

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**TRAPEZ VE DALGALI FORMDAKİ ONDÜLİN GÖVDELİ ÇELİK
KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI
ANALİZİ**

Harun TAYLAN
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**TRAPEZ VE DALGALI FORMDAKİ ONDÜLİN GÖVDELİ ÇELİK
KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI
ANALİZİ**

Harun TAYLAN
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRAPEZ VE DALGALI FORMDAKİ ONDÜLİN GÖVDELİ ÇELİK
KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI
ANALİZİ**

Harun TAYLAN
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
tarafından NAP-3668 nolu proje ile desteklenmiştir.**

TEMMUZ 2019

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TRAPEZ VE DALGALI FORMDAKİ ONDÜLİN GÖVDELİ ÇELİK
KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI
ANALİZİ

Harun TAYLAN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 01/07/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ferhat ERDAL (Danışman)



Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK



Doç. Dr. Erkan DOĞAN



ÖZET

TRAPEZ VE DALGALI FORMDAKİ ONDÜLİN GÖVDELİ ÇELİK KİRİŞLERİN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Harun TAYLAN

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Temmuz 2019; 167 sayfa

Çelik I kesitli kirişlerde gövde elemanı yüklerden dolayı oluşan basınç gerilmelerini taşıyıcı ve kiriş içindeki kesme kuvvetlerini iletir, başlıklar ise kirişe gelen dış yükleri karşılar. Malzeme tasarrufu ile yük taşıma kapasiteleri birlikte düşünüldüğü zaman bu kirişler için kalın başlıklara karşı narin gövde prensibi benimsenmiştir. Bu durumda da aşırı yüklerden dolayı ince ve düz gövdelerde oluşacak basınç gerilmeleri kiriş stabilitesinin kaybolmasına ve büyük deformasyonlara neden olur. Ondülin gövdeli kirişlerin, ince gövde kesitine sahip kıvrımlı bir levhadan oluşan ve gövdenin aynı malzeme özelliklerine sahip çelik plaka olan alt ve üst başlıklar ile birleştirilmesi şeklinde tasarımı yapılır. Ondülin gövdeli kirişler büyük deformasyonlara ve stabilite kaybına engel olurken, uygulanan yük kombinasyonları altında kirişin plastik limite ulaşmadan rijitlik kaybına uğramasına engel olur ve burkulmasını engelleyerek kesme kuvvetleri ile yerel burkulmalara karşı kirişin yük taşıma kapasitesini artırır. Kiriş gövdesinin bu kıvrımlı yapısı sayesinde kiriş öz ağırlığı azaltılmış ve yük taşıma kapasitesi de artırılmış olur. Gelişmiş ülkelerde son yıllarda etkin bir şekilde kullanılmaya başlanan bu kirişler ülkemizde yaygın olarak tercih edilen uzay kafes ve makas sistemlere alternatif olarak çatılarda, kat kirişleri olarak döşemede veya normal kuvvet etkisindeki kolon olarak etkin bir şekilde kullanılabilirler.

Ondülin gövdeli kirişler üzerine ilk çalışmalarda trapez şeklinde oluklar üzerine odaklanılmıştır. Elgaaly ve diğ. bu kirişlerin farklı yük koşulları altında kesmeden kaynaklanan (1996) ve eğilmeden kaynaklanan (1997) göçme durumlarını araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda narin gövdenin kirişin yük taşıma kapasitesine önemsiz denecek kadar az etkisinden dolayı eğilme tasarımında ihmal edilebileceğini öne sürmüşlerdir. Kesme ve eğilmeden kaynaklı göçme durumlarının, yüklerin konumu ve ondülinin trapez yapısına bağlı olduğu Johnson ve Cafolla tarafından incelenmiştir (1998). Li ve diğ. Tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ise trapez gövdeli kirişlerin düz gövdeli kirişlere oranla 1.5-2 kat daha fazla burkulma dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir (2000). Ondülin gövdeli kirişlerde ince gövde kalınlıklarında burkulma dayanımının, düz ve daha yüksek gövde kalınlığına sahip kirişlerle kıyaslanabilir oluşu ise Pasternak ve diğ. tarafından araştırılmıştır (2010). Yukarıda bahsedilen çalışmalarda kirişin gövde yapısı ile ilgili hep sabit parametreler kullanılmıştır. Bu tez kapsamında tasarım yapılırken kıvrımlı gövde yapısına ait kalınlık ve derinlik parametreleri ile başlıkların kalınlıkları maliyet açısından değerlendirilerek optimizasyon esaslarına göre tasarım değişkenleri olarak alınacaktır.

Yapılan araştırma tezi üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, Sinüzoidal ve trapeziodal gövdeli kirişlerin yeni optimizasyon yöntemleri kullanılarak ağırlığını minimize edecek şekilde optimum boyutlandırılması yapılacaktır. Yapma kiriş olan ondülin gövdeli kirişlerde gövde yüksekliği, levha kalınlığı, trapez ve dalgalı gövdelerin tepe noktaları arası mesafe ile başlık genişliği ve kalınlığı da tasarım değişkeni olarak kabul edilmiştir. Bu parametreler ile davranış ve geometrik sınırlayıcılar altında kiriş ağırlığını minimum yapacak değerler elde edilmiştir. Formülasyonu oluşturulmuş yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü yeni optimizasyon tekniklerinden birisi olan ateşböceği algoritması adaptasyonu ile elde edilmiş ve yöntemde kirişin minimum ağırlığının bulunması sürecinde sergilediği performansa bakılmıştır.

