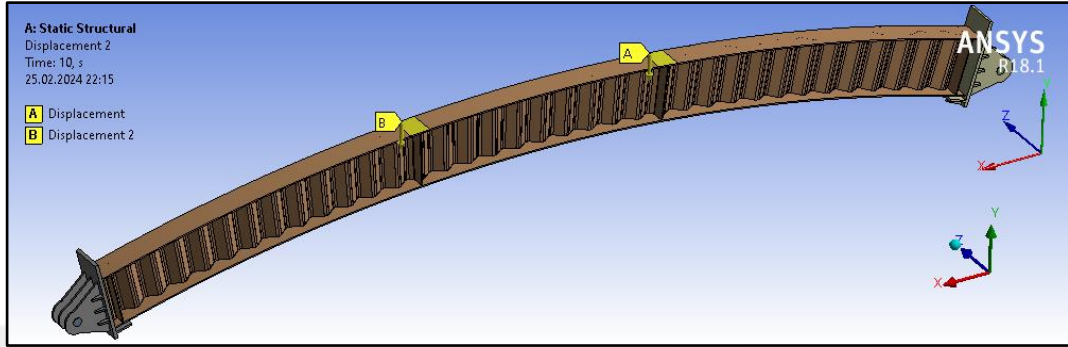
OGK350-D kirişi üzerinde deneysel olarak tekrarlı yapılan testler sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri 149,3 kN ve 149 kN (ortalama 149,1 kN), bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar 70 ve 46 mm (ortalama 58 mm) olarak elde edildi. Bu veriler doğrultusunda Ansys-Workbench programında yük etki noktalarına 10 adımda deplasman verildiğinde yine aynı bölgeden 154,7 kN yük elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 4.92’de verilmiştir.



Şekil 4.92. OGK350-D kirişleri SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri

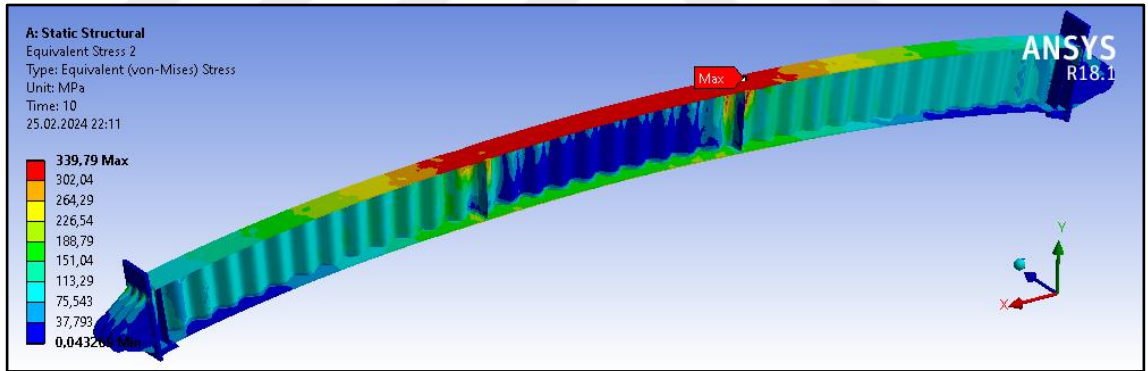
4.3.2.4. OGK-E iki noktadan yükleme

Genel görünümü Şekil 4.107’de verilen OGK350-E kiriş modeli iki noktadan yükleme altında non-linear SEA yapılmıştır. Kiriş merkezi üst flanşına tanımlanan 120x120 mm ebatlarında plakaya deneysel çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda 46,88 mm deplasman Ansys-Workbench programında 10 adımda uygulanmıştır.