Çalışmanın ikinci ve esas aşaması olan deneysel süreçte, ilk kısımda optimizasyonu yapılan sinüsoidal gövdeli ondülin kirişler ve optimizasyonu yapılmış sinüzoidal gövde yapısının geometrik formuna en uygun şekilde tasarlanmış olan trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin yayılı ve iki noktalı yükleme altındaki dayanımları hidrolik güç üniteli basınç silindrine sahip yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir.

Tezin üçüncü ve son kısmında ise, ondülin gövdeli çelik kiriş numunelerinin gövde levhası burkulma analizleri ve taşıyabilecekleri kritik yüklerin hesabı sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her farklı gövde kalınlığına ve yüksekliğine sahip ondülin gövdeli kirişler için kaydedilen sonlu eleman analizi sonuçları deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. Ondülin gövdeli çelik kirişlerden oluşan sistemlerinin tasarımları için BS EN 1993-1-5:2006 (Annex D, Eurocode 3) ve DIN 18-800 Bölüm-1, Bölüm-2 şartnamelerinde öngörülen tasarım kıstasları esas alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ile yük altındaki göçme durumları standart I kesitli profillerden farklılıklar gösteren ve tasarımları sıradan analiz yöntemleri ile yapılamayan ondülin gövdeli kirişlerin optimum tasarımının nasıl yapılacağı ve ülkemiz yapılarında tercih nedeni olması hedeflenmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Ateşböceği algoritması, çelik yapılar, ondülin gövdeli kirişler, sonlu elemanlar yöntemi, yük taşıma kapasitesi, yapı optimizasyonu

JÜRİ: Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Doç. Dr. Erkan DOĞAN

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF LOAD-BEARING CAPACITY OF CORRUGATED STEEL WEB BEAMS IN TRAPEZOIDAL AND SINUSOIDAL FORM

Harun TAYLAN

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

July 2019; 167 pages

In steel I-Section beams, the web element carries the compressive stress caused by the loads and transmits the shear forces within the beam, while the flanges respond to the external loads to the beam. Considering material saving and load-bearing capacities together, the principle of the delicate web against thick flanges is adopted for these beams. In this case, compressive stress on thin and flat bodies due to overloads cause loss of beam stability and large deformations. The corrugated web beams can be designed to be joined with the upper and lower flanges which are made of the corrugated sheet with a thin cross-section and which are steel plate with the same material properties as the web. The corrugated web beams prevent large deformations and loss of stability; they prevent the beam from losing stiffness before it reaches the plastic limit under load combinations applied; they prevent buckling and increase the load-bearing capacity of the beam against local buckling by shear forces. This curved structure of the beam web reduces the beam's own weight and increases its load-bearing capacity. These beams, which have been used effectively in developed countries in recent years, can be used effectively in roofs as an alternative to the space frame systems and truss systems which are commonly preferred in Turkey, floor beams or as columns under normal force effect.

Initial studies on corrugated web beams focused on trapezoidal troughs. Elgaaly et al. investigated the collapse failure conditions of these beams caused by shear (1996) and bending (1997) under different load conditions. As a result of these studies, they suggested that the slender web can be neglected in bending design due to the insignificant effect on the load-bearing capacity of the beam. It was investigated by Johnson and Cafolla that collapse conditions due to shear and bending depend on the position of the loads and the trapezoidal structure of the corrugation (1998). In the experimental studies performed by Li et al., the trapezoidal web beams have been found to have 1.5-2 times more buckling resistance compared to flat web beams (2000). The fact that buckling strength in thin web thicknesses of corrugated web beams is comparable to beams with flat and higher web thickness was investigated by Pasternak et al. (2010). In the studies mentioned above, always the constant parameters related to the web structure of the beam have been used. During the design within this project, thickness and depth parameters of corrugated web structure and flange thicknesses will be evaluated in terms of cost and taken as design variables according to optimization principles.

The proposed research thesis is planned to consist of three parts. In the first part, the optimum dimensioning of the sinusoidal and trapezoidal beams will be made by using new optimization methods such as to minimize its weight. Web height, plate thickness, the distance between the peaks of trapezoidal and sinusoidal webs, flange width and thickness in construction beams with corrugated web beams were also accepted as design variables. With these parameters, values that will minimize the beam weight under the behavior and geometric limiters will be obtained. The solution of formulated structural optimization problems will be obtained by adaptation of firefly algorithm, which is one of the new optimization techniques, and the performance of the method in finding the minimum weight of the beam will be examined.

In the experimental process which is the second and main phase of the study, in the first section, spread and two-point loading strengths of the optimized corrugated web beams with sinusoidal web and optimized corrugated web beams with trapezoidal web designed in the best way to the geometric form of the sinusoidal web structure will be tested by using a load frame with pressure cylinders having hydraulic power unit.

In the third and final part of the thesis, web plate buckling analysis of corrugated steel web beam samples and calculation of critical loads they can bear will be carried out by using finite element program and finite element analysis results recorded for each different web thickness and length will be compared with the data obtained from the experimental study. The corrugated web beams will be designed considering the design criteria specified in BS EN 1993-1-5: 2006 (Annex D, Eurocode 3) and DIN 18-800 Part-1, Part-2 specifications. With the results obtained, it is aimed to determine how to make the optimum design of corrugated web beams for which collapse situations under load differentiates from standard I-section profiles and whose designs cannot be made by ordinary analysis methods; also it is aimed to ensure that it is preferred in buildings in Turkey.