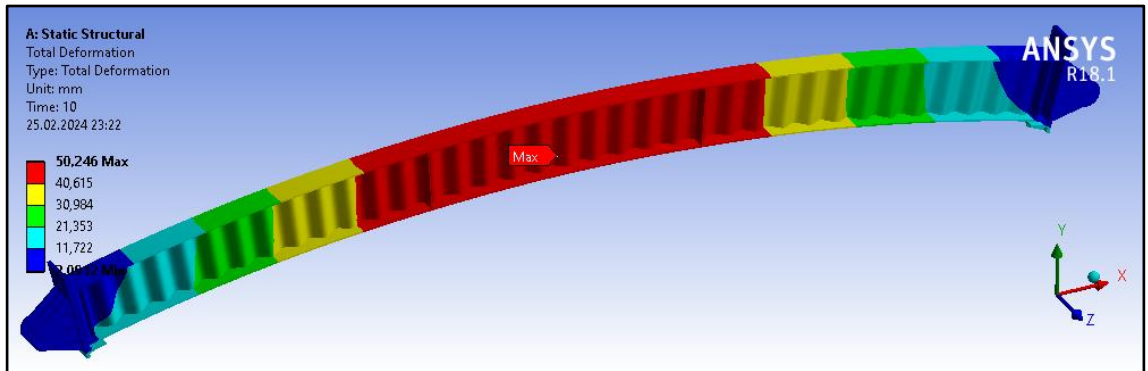


Şekil 4.93. OGK350-E sonlu elemanlar analizi; iki noktadan yükleme durumu

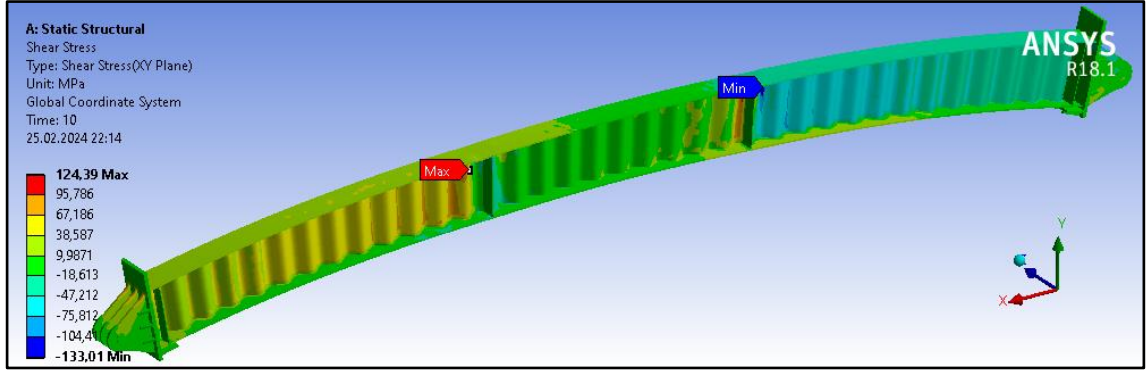
OGK350-E kiriş modelinde doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan sonlu elemanlar analizinde kiriş üzerinde oluşan eşdeğer gerilme (Von-Mises Stress) ve deformasyon dağılımları Şekil 4.94 ve Şekil 4.95’te, kesme ve normal gerilme dağılımları ise Şekil 4.96 ve Şekil 4.97’de verilmiştir.



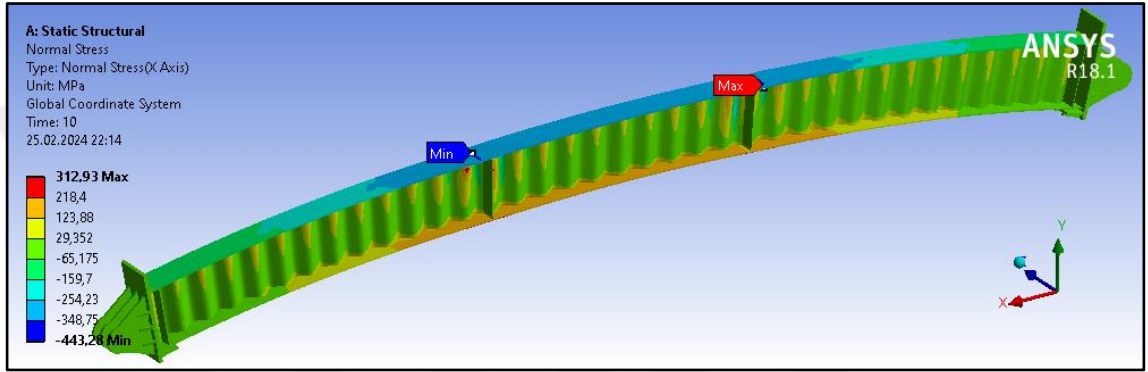
Şekil 4.94. OGK350-E kirişi SEA eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.95. OGK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında deplasmanlar

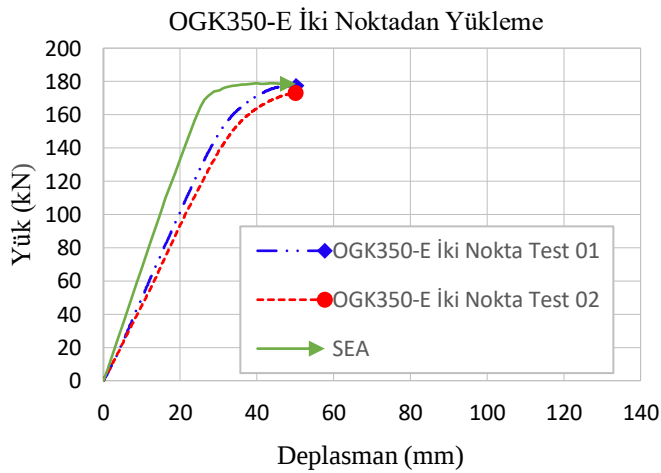


Şekil 4.96. OGK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmeleri



Şekil 4.97. OGK350-E kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında normal gerilmeler

OGK350-E kirişi üzerinde deneysel olarak tekrarlı yapılan testler sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri 177,3 kN ve 173 kN (ortalama 175,1 kN), bu kapasitelere karşılık gelen deplasmanlar 50,3 ve 50,1 mm (ortalama 50,2 mm) olarak elde edildi. Bu veriler doğrultusunda Ansys-Workbench yazılımında yük etki noktalarına 10 adımda deplasman verildiğinde yine aynı bölgeden 178,7 kN yük elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile SEA sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinin karşılaştırılması Şekil 4.98’de verilmiştir.

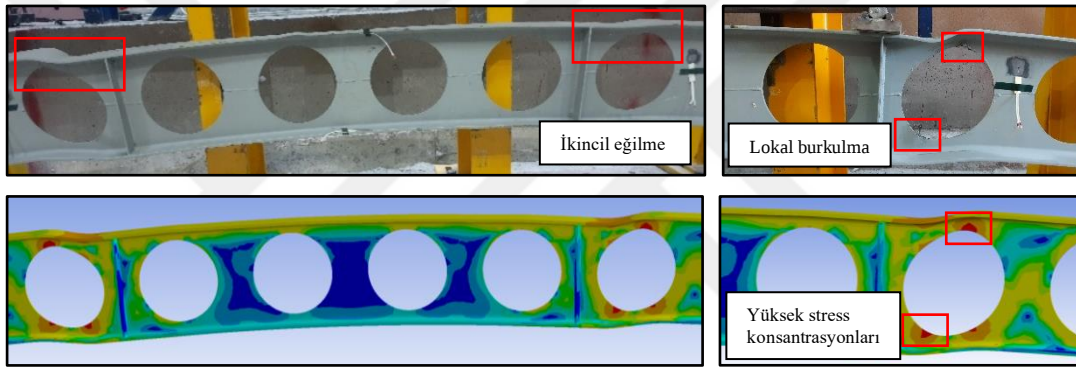


Şekil 4.98. OGK350-E SEA ve deneysel yük-deplasman grafikleri karşılaştırması

4.4. Deneysel ve Sayısal Çalışmanın Karşılaştırılması

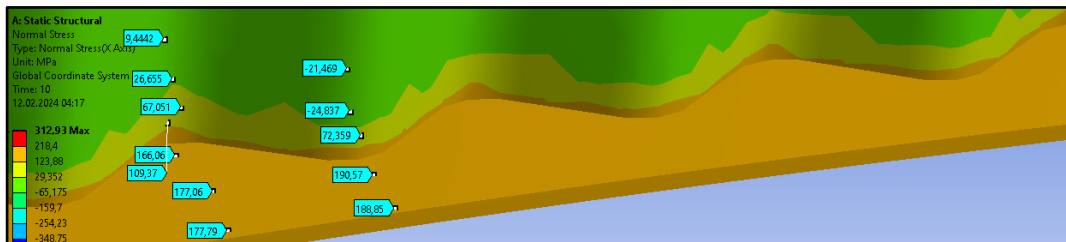
Deneysel çalışmanın verileri doğrultusunda, DBK350 ve OGK350 kiriş modelleri üzerinde yapılan non-linear SEA ile, detaylı gerilme dağılımları, yük-deplasman ilişkileri incelenmiştir. Bu analizlerde, düz formdan eğrisel forma geçişte tarafsız eksenin kiriş merkezinden uzaklaşması ve bunun sonucunda alt ve üst flanşlardaki kuvvet dağılımlarının değiştiği, normal ekseninde dış tepki kuvvetlerinin gerilme dağılımlarını etkilediği gözlemlenmiştir.

DBK350 kiriş modelleri üzerinde yapılan SEA, hem düz form hem de eğrisel form kiriş modellerinde gövde boşluklarından geçen kesme kuvvetlerinin transferi ile ortaya çıkan ikincil (vierendeel) eğilme deformasyonları ve de bu deformasyonların olduğu boşluk çevrelerinde yüksek stress konsantrasyonları gözlemlenmiştir (Şekil 4.99). DBK350 kirişleri ile yapılan deneysel çalışmada da ikincil eğilmeler ve boşluk çevrelerinde yüksek gerilmelere bağlı olarak ortaya çıkan lokal burkulma oluşumlarının gözlemlenmesi deneysel çalışmanın güvenilirliğinin bir göstergesidir.



Şekil 4.99. DBK350 kiriş, deneysel ve SEA görsel olarak karşılaştırılması

OGK350 kirişleriyle yapılan SE analizinde, dalgalı gövde ile flanş birleşim bölgelerindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, flanşlardan gövdeye geçişte normal gerilmelerin belirgin bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalma, dalgalı gövde formunun aksenal rijitliğinin oldukça düşük olmasına ve buna bağlı olarak flanşlarda oluşan normal gerilmelerin sinusoidal gövdeye aktarılamamasına bağlanabilir (Şekil 4.100). Bu kirişlerin deneysel çalışmalarında gözlemlenen basınç gerilmelerinin neden olduğu lokal flanş burkulma oluşumları göz önüne alındığında, gövde ile flanş arasındaki kuvvet aktarımının olmamasının, düz formdan eğrisel forma geçişteki yük taşıma performanslarında, DBK350 kirişlerinde olduğu kadar, belirgin bir artış olmamasında önemli bir rol oynadığı söylenebilir.



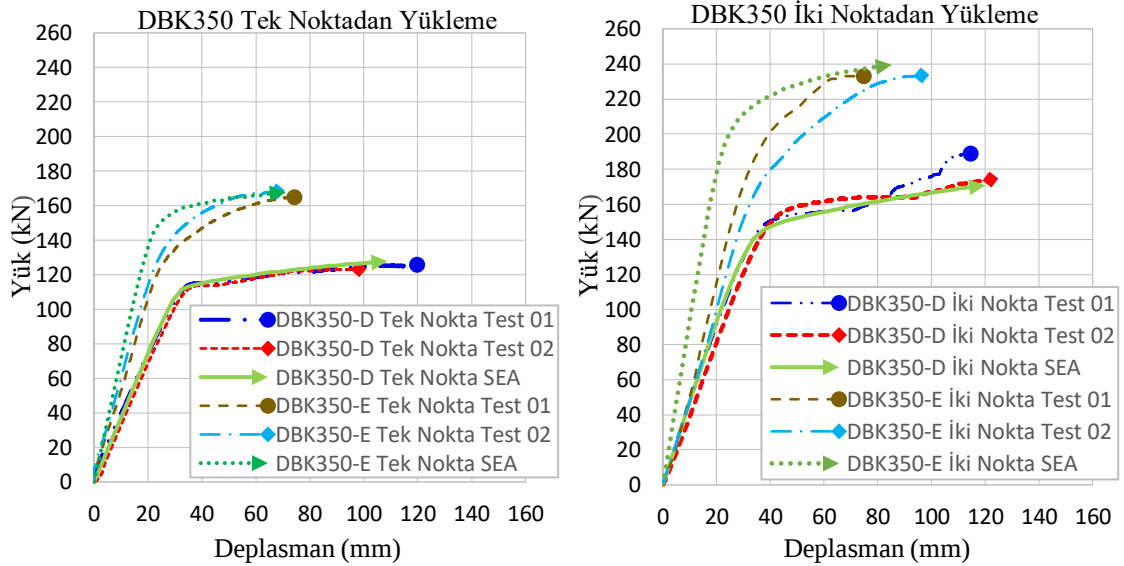
Şekil 4.100. Flanş-gövde birleşimi gerilme dağılımları

Düz formdan eğrisel forma geçişte kirişlerin yük taşıma kapasitesindeki artış oranları, Çizelge 4.4'te özetlenmiştir. Bu Çizelgede, SEA yük (1) olarak belirtilen değerler, deneylerden elde edilen nihai yüke karşılık gelen deplasmanın SEA ile kirişlere etki ettiğinde hesaplanan yükü vermektedir. SEA yük (2) ise SEA ile oluşturulan düz ve eğrisel formdaki kirişlerin yük-deplasman grafiklerinde aynı deplasman değerleri için hesaplanan yükleri temsil etmektedir. Burada aynı deplasman değerleri için referans olarak düşük olan deplasman yüküne göre hesaplanmıştır.