KEYWORDS: Firefly algorithm, steel structures, corrugated web beams, finite element method, load bearing capacity, structure optimization

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK

Assoc. Prof. Dr. Erkan DOĞAN

ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında, literatürde ayrı ayrı bahsedilen ondülin gövdeli kirişler trapeziodal ve Sinüzoidal formda soğuk şekillendirilerek elde edilmiş ve karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. Toplam 24 adet ondülin gövdeli çelik kiriş modelinin yük altındaki davranışları ve taşıma kapasiteleri incelenmiş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Çalışmanın deneysel sürecinde, Akdeniz üniversitesi yapı laboratuvarı ve Karamanoğlu Mehmetbey üniversitesi yapı laboratuvarı kullanılmış, optimizasyonu yapılan ondülin gövdeli kirişlerin yük altındaki dayanımları yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir. NAP-3668 kodlu bilimsel araştırma projesi ile ondülin gövdeli kirişlerin en ekonomik olarak tasarlanması, bu kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve bunun sonucu olarak da ülkemizdeki çeşitli mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarının yaygınlaşmasının sağlanması amaçlanmıştır.

Her iki kiriş tipi için de ABAQUS yazılımında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizleri yapılmış ve deneysel sonuçlar ile doğrulukları belirlenmiştir.

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

Tez kapsamında desteğini esirgemeyen ve her türlü fedakarlıkta bulunan değerli dostum Arş. Gör. Hüseyin Söğüt'e tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez kapsamında yardımlarını esirgemeyen değerli dostlarım Durmuş Şener ve Mücahit Çam'a teşekkür ederim.

Tez kapsamında vermiş oldukları önerilerden dolayı Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK ve Doç. Dr. Sedar ÇARBAŞ'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda verdiği destekten dolayı Arş. Gör. Osman TUNCA'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hiçbir konuda benden desteklerini esirgemeyen, sevgili annem Sevim TAYLAN'a ve babam Hasan TAYLAN'a koşulsuz sevgileri, bugünlere gelmemdeki çok büyük emekleri ve her daim yanımda oldukları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez kapsamında yaptığım çalışmalar sürecinde ağabeyim Ömür TAYLAN'a iş hayatındaki yardımları ve birçok işi üstlenerek bana verdiği destekler için çok teşekkür ederim.

Sevgili eşim Demet AYDIN'a her türlü desteğinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ.....	v
AKADEMİK BEYAN.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xxii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI	2
2.1. Literatür Araştırması.....	2
2.1.1. Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişler.....	2
2.1.2. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişler.....	18
2.2. Sinüzoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Avantajları	26
2.3. Trapeziodal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Avantajları	27
2.4. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Avantajları ve Standart Bir Profil Kesit ile Kıyaslanması.....	27
2.4.1. Ondülin gövdeli kirişlerin avantajları	27
2.4.2. Ondülin gövdeli kirişlerin standart bir IPE profili ile kıyaslanması	29
2.4.3. Ondülin gövdeli kirişlerde gövde yapının kapasiteye etkisinin çelik şartnamesine göre kıyaslanması.....	30
2.5. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Kullanım Alanları	31
2.6. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Göçme Durumları	32
2.6.1. Yanal burkulma.....	32
2.6.2. Yerel burkulma	32
2.6.3. Basit eğilme durumu	33
3. MATERYAL VE METOT	34
3.1. Kirişlerin Optimizasyonunda Kullanılan Yöntemler	34
3.1.1. Av arama yöntemi.....	35
3.1.2. Ateş böceği algoritması.....	37
3.2. Kirişlerin Optimizasyon Probleminin Matematiksel Modeli	39
3.2.1. Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin optimum dizaynı.....	39
3.2.2. Trapezoidal gövdeli ondülin kirişlerin optimum dizaynı.....	40
3.3. Hesap Yöntemleri	41
3.4. Davranış Sınırlayıcıları	42

3.4.1 Sinüzoidal gövde için hesap adımları	42
3.4.1 Trapeziodal gövde için hesap adımları	44
3.5. Tasarım Örneği	47
3.6. Kirişlerin Deney Öncesi Hazırlıkları	52
3.6.1. Ondülin gövdeli kirişleri elde edilmesi	52
3.6.2. Kirişlerin test edilmesi	54
3.7. Kirişlerin Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi.....	57
3.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi.....	60
3.8.1. Abaqus/cae 6.14-1 sonlu eleman programında eleman tipleri	60
3.8.2. Ağ tipinin ve eleman tipinin belirlenmesi	61
3.8.3. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi.....	66
3.8.4. Sınır şartları (mesnetler ve yükler).....	67
4. BULGULAR.....	69
4.1. Sinüzoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Testleri (yayılı yükleme)	69
4.1.1. SGOK_500 Test 1.....	70
4.1.2. SGOK_500 Test_2.....	72
4.1.3. SGOK_415 Test 1.....	74
4.1.4. SGOK_415 Test 2.....	76
4.1.5. SGOK_330 Test 1.....	78
4.1.6. SGOK_330 Test 2.....	80
4.2. Sinüzoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Testleri (iki noktalı yükleme)	81
4.2.1. SGOK_500 Test 1.....	83
4.2.2. SGOK_500 Test 2.....	85
4.2.3. SGOK_415 Test 1.....	87
4.2.4. SGOK_415 Test 2.....	89
4.2.5. SGOK_330 Test 1.....	91
4.2.6. SGOK_330 Test 2.....	93
4.3. Ondülin Gövdeli Trapezoidal Kirişlerin Testleri (yayılı yükleme).....	94
4.3.1. TGOK_500 Test 1.....	96
4.3.2. TGOK_500 Test 2.....	98
4.3.3. TGOK_415 Test 1.....	100
4.3.4. TGOK_415 Test 2.....	102
4.3.5. TGOK_330 Test 1.....	104
4.3.6. TGOK_330 Test 2.....	106
4.4. Trapezoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Testleri (iki noktalı yükleme)	107
4.4.1. TGOK_500 Test 1.....	109