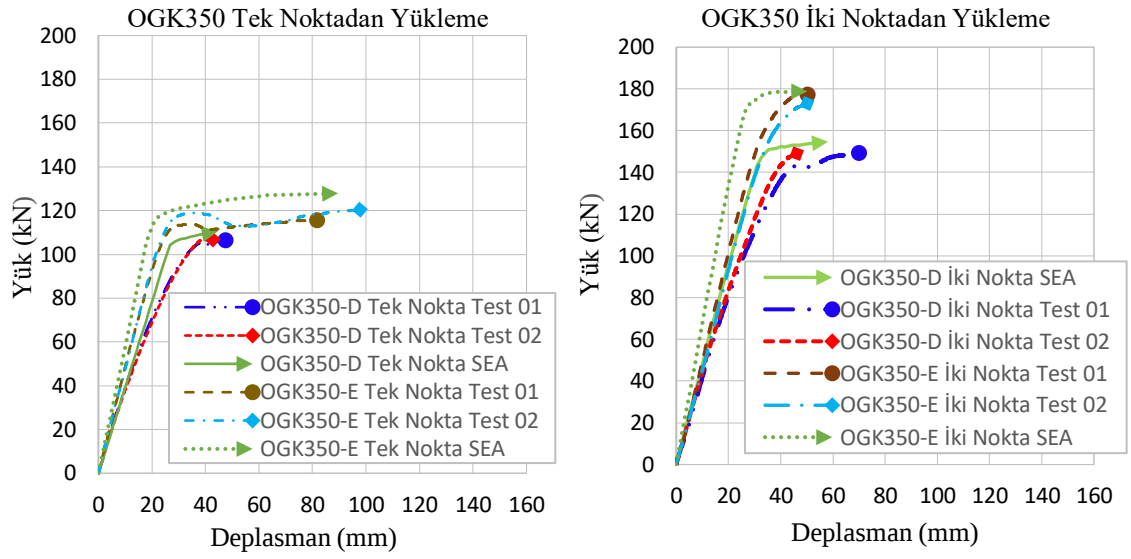
Çizelge 4.4. Sayısal ve deneysel çalışma yük artış oranları

Kiriş	Yükleme Tipi	DeneySEL Yük (kN)	DeneySEL Yük Artışı (%)	SEA Yük (1) (kN)	SEA Yük (1) Artışı (%)	SEA Yük (2) (kN)	SEA Yük (2) Artışı (%)
DBK350-D	Tek Nokta	124,5	33,8	127,8	31,1	122,2	37,1
DBK350-E	Tek Nokta	166,5		167,5		167,5	
DBK350-D	İki Nokta	181,5	28,5	170,8	40,2	163,2	46,7
DBK350-E	İki Nokta	233,2		239,5		239,5	
OGK350-D	Tek Nokta	106,6	10,7	110,5	15,7	110,5	12,4
OGK350-E	Tek Nokta	118,0		127,9		124,2	
OGK350-D	İki Nokta	149,1	17,4	154,7	15,5	153,6	16,3
OGK350-E	İki Nokta	175,1		178,7		178,7	

DBK350 ve OGK350 kiriş modellerinden deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük-deplasman grafikleri, karşılaştırmalı olarak Şekil 4.101 ve Şekil 4.102'de verilmiştir.



Şekil 4.101. DBK350 kirişleri, SEA yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması



Şekil 4.102. OGK350 kirişleri, SEA yük-deplasman grafikleri karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Yeni nesil kirişlerden olan gövde yüksekliği artırılmış dairesel boşluklu çelik kirişlerin (DBK) ve ondülin gövdeli çelik kirişlerin (OGK) performans ve davranışlarını değerlendirilmek, tonoz çatılarda kullanımlarını yaygınlaştırmak amacıyla gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalara bu tezde kapsamlı olarak yer verilmiştir. Bu kirişlerin tasarım kriterlerinde, ondülin gövdeli çelik kiriş sistemlerinin tasarımları için BS EN1993-1:2005 (Annex-D, Eurocode 3) ve DIN 18-800 Teil-1 şartnamelerinde öngörülen tasarım kıstasları temel alınmıştır. Gövde yüksekliği artırılmış dairesel boşluklu kiriş sistemleri için ise BS-5950 ve EN1993-1:2005 (Annex-N, Eurocode 3) şartnamelerindeki tasarım kıstasları esas alınmıştır.

Dairesel boşluklu kirişlerin üretim süreci, gövdenin boşluk geometrisine uygun olarak kesilip elde edilen alt ve üst parçalarının bir miktar kaydırılması ve ardından tekrar kaynatılması suretiyle gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda, kirişin orijinal haline göre daha fazla bir yüksekliğe sahip olması sağlanarak atalet momenti ve yük taşıma kapasitesi artırılır. Ancak, bu avantajlar beraberinde bazı riskleri de getirir.

Gövde yüksekliğinin artmasıyla birlikte, gövdenin narinleşmesine bağlı olarak, burkulma problemleri ortaya çıkabilir. Bu sorun, özellikle yük etki bölgelerine berkitme levhaları kaynatılmasıyla çözülebilir. Bu yöntemle kirişin performansı iyileştirilir ve aynı zamanda tali bağlantılar için gereken bağlantı plakaları sağlanır.

Bu kirişlerin performansını etkileyen diğer bir faktör ise yanal burkulmadır. Güçlü eksenindeki atalet momentindeki artış oranı, zayıf ekseninde aynı oranda gerçekleşmez ve bu durum yanal burkulma riskini artırabilir. Ayrıca, kirişlerin düz form yerine eğrisel formda yapılması bu riski daha da artırabilir. Çünkü eğrisel formdaki kirişlerde iç kuvvetlerin dağılımı ve yönleri değişir. Kemer formundan dolayı tarafsız eksen kesit merkezinden uzaklaşır ve flanşta göreceli olarak daha fazla eksenel basınç kuvveti talebi oluşur.

Ondülin gövdeli kirişler ise dalgalı ince bir levhanın alt ve üst flanş görevi yapan iki çelik plakaya kaynaklanması ile elde edilen taşıyıcı çelik kirişlerdir. Gövde kesitinin sinüs fonksiyonu şeklinde olan bu yapısı, yük altında kirişin plastik limit noktasına gelmeden rijitlik kaybına bağlı burkulmasını engellerken kesme kuvvetine ve yerel etkilere karşı kirişin taşıma kapasitesini de arttırmaktadır. Gövdenin bu özel yapısı kiriş öz ağırlığında azalma ve yük taşıma kapasitesinde artmaya yol açmakta ve ekonomik kazanç elde edilmektedir. Ancak, gövdenin eksenel rijitliğinin oldukça düşük olmasından dolayı eğilme durumunda flanşlardaki oluşan normal gerilmeler, sinusoidal gövdeye aktarılamamaktadır. Öte yandan, bu kirişler düz form yerine eğrisel formda olduğu takdirde basınç flanşında normal kuvvetlerin göreceli olarak artması beklenmektedir.

Eğrisel forma bağlı olarak normal basınç kuvvetlerinin etkin bir şekilde artmasının beklenmesi, buna karşılık; ondülin gövdeli kirişlerde, flanşlardaki normal kuvvetlerin sinusoidal gövdeye iletilmemesi, dairesel boşluklu kirişlerde ise normal kuvvetlere bağlı olarak oluşan yanal burkulma riskinin ön planda olması gibi faktörlerin değerlendirilmesi, bu kirişlerin düz ve eğrisel formdaki sergiledikleri performansların

kıyaslanabilmesi amacıyla hidrolik güç üniteli basınç silindirine sahip yükleme çerçevesi altında testler yapılmıştır.

Deneyisel çalışmalar neticesinde; dairesel boşluklu kirişler için tek noktadan yapılan yükleme testlerinde, düz form DBK350 kiriş modeli 124,5 kN ortalama taşıma kapasitesine sahipken, eğrisel formda %33,8'lik bir artış ile 166,5 kN elde edilmiştir. Göçme modlarına bakıldığında hem düz hem de eğrisel formda ikincil (vierendeel) eğilmeler ve gövde boşluk çevrelerinde lokal burkulmalar gözlemlenmiştir. İki noktadan yükleme durumunda ise düz form DBK350 kiriş modeli 181,5 kN yük, eğrisel formda ise %28,5'lik bir artış ile 233,2 kN yük elde edilmiştir. Bu kirişlerin göçmesinde yanal burkulma, ikinci eğilme ve boşluk çevrelerindeki lokal burkulmalar etkili olmuştur (Çizelge 5.1).

Eğrisel formun DBK350 kiriş modellerinin farklı yük kombinasyonları altında mekanik performansının artırılmasında oldukça etkili bir katkı sağladığı ve iki noktadan yükleme durumunda görülen yanal ötelenmelerin eğrisel formdaki kirişlerin performansını önemli ölçüde etkilemediği yapılan deneyler ile tespit edilmiştir. Ayrıca DBK350 kiriş deneylerin tamamında ani yük kaybı olmadığı ve gövde burkulmalarının oluşmadığı göz önüne alındığında; yük etki bölgelerinde, gövde (web post) merkezine kaynatılan berkitme levhalarının bu kirişlerin verimliliğini arttırdığından bahsedilebilir.

Ondülin gövdeli kirişler için tek noktadan yapılan yükleme testlerinde, düz form OGK350 kiriş modeli 106,6 kN ortalama taşıma kapasitesine sahipken, eğrisel formda %10,7'lik bir artış ile 118 kN elde edilmiştir. İki noktadan yükleme durumunda ise düz form DBK350 kiriş modeli 149,1 kN yük eğrisel formda ise %17,4'lük bir artış ile 175,1 kN yük elde edilmiştir. OGK350 testlerinin tamamında kiriş üst flanşında normal basınç gerilmelerine bağlı olarak oluşan lokal burkulmalar tespit edilmiştir.

OGK350 ve DBK350 kirişleri karşılaştırıldığında eğrisel forma bağlı olarak yük taşıma kapasitelerindeki değişim oranlarının DBK350 kirişlerinde daha efektif sonuçlar verdiği görülmektedir. Öte yandan, OGK350 testlerinin tamamında gözlemlenen flanş burkulmalarını dikkate alındığında, bu burkulma mekanizmalarının OGK350 kirişlerinin kapasitesini sınırlayıcı bir etkisi olduğu ve flanşta oluşan normal kuvvetlerin sinusoidal gövdeye aktarılamamasının, özellikle eğrisel formdaki OGK350 kirişlerin performansında belirleyici bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmaktadır (Çizelge 5.1). Ayrıca, OGK350 testlerinde gövdede lokal-global burkulma modlarının oluşmaması, sinusoidal dalga formunun gövdenin genel bütünlüğün korunduğunu ve oldukça etkili bir performans sergilediğini göstermektedir.