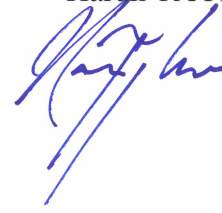
4.4.2. TGOK_500 Test 2.....	111
4.4.3. TGOK_415 Test 1.....	113
4.4.4. TGOK_415 Test 2.....	115
4.4.5. TGOK_330 Test 1.....	117
4.4.6. TGOK_330 Test 2.....	119
4.5. IPE 300 Profilinin İki Noktalı Yükleme Altında Test Edilmesi	120
4.6. OGK_500 Yayılı Yükleme Karşılaştırılması	122
4.7. OGK_500 İki Noktalı Yükleme Karşılaştırılması.....	124
4.8. OGK_415 Yayılı Yükleme Karşılaştırılması	126
4.9. OGK_415 İki Noktalı Yükleme Karşılaştırılması.....	127
4.10. OGK_330 Yayılı Yükleme Karşılaştırılması	129
4.11. OGK_330 İki Noktalı Yükleme Karşılaştırılması.....	130
4.12. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi.....	134
4.12.1. SOGK_500 SEA	134
4.12.1.1. SGOK_500 yayılı yükleme SEA	134
4.12.1.2. SGOK_500 iki noktalı yükleme SEA	137
4.12.2. TOGK_500 SEA	140
4.12.2.1. TGOK_500 yayılı yükleme SEA	140
4.12.2.2. TGOK_500 iki noktalı yükleme SEA.....	143
4.12.3. SOGK_415 SEA	145
4.12.3.1. SGOK_415 yayılı yükleme SEA	145
4.12.3.2. SGOK_415 iki noktalı yükleme SEA	145
4.12.4. TOGK_415 SEA	148
4.12.4.1. TGOK_415 yayılı yükleme SEA	148
4.12.4.2. TGOK_415 iki noktalı yükleme SEA.....	149
4.12.5. SOGK_330 SEA	152
4.12.5.1. SGOK_330 yayılı yükleme SEA	152
4.12.5.2. SGOK_330 iki noktalı yükleme SEA	154
4.12.5. TOGK_330 SEA	155
4.12.5.1. TGOK_330 yayılı yükleme SEA	155
4.12.5.1. TGOK_330 iki noktalı yükleme SEA.....	157
5. TARTIŞMA.....	160
6. SONUÇLAR.....	161
7. KAYNAKLAR	162
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Trapez ve Dalgalı Formdaki Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırmalı Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

01 / 07 / 2019

Harun TAYLAN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Alan
I	: Atalet Momenti
σ	: Gerilme
σ_y	: Akma Gerilmesi
E	: Elastisite Modülü
P_y	: Akma Kapasitesi
A_G	: Başlıkların bir tanesinin kesit alanı
D_x, D_y	: Kiriş gövde plakalarının rijitlikleri
I_i	: Çelik kesit satır numarası
K_B	: Kiriş gövde burkulma katsayısı
$L_{düz}$	: Dalgalı levhanın düzleştirilmiş boyu
M_{RD}	: Kiriş tasarım moment direnci
$M_{pl,Rd}$	: Plastik nötr eken çelik kirişin üst başlığında ise moment değeri
N_{NORMAL}	: Başlıklardaki normal kuvvet
N_{T-MAKS}	: Başlıklarda oluşan maksimum normal kuvvet
V_D	: Dalgalı gövdede yük altında oluşacak kesme kuvveti
V_{RD}	: Dalgalı gövdenin kesme yükü taşıma kapasitesi
$V_{TK-MAKS}$	: Dalgalı gövdenin enine yük taşıma kapasitesi
a_g^t	: Ateşböceğinin global optimum konumu
a_i^t	: t numaralı iterasyon adımına kadar elde edilen en iyi konum
b_c	: Etkin döşeme genişliği
b_f	: Kiriş başlık genişliği
d_1	: Çelik kirişin merkezi ile üst yüzeyi arasındaki mesafe

f_u	: Maksimum çelik çekme gerilmesi
f_y	: Çelik akma gerilmesi
k_c	: Basınç kuvvet faktörü
l_o	: Kiriş açıklığı
t_f	: Kiriş başlık kalınlığı
t_w	: Kiriş gövde kalınlığı
y_c	: Çelik kirişin basınç bölgesinin merkezi ile üst yüzeyi arası mesafe
y_t	: Çelik kirişin basınç bölgesinin merkezi ile alt yüzeyi arası mesafe
γ_a	: Çelik için malzeme kısmi faktörü
λ_{GN}	: Kirişin dalgalı gövdesi için narinlik parametresi
ρ_s	: Çeliğin yoğunluğu
σ_{ALLOW}	: Başlıklarda izin verilen çekme gerilmesi
σ_{EL}	: Elastik sınır gerilme
τ_{EG}	: Kiriş gövdesinin enine burkulma katsayısı
h	: Dalgalı kirişin gövde yüksekliği
A	: Başlıkların kesit alanı
E	: Elastisite modülü
$HGCR$	: Avcı grubu değerlendirme oranı
HGS	: Avgrubu boyutu
I	: Işık yoğunluğu
L	: Kiriş açıklığı
MML	: Lidere doğru maksimum hareket
$f(x_i)$	: Amaç fonksiyonu
$g(x_i)$	: Tasarım sınırlayıcısı
m	: Tasarım sınırlayıcılarının toplamı
n	: Tasarım değişkenleri sayısı

r : 0-1 arasında rasgele seçilen sayı
 s : Gövdeyi oluşturan Sinüzoidal bir dalganın boyu
 w : Gövdede dalga boyları arasındaki mesafe
 z : Başlıkların ağırlık merkezleri arasındaki mesafe
 α : [0,1] Arasında değişen rasgele bir sayı (ABA)
 α ve β : Yakınsama oranı oranı parametreleri (AAA)
 β : Çekicilik (ABA)
 γ : Işık emme katsayısı (ABA)
 ε : Ateşböceğinin yeni konumunun belirlenmesinde ağırlığını ifade eden rasgele bir sayı

Kullanılan ondalık işareti nokta (.) olarak seçilmiştir.

Kısaltmalar

OGK : Ondülin Gövdeli Kiriş
SGOK : Sinüzoidal Gövdeli Ondülin Kiriş
TGOK : Trapezoidal Gövdeli Ondülin Kiriş
SEA : Sonlu Elemanlar Analizi
AAA : Av Arama Algoritması (Hunting Search Algorithm: HSA)
ABA : Ateş böceği algoritması (Fire fly algorithm: FFO)
LVDT : Linear variable differential transformer (Lineer Deplasman Ölçer)
EC : Eurocode
TS : Türk standardı
LTB : Lateral Torsional Buckling (Yanal Burkulma Durumu)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. (a) Kısa köşebent bağlantı detayı ile oluşturulmuş ondülin gövdeli çok-gövdeli kiriş; (b) Devamlı köşebent bağlantı detayı ile oluşturulmuş ondülin gövdeli çok-gövdeli kiriş; (c) Şekil 2.4 a ve b şekillerinde gösterilen kirişlerin deney sonuçları	2
Şekil 2.2. Khalid vd. (2004) dikey ve yatay oluklu Sinüzoidal gövdeli kirişler.....	3
Şekil 2.3. Kıymaz vd. (2007) gövde dikdörtgen boşluklu SGOK'in SE modeli	4
Şekil 2.4. Kıymaz vd. (2010) gövde dairesel boşluklu SGOK'in SE modeli.....	5
Şekil 2.5. Pasternak ve Kubjenec (2010) SGOK kaynak simülasyonu	5
Şekil 2.6. (a) Pimenta vd. (2012) birleşim detayı yükleme sonrası deformasyon sonucu; (b) Birleşim detayında başlıkta ve gövdede oluşan deformasyonun ölçülmesi ..	6
Şekil 2.7. (a) Sinüzoidal gövde yapısına sahip kirişte yerel burkulma; (b) Sinüzoidal gövdeli kirişte global burkulma; (c) Petek kabartmalı gövdeli kirişte deney öncesi sistem durumu; (d) Petek kabartmalı gövdeli kirişte kesme yüklemesi altında deney sonrası gövdede global burkulma deformasyon durumu	7
Şekil 2.8. (a) Deney kurulumu; (b) Bitiş mafsallı ve gövde ile bağlantısının gösterilmesi	8
Şekil 2.9. Test edilen kirişlerin sonlu elemanlar modelleri (ANSYS).....	8
Şekil 2.10. Test düzeneğinin deney öncesi genel görünüşü.....	9
Şekil 2.11. Tipik SEA modelleri ve gövde-başlık bağlantı detayları	10
Şekil 2.13. (a) Pimenta vd. (2015) Yanal burkulma burkulmasına maruz kalan sinüzoidal ağ kirişi deney sonrası yanal deplasman durum; (b) Sinüzoidal gövdeli kirişin SEA sonucunda deforme durumu	11

Şekil 2.15. (a) Deney öncesi sistem kurulumun gösterimi; (b) Bağlantı detayında deney sonrası deformasyon durumu.....	13
Şekil 2.16. Guo vd. (2016) kemer test düzeneği.....	14
Şekil 2.17. (a) Bir uç yükü altında sinüzoidal gövdeli bir konsol I-kirişinin şematik gösterimi; (b) Birleştirilmiş ahşap kompozit I-kirişler, sinüzoidal gövdeli.....	15
Şekil 2.18. (a) Yayılı yük altında trapeziodal gövdeli kirişin burkulma davranışının sonlu eleman modeli ile gösterimi; (b) Yayılı yük altında sinüsoidal gövdeli kirişin burkulma davranışının sonlu eleman modeli ile gösterimi	16
Şekil 2.19. (a) Bir uç yükü altında sinüzoidal gövdeli bir konsol I-kirişinin şematik gösterimi; (b) Birleştirilmiş ahşap kompozit I-kirişler, sinüzoidal gövdeli.....	17
Şekil 2.20. (a) Test düzeneği; (b) Gövde üzerinde gerginlik göstergesi rozet düzenlemesi.....	18
Şekil 2.21. Sherman and Fisher (1971) test düzeneği.....	18
Şekil 2.22. Basit mesnetli yarı simetrik kirişin şekilsel gösterimi.....	20
Şekil 2.23. (a) Göçme öncesi kaynakta oluşan çatlaklar; (b) Göçme sonrası çatlak oluşumu.....	21
Şekil 2.24. Anami ve Sause (2005) trapeziodal gövdeli kirişlerde gövde-başlık birleşiminin SE modeli.....	21
Şekil 2.25. Deformasyona uğramış kiriş test numunesi.....	22
Şekil 2.26. (a) Uzatılmamış kiriş-kolon bağlantı plakasında deneysel deformasyon sonucu; (b) Uzatılmış kiriş-kolon bağlantı plakasında deneysel deformasyon sonucu ..	23
Şekil 2.27. Test kurulumu.....	23
Şekil 2.28. Sinüzoidal çelik ondülin gövdeli kirişlerin ölçülendirilmesi.....	26
Şekil 2.29. Trapeziodal ondülin gövdeli kirişlerin gösterimi	27