Çizelge 5.1. DBK350 ve OGK350 kirişleri test sonuçları genel özeti

Kiriş	Form	Yükleme Tipi	Test 1 (kN)	Test 1 (mm)	Test 2 (kN)	Test 2 (mm)	Ortalama Dep.(mm)	Ortalama Yük(kN)	Yük Artışı (%)	Göçme Tipi
DBK350	Düz	Tek Nokta	125,8	119,7	123,2	98,1	108,9	124,5	33,8	- İkincil Eğilme - lokal Burkulma (boşluk çevresi)
DBK350	Eğrisel	Tek Nokta	164,8	74,3	168,2	67,8	71,1	166,5		
DBK350	Düz	İki Nokta	188,9	114,4	174,1	125,6	120,0	181,5	28,5	- İkincil Eğilme - Yanal Burkulma - lokal Burkulma (boşluk çevresi)
DBK350	Eğrisel	İki Nokta	233,0	74,1	233,4	96,3	85,2	233,2		
OGK350	Düz	Tek Nokta	106,4	46,4	106,8	42,7	44,6	106,6	10,7	- lokal Burkulma (flanş)
OGK350	Eğrisel	Tek Nokta	115,6	81,7	120,4	97,7	89,7	118,0		
OGK350	Düz	İki Nokta	149,3	70	149,0	46	58	149,1	17,4	- lokal Burkulma (flanş)
OGK350	Eğrisel	İki Nokta	177,3	50,3	173,0	50,1	50,2	175,1		

Dairesel boşluklu çelik kirişler ve ondülin gövdeli çelik kirişlerin deneysel testlerinin ardından, bu testlerin doğrulanması amacıyla *ANSYS-Workbench v18.1* yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu süreç, hem deneysel hem de sayısal verilerin birbirini tamamlamasını sağlayarak daha sağlam ve güvenilir tasarımların elde edilmesine katkıda bulunur. Analizin sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırıldığında oldukça tutarlı bir uyum göstermiş ve kirişlerin kapsamlı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. Deneysel ve SEA yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması

Kiriş	Yükleme Tipi	Deneysel Sonuçlar (kN)	Sayısal Sonuçlar (kN)	% Fark
DBK350-D	Tek Nokta	124,5	127,8	2,6
DBK350-E	Tek Nokta	166,5	167,5	0,6
DBK350-D	İki Nokta	181,5	170,8	-6,2
DBK350-E	İki Nokta	233,2	239,5	2,6
OGK350-D	Tek Nokta	106,6	110,5	3,5
OGK350-E	Tek Nokta	118,0	127,9	7,7
OGK350-D	İki Nokta	149,1	154,7	3,6
OGK350-E	İki Nokta	175,1	178,7	2,0

6. KAYNAKLAR

- Alikhanifard, M.A., Rahai, A.R. and Tehrani, P. 2022. A new shear strength model for steel corrugated web girders. *Journal of Constructional Steel Research*, 197: 107457.
- Amrous, H., Yossef, N.M. and El-Boghdadi, M.H. 2023. Experimental study and structural analysis of tapered steel beams with cellular openings. *Engineering Structures*, 288: 116212.
- Aydın, R., Yuksel, E., Yardımcı, N. AND Gokce, T. 2016. Cyclic behaviour of diagonally-stiffened beam-to-column connections of corrugated-web I sections. *Engineering Structures*, 121: 120–135.
- 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 Insttitution.
- Dai, X., Yang, J., Zhou, K. and Sheehan, t. 2023. Numerical study of steel–concrete composite cellular beam using demountable shear connectors. *Structures*, 51: 1328–1340.
- Design guide 31. 2016. Castellated and Cellular Beam Design, AISC, American Institutes of Steel Construction.
- Dong, Y., Jia, L., Xu, F. and Li, X. 2021. Experimental study on seismic behavior of steel structure with cellular beams and composite concrete slab. *Structures*, 34: 507–522.
- Dou, C., Zi, Q.J., Yong, L.P. AND Yan, L.G. 2016. Elastic shear buckling of sinusoidally corrugated steel plate shear wall. *Engineering Structures*, 121: 136–146.
- Ellobody, E. 2012. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes. *Thin-Walled Structures*, 52: 66–79.
- El-Sawy, K.M., Sweedan, A.M.I. and Martini, M.I. 2014. Moment gradient factor of cellular steel beams under inelastic flexure. *Journal of Constructional Steel Research*, 98: 20–34.

- Elkawas, A.A., Hassanein, M.F., El Hadidy, A.M., El-Boghdadi, M.H. AND Elchalakani, M. 2021. Behaviour of corrugated web girders subjected to lateral-torsional buckling: Experimental tests and numerical modelling. *Structures*, 33: 152–168.
- 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. 2011. Ultimate Load Capacity of Optimally Designed Cellular Beams. PhD Thesis, Middle East Technical University, 136 p.
- 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., 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.
- 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.
- Ertenli M. F., Kalkan İ. ve Büyükkaragöz A. 2021. Gövde buruşmalarının elastik olmayan yanal burkulma sınır uzunluğuna etkisi. *Politeknik Dergisi*, 24(1): 347-354.
- Ferreira, F.P.V., Martins, C.H. and Nardin, S. 2021. Assessment of web post buckling resistance in steel-concrete composite cellular beams. *Thin-Walled Structures*, 158: 106969.
- Ferreira, F.P.V., Shamass, R., Limbachiya, V., Tsavdaridis, K.D. and Martins, C.H. 2022. Lateral–torsional buckling resistance prediction model for steel cellular beams generated by artificial neural networks (ann). *Thin-Walled Structures*, 170: 108592.
- Ferreira, F.P.V., Tsavdaridis, K.D., Martins, C.H. and Nardin, S. 2021. Ultimate strength prediction of steel–concrete composite cellular beams with PCHCS. *Engineering Structures*, 236: 112082.
- Grilo, L.F., Fakury, R.H., Castro e Silva, A.L.R. and Veríssimo, G.S. 2018. Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 148: 525–541.