Şekil 2.30. Sinüzoidal ve Trapezoidal gövdeli çelik kirişler	28
Şekil 2.31. (a) Uygulanmış bir SGOK örneği; (b) Uygulanmış bir TGOK örneği	28
Şekil 2.32. Kiriş gövdelerinin kalıplar ile soğuk şekillendirilmesi ve başlıklar ile birleştirilmesi (NAP-3668 deneysel elemanların fabrikasyon aşamaları)	29
Şekil 2.33. a) Multi-Story Car Park, Parkhaus Wien Flughafen Airport Vienna, 2005; b) Tesco Supermarket, Bydgoszcz, Poland, 2001; c) Assembling Hangar SEW Eurodrive, Richard-Strauss-Strabe, Wien, 1999; d) Warehouses for theatre sceneries, A-2286 Haringsee, 2004	31
Şekil 2.34. İkincil eğilme (SGOK_330 İki Noktalı Yükleme Deney Fotoğrafi 2019)...	32
Şekil 2.35. Gövdede burkulma (SGOK_415 Yayılı Yükleme Deney Fotoğrafi 2019) ..	33
Şekil 2.36. Basit eğilme (SGOK_330 İki Noktalı Yükleme Deney Fotoğrafi 2019).....	33
Şekil 3.1. Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin ölçülendirilmesi	39
Şekil 3.2. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin ölçülendirilmesi.....	40
Şekil 3.3. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin ölçülendirilmesi.....	44
Şekil 3.4. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişte başlıkta oluşan kayma akış kuvvetlerinin gösterimi.....	45
Şekil 3.5. 5 metre Açıklıklı Çelik Ondülin Gövdeli Olarak Düşünülen Kiriş	47
Şekil 3.6. OGK_330 kirişi için tasarım geçmişi grafiği.....	48
Şekil 3.7. OGK_330 kesit gösterimi	49
Şekil 3.8. Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş 330 (SGOK_330) boykesit detayı	49
Şekil 3.9. Sinüzoidal gövde ile trapeziodal gövde geometrisinin üst üste oturtulması ..	50
Şekil 3.10. Trapeziodal gövdeli ondülin kiriş 330 (TGOK_330) boykesit detayı.....	50
Şekil 3.11. Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş 500 (SGOK_500) gösterimi	51
Şekil 3.12. Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş 415 (SGOK_415) gösterimi	51

Şekil 3.13. Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş 330 (SGOK_330) gösterimi	51
Şekil 3.14. Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş 500 (TGOK_500) gösterimi	51
Şekil 3.15. Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş 415 (TGOK_415) gösterimi	52
Şekil 3.16. Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş 415 (TGOK_415) gösterimi	52
Şekil 3.18. a) Gövdelerin levhalarının bükülmesi; b) Bükümden sonra kaynaklanmaya hazır gövde levhaları; c) Gövde levhalarının ve başlıkların birleştirilmesi; d) Gövde levhası ile başlıkların kaynaklanması; e) Kaynakları tamamlanmış bir SGOK; f) Kumlama ve boya işleminden sonra teste hazır SGOK.....	53
Şekil 3.19. a) Yük hücresi; b) Sabit mesnet sistemi; c) Hareketli mesnet sistemi	55
Şekil 3.20. Loadcell (Yük Hücresi) ve LVDT (Deplasman ölçer) konumları ile numaraları	55
Şekil 3.21. Yayılı yükleme test düzeneği.....	56
Şekil 3.22. İki noktalı yükleme test düzeneği	56
Şekil 3.23. (a) Tekil yükleme test düzeneği sağ taraftan görünüş; (b) Tekil yükleme test düzeneği sol taraftan görünüş	57
Şekil 3.24. Farklı kalınlıktaki her levhadan alınan numunelerin boyutları	57
Şekil 3.25. Ondülin gövdeli kirişlerden alınan numune örnekleri	58
Şekil 3.26. Karamanoğlu Mehmetbey üniversitesi çekme test cihazı	58
Şekil 3.27. Çekme testi uygulanmış kuponlar numuneleri	58
Şekil 3.28. (a) 2 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; (b) 2.5 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; (c) 3 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; (d) 8 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; (e) 10 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; (f) 12 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	59

Şekil 3.29. (a) SGOK_500 elemanının katı modelinin oluşturulması; (b) SGOK_500 elemanının gövde gövdesinin parçalara ayrıldığıının gösterimi	62
Şekil 3.30. (a) C3D8I eleman tipinde Hex mesh yapılmış gövde levhası; (b) C3D8I eleman tipinde Hex mesh yapılmış başlık.....	63
Şekil 3.31. (a) C3D10 eleman tipinde Tetrahedron mesh yapılmış gövde levhası; (b) C3D10 eleman tipinde Tetrahedron mesh yapılmış başlık	63
Şekil 3.32. C3D10 eleman tipinde Tetrahedron mesh SEA deformasyon sonucu	64
Şekil 3.33. C3D8I eleman tipinde Hex-Dominant mesh SEA deformasyon sonucu.....	64
Şekil 3.34. C3D8I eleman tipinde Hex-Dominant mesh SEA deformasyon sonucu (ikinci mertebe etkisi kapalı).....	65
Şekil 3.35. C3D8I eleman tipinde Sweep mesh SEA deformasyon sonucu.....	65
Şekil 3.36. Eleman ve Mesh Tiplerinin Karşılaştırılması	66
Şekil 3.37. (a) Malzeme yoğunluğunun girilmesi; (b) Elastisite modülü ve Possion oranının girilmesi; (c) Akma mukavemeti-Platik birim şekil değiştirme	67
Şekil 3.38. (a) SGOK_500 yayılı yükleme durumu; (b) SGOK_500 iki noktalı yükleme durumu.....	68
Şekil 3.39. SGOK_500 Mesnet tanımlamalar	68
Şekil 4.1. Sinusoidal gövdeli ondülin kiriş testi; yayılı yükleme durumu	69
Şekil 4.2. SGOK_500 Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları	70
Şekil 4.3. SGOK_500_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	71
Şekil 4.4. SGOK_500 Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumları	72
Şekil 4.5. SGOK_500_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	73
Şekil 4.6. SGOK_415 Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları	74
Şekil 4.7. SGOK_415_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	75

Şekil 4.9. SGOK_415_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	77
Şekil 4.10. SGOK_330_Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları	78
Şekil 4.11. SGOK_330_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	79
Şekil 4.12. SGOK_330_Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumları	80
Şekil 4.13. SGOK_330_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	81
Şekil 4.14. Sinusoidal gövdeli ondülin giriş testi; yayılı yükleme durumu	82
Şekil 4.15. SGOK_500_Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları	83
Şekil 4.16. SGOK_500_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	84
Şekil 4.17. SGOK_500_Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları	85
Şekil 4.18. SGOK_500_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği	86
Şekil 4.20. SGOK_415_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği	88
Şekil 4.21. SGOK_415_Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları	89
Şekil 4.22. SGOK_415_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği	90
Şekil 4.23. SGOK_330_Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları	91
Şekil 4.24. SGOK_330_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği	92
Şekil 4.25. SGOK_330_Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları	93
Şekil 4.26. SGOK_330_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği	94
Şekil 4.27. Trapezoidal gövdeli ondülin giriş testi; yayılı yükleme durumu	95
Şekil 4.29. TGOK_500_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	97
Şekil 4.31. TGOK_500_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	99
Şekil 4.33. TGOK_415_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	101
Şekil 4.35. TGOK_415_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	103
Şekil 4.37. TGOK_330_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	105
Şekil 4.39. TGOK_330_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği	107

Şekil 4.40.	Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş testi; yayılı yükleme durumu.....	108
Şekil 4.41.	TGOK_500 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları.....	109
Şekil 4.42.	TGOK_500_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği ..	110
Şekil 4.43.	TGOK_500 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları.....	111
Şekil 4.44.	TGOK_500_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği ..	112
Şekil 4.45.	TGOK_415 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları.....	113
Şekil 4.46.	TGOK_415_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği ..	114
Şekil 4.47.	TGOK_415 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları.....	115
Şekil 4.48.	TGOK_415_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği ..	116
Şekil 4.49.	TGOK_330 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları.....	117
Şekil 4.50.	TGOK_330_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği ..	118
Şekil 4.51.	TGOK_330 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları.....	119
Şekil 4.52.	TGOK_330_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği ..	120
Şekil 4.55.	IPE 300; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği	122
Şekil 4.56.	OGK_500 yayılı yükleme altında yük-deplasman grafikleri.....	123
Şekil 4.57.	OGK_500 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri	125
Şekil 4.58.	OGK_415 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri	126
Şekil 4.59.	OGK_415 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri	128
Şekil 4.60.	OGK_330 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri	130
Şekil 4.61.	OGK_330 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri	131
Şekil 4.62.	SOGK_500 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma.....	135
Şekil 4.63.	SGOK_500 Yayılı yükleme altında deformasyon sonucu.....	135
Şekil 4.64.	SGOK_500 Yayılı yükleme altında gövde ve başlıkta SEA deformasyon sonucu	136