- Hao, J.S., Yan, L.G., Chen, B.W., Jia, Q.Z., Zhao, Q. and Zhen, G.L. 2023. The strength design of deeply buried circular corrugated steel arches with considering only soil radial restraining. *Thin-Walled Structures*, 183: 110422.
- Hassanein, M.F., Yu, M.Z., Elkawas, A.A., Al-Emrani, M. and Yong, B.S. 2022. Small-scale laterally-unrestrained corrugated web girders: (II) Parametric studies and LTB design. *Thin-Walled Structures*, 180: 109776.
- Hassanein, M.F., Elkawas, A.A., Bock, M., Yong, B.S. AND Elchalakani, M. 2021. Effect of using slender flanges on EN 1993-1-5 design model of mono-symmetric S460 corrugated web bridge girders. *Structures*, 33: 330–342.
- Husain, M.U. and Speirs W.G. 1971. Failure of castellated beams due to rupture of welded joints, *Acier-Stahl-Steel*, 1.
- Halleux, P. 1967. Limit Analysis of Castellated Steel Beams, *Acier-StahlSteel*, No.3.
- Inaam, Q. and Upadhyay, A. 2020. Behavior of corrugated steel I-girder webs subjected to patch loading:Parametric study. *Journal of Constructional Steel Research*, 165: 105896.
- Jäger, B. Dunai, L. Kőovesdi, B. 2017. Flange buckling behavior of girders with corrugated web Part I: Experimental study. *Thin-Walled Structures*, 118: 181–95.
- Jia, Q.Z., Bo, L.Z., Yan, L.G., Chen, B.W. and Jing, Z.T. 2022. Experimental and numerical study of Steel Corrugated-Plate Coupling Beam connecting shear walls. *Journal of Building Engineering*, 54: 104662.
- Johnson, R.P. and Cafolla, J. 1997. Local flange buckling in plate girders with corrugated webs. *Proc Inst Civ Eng – Struct Build*, 122:148-56.
- Khatri, A.P., Katikala, S.R. and Kotapati, V.K. Effect of load height on elastic buckling behavior of i-shaped cellular beams. *Structures*, 33: 1923–1935.
- Limbachiya, V. and Shamass, R. 2021. Application of artificial neural networks for web-post shear resistance of cellular steel beams. *Thin-Walled Structures*, 161: 107414.
- Lindner, J. 1990. Lateral torsional buckling of beams with trapezoidally corrugated webs. *Proceedings, 4th International Colloquium on Stability of Steel Structures*, pp. 79-82, Budapest.
- Lopes, G.C., Couto, C., Real, P.V. AND Lopes, N. 2017. Elastic critical moment of beams with sinusoidally corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 129: 185–194.
- Moghbeli, A. and Sharifi, Y. 2021. New predictive equations for lateral-distortional buckling capacity assessment of cellular steel beams. *Structures*, 29: 911–923.

- Mansouri, A. and Sharif, M.M. 2022. Development of a corrugated web shear link for steel moment-resisting frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 193: 107281.
- Morkhade, S.G. and Gupta, L.M. 2022. Parametric study of trapezoidally corrugated web beam. *Materials Today: Proceedings*, 56: 82–87.
- 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. *Ibrocon Structures and Materials Journal*, Volume 8, Number 6: 827-859.
- Nikoomanesh, M.R. and Goudarzi, M.A. 2021. Patch loading capacity for sinusoidal corrugated web girders. *Thin-Walled Structures*, 169: 108445.
- Nikoomanesh, M.R. and Goudarzi, M.A. 2020. Experimental and numerical evaluation of shear load capacity for sinusoidal corrugated web girders. *Thin-Walled Structures*, 153: 106798.
- Olander, H.C. 1953. A method of calculating stresses in rigid frame corners. *Journal of ASCE*.
- Oliveira, V.M., Rossi, A., Ferreira, F.P.V. and Martins, C.H. 2022. Stability behavior of steel–concrete composite cellular beams subjected to hogging moment. *Thin-Walled Structures*, 173: 108987.
- Oliveira, J.P.S., Calenzani, A.F.G., Fakury, R.H. AND Ferreira, W.G. 2016. Elastic critical moment of continuous composite beams with a sinusoidal-web steel profile for lateral-torsional buckling. *Engineering Structures*, 113: 121–132.
- Pathirana, S. and Qiao, P. 2020. Elastic local buckling of periodic sinusoidal corrugated composite panels subjected to in-plane shear. *Thin-Walled Structures*, 157: 107134.
- Papangelis, J. P. and Trahair, N. S. 1987. Flexureal-torsional buckling tests on arches. *Journal of Structural Engineering*, 113(7): 1433-1443.
- Pi, Y. L., Bradford, M. A. and Tong, G. S. 2010. Elastic lateral–torsional buckling of circular arches subjected to a central concentrated load. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(6): 847-862.
- Pimenta, R.J., Queiroz, G. AND Diniz, S.M.C. 2015. Reliability-based design recommendations for sinusoidal-web beams subjected to lateral-torsional buckling. *Engineering Structures*, 84: 195–206.
- Rajana, K., Tsavdaridis, K.D. and Koltsakis, E. 2020. Elastic and inelastic buckling of steel cellular beams under strong-axis bending. *Thin-Walled Structures*, 156: 106955.

- Roudsari, S.S., Soleimani, S.M. and Hamoush, S.A. 2021. Analytical study of the effects of opening characteristics and plate thickness on the performance of sinusoidal and trapezoidal corrugated steel plate shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 182: 106660.
- Sweedan, A.M.I. 2011. Elastic lateral stability of i-shaped cellular steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 67: 151–163.
- Sweedan, A.M.I. and El-Sawy, K.M. 2011. Elastic local buckling of perforated webs of steel cellular beam–column elements. *Journal of Constructional Steel Research*, 67: 1115–1127.
- Shamass, R. and Guarracino, F. 2020. Numerical and analytical analyses of high-strength steel cellular beams: A discerning approach. *Journal of Constructional Steel Research*, 166: 105911.
- Sebastiao, L. and Papangelis, J. 2023. Elastic local shear buckling of beams with sinusoidal corrugated webs. *Structures*, 54: 684–692.
- Tunca, O. 2019. Ondülin gövdeli kirişlerin optimizasyonu ve nihai yük taşıma kapasitelerinin analizi. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 177 s.
- Trahair, N. S. 2017. *Flexural-torsional buckling of structures*, CRC press.
- Toprac, A.A. and Cooke B.R. 1959. An Experimental Investigation of Open-Web Beams. *Welding Research Council*, 47.
- Yossef, N.M. 2020. A new approach to estimate the shear strength of curved corrugated steel webs. *Structures*, 24: 400–414.
- Yan, L.G., Chen, H., Yong, L.P. and Bradford, M.A. 2016. In-plane strength of steel arches with a sinusoidal corrugated web under a full-span uniform vertical load: Experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, 110: 105–115.
- Zaher, O.F., Yossef, N.M., El-Boghdadi, M.H. and Dabaon, M.A. 2018. Structural behaviour of arched steel beams with cellular openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 148: 756–767.
- Zi, Q.J., Shi, H.L., Xue, C.L., Qiu, P. and Zi, Y.N. 2020. Influence of bolts on seismic performance of earthquake-resilient prefabricated sinusoidal corrugated web steel beam-column joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 172: 106214.
- Zhang, Z., Pei, S. and Qu, B. 2017. Cantilever welded wide-flange beams with sinusoidal corrugations in webs: Full-scale tests and design implications. *Engineering Structures*, 144: 163–173.

- Zhang, A.L., Li, S.H., Jiang, Z.Q., Fang, H. AND Dou, C. 2017. Design theory of earthquake-resilient prefabricated sinusoidal corrugated web beam-column joint. 2017. *Engineering Structures*, 150: 665–673.
- Wang, S., Zhang, Y., Luo, T. and Liu, Y. 2021. Elastic critical shear buckling stress of large-scale corrugated steel web used in bridge girders. *Engineering Structures*, 244: 112757.
- Wang, S., Zhang, K., Zhang, Y. and Liu, Y. 2023. Shear failure mechanism of local buckling-dominated large-scale corrugated steel web. *Thin-Walled Structures*, 182: 110279.
- Wang, S., Zhang, Y., Luo, T. and Liu, Y. 2021. Elastic critical shear buckling stress of large-scale corrugated steel web used in bridge girders. *Engineering Structures*, 244: 112757.
- Wang, P., Ma, Q. and Wang, X. 2014. Investigation on Vierendeel mechanism failure of castellated steel beams with fillet corner web openings. *Engineering Structures*, 74: 44–51.
- Wu, L.L., An, L.P. and Bai, Y. 2020. In-plane stability of steel circular closed supports with I-section of sinusoidal corrugated webs: Experimental and numerical study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 106: 103566.



ÖZGEÇMİŞ

SERKAN TAŞ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2017-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2014-2017	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2010-2014	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1-Taş S., Erdal F., Tunca O. and Ozcelik R. (2024). Effect of geometry on flexural behavior of optimal designed web-expanded beams. Journal of Constructional Steel Research, 215 (2024) 108500., Doi: 10.1016/j.jcsr.2024.108500

2-Erdal F., Tunca O., Taş S. and Ozcelik R. (2021). Experimental and finite element study of optimal designed steel corrugated web beams. Advances in Structural Engineering, 24(1):1814-1827., Doi: 10.1177/1369433220986095

3-Erdal F., Tunca O., Taş S. and Çarbaş S. (2018). Ultimate Load Capacity of Optimal Designed Angelina™ Beams. Smart Construction Research, 2(3), 1-18., Doi: 10.18063/scr.v2i3.571.

4-Erdal F., Tunca O. and Doğan E. (2017). Optimum Design of Composite Corrugated Web Beams Using Hunting Search Algorithm. International Journal Of Engineering Applied Sciences, 9(2), 156-156., Doi: 10.24107/ijeas.323633.

5- Erdal F., Tunca O., Taş S. and Çarbaş S. (2016). Nonlinear Finite Element Analysis of Optimally Designed Steel Angelina Beams. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 10(10), 1256-1265.

6- 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, 8(3), 25-39.

7-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.

8- 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.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1-Erdal F., Tunca O. ve Taş S. (2015). Berkitme Levhalarının Optimum Boyutlandırılmış Dairesel Boşluklu Çelik Kirişlerin Yük Taşıma Kapasitelerine Etkisi. 6. Çelik Yapılar Sempozyumu (Tam Metin Bildiri/Poster).

2- Erdal F., Tunca O., Taş S. ve Doğan E. (2015). Ondülin Gövdeli Kirişlerin Stokastik Optimizasyon Yöntemleri Kullanılarak Optimum boyutlandırılması. 9. Ulusal Mekanik Kongresi.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Erdal F., Tunca O., Taş S. and Çarbaş S. (2017). Experimental Tests of Optimally Designed Composite Corrugated Web Beams. 3rd International Conference on Mechanics of Composite, 1, 41, Doi: 10.15651/978-88-938-5029-2.

2- Tunca O., Erdal F., Çarbaş S. and Taş S. (2016). Finite Element Analysis and Experimental Studies of Optimum Designed Angelina Steel Beam. International Energy and Engineering Conference.

3-. Erdal F., Tunca O., Taş S. and Çarbaş S. (2016). Nonlinear Finite Element Analysis of Optimally Designed Steel Angelina Beams. 18th International Conference on Civil, Structural and Earthquake Engineering, 60-64.

4- Erdal F., Tunca O. and Taş S. (2016). The Comparative Analysis of Optimal Designed Web Expanded Beams via Improved Harmony Search Method. 4th International Conference on Advances in Civil, Structural and Construction Engineering, 68-72., Doi:10.15224/978-1-63248-101-6-56.

5- Erdal F., Tunca O., Taş S. and Çarbaş S. (2016). Sinüsoidal Gövde Açıklıklı Çelik Kirişlerin Optimum Boyutlandırılması. 1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences.

6- Erdal F., Doğan E., Tunca O. and Taş S. (2015). Optimum Design of Corrugated Web Beams Using Stochastic Search Techniques. Third International Conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering- ACSEE 2015.

7- Erdal F., Tunca O. and Taş S. (2015). Nonlinear Finite Element Analysis Optimally Designed Steel Cellular Beams. International Conference on Advances in Applied and Computational Mechanics.