Şekil 4.66. SGOK_500 Yayılı yükleme altında genel deformasyon sonucu.....	136
Şekil 4.67. SOGK_500 İki Noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma	137
Şekil 4.68. SGOK_500 İki noktalı yükleme altında deformasyon sonucu (ön taraf)...	138
Şekil 4.69. SGOK_500 İki noktalı yükleme altında deformasyon sonucu (ön taraf)...	138
Şekil 4.70. SGOK_500 İki noktalı yükleme altında deformasyon sonucu (arka taraf)	139
Şekil 4.71. (a) SGOK_500 iki noktalı yükleme altında gövdedeki deformasyonun ön taraftan fotoğrafı; (b) SGOK_500 iki noktalı yükleme altında gövdedeki deformasyonun arka taraftan fotoğrafı.....	139
Şekil 4.72. TOGK_500_Test_1 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma....	140
Şekil 4.73. TOGK_500_Test_2 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma....	141
Şekil 4.74. TGOK_500 Yayılı yükleme basit eğilme durumu SEA deformasyon sonucu	141
Şekil 4.75. TGOK_500 Yayılı yükleme altında ara eleman ile yüklemenin uygulandığı bölgenin altındaki yük dağılımı ve SEA deformasyon sonucu.....	142
Şekil 4.76. TGOK_500 Yayılı yükleme başlıkta ve gövdede yerel burkulma SEA deformasyon sonucu.....	142
Şekil 4.77. TGOK_500 Yayılı yükleme başlıkta ve gövdede SEA deformasyonu	143
Şekil 4.78. TOGK_500 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma	144
Şekil 4.79. SOGK_415 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma.....	145
Şekil 4.80. SOGK_415 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma	147
Şekil 4.81. SOGK_415 İki noktalı yükleme altında SEA deformasyon sonucu	147
Şekil 4.82. SOGK_415 İki noktalı yükleme altında SEA deformasyon sonucu	148
Şekil 4.83. TOGK_415 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma.....	149
Şekil 4.84. TOGK_415 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma	150

Şekil 4.85. TOGK_415 İki noktalı yükleme basit eğilme deformasyon durumu	150
Şekil 4.86. TOGK_415 İki noktalı yükleme deformasyon durumu.....	151
Şekil 4.87. TOGK_415 İki noktalı yükleme deformasyon durumu.....	151
Şekil 4.88. TOGK_415 İki noktalı yükleme deformasyon durumu.....	152
Şekil 4.89. SOGK_330 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma.....	153
Şekil 4.90. SOGK_330 Yayılı yükleme deformasyon durumu	153
Şekil 4.91. SOGK_330 Yayılı yükleme deformasyon durumu	154
Şekil 4.92. SOGK_330 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma	155
Şekil 4.93. TOGK_330 Yayılı yükleme altında Deney-SEA karşılaştırma	156
Şekil 4.94. TOGK_330 Yayılı yükleme deformasyon durumu	156
Şekil 4.95. TOGK_330 Yayılı yükleme deformasyon durumu	157
Şekil 4.96. TOGK_330 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA karşılaştırma	158

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. IPE 300, SGOK_415 ve SGOK_330 profillerinin deneysel karşılaştırma sonuçları (NAP-3668 deneysel elemanlarından alınan sonuçlar)	30
Çizelge 3.1. Optimizasyon Tekniklerinin Parametreleri.....	48
Çizelge 3.2. 5-metre Açıklıklı Ondülin Gövdeli Kirişin Optimum Boyutları	48
Çizelge 3.3. Kirişlerin adlandırılması ve uygulanan yükleme tipleri	54
Çizelge 3.4. Levhaların mukavemet özellikleri	60
Çizelge 3.5. Eleman ile mesh tiplerine karşılık gelen düğüm ve eleman sayıları	62
Çizelge 3.6. Levhaların mukavemet özellikleri	67
Çizelge 4.1. SGOK (Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş) test sayıları	69
Çizelge 4.2. SGOK (Ondülin gövdeli Sinüzoidal kiriş) test sayıları	81
Çizelge 4.3. TGOK (Trapezoidal Gövdeli Ondülin Kiriş) test sayıları	94
Çizelge 4.4. TGOK (Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş) test sayıları.....	107
Çizelge 4.6. OGK_500 kirişlerin yayılı yükleme altında test sonuçları	124
Çizelge 4.7. OGK_500 kirişlerin iki noktalı yükleme altında test sonuçları	125
Çizelge 4.8. OGK_415 Kirişlerin test sonuçları	127
Çizelge 4.9. OGK_415 Kirişlerin test sonuçları	128
Çizelge 4.10. OGK_330 Kirişlerin test sonuçları	130
Çizelge 4.11. OGK_330 Kirişlerin test sonuçları	132
Çizelge 4.12. Tüm kirişleri test sonuçları genel özeti.....	133
Çizelge 4.13. Ondülin gövdeli kirişler için karşılaştırmalı kıyaslama tablosu	134
Çizelge 4.14. Sonlu elemanlar analiz sonuçları ve deneysel sonuçların genel özeti	159

1. GİRİŞ

Çelik taşıyıcı sistemlerin betonarme yapılara kıyasla belirli üstün nitelikleri bulunmaktadır. Yüksek mukavemete sahip olmaları ve tasarımlarının hafifliği sebebiyle deprem yüklerinden asgari düzeyde etkilenmeleri bu niteliklerin önde gelen sebeplerindendir. Çeliğin malzeme özelliği olarak çekme ve basınç dayanımlarının birbirine eşit olması, çekme mukavemeti düşük yapı malzemeleriyle yapılması mümkün olmayan sistemlere yapılabilirlik kazandırması açısından iyi bir çözüm yolu olarak düşünülebilir. Çelik taşıyıcı sistemden oluşan yapılar, mühendislik uygulamaları açısından gelişmiş ülkelerin yapı sektöründe oldukça fazla yer bulmalarına karşın ülkemizde yüksek maliyetlerden dolayı betonarme yapı sisteminden oluşan yapılara oranla çok daha az sayıda uygulanmaktadır. Çelik yapıların daha ekonomik olarak boyutlandırılıp uygulanabilmesi, sismik performansları oldukça fazla olan bu yapıların ülkemiz aktif deprem riski taşıyan bölgelerde yaygınlaşmasına katkı sağlayacak ve deprem sonucu oluşacak hasarlar minimum seviyede tutulacaktır.

Betonarme yapı malzemeleri kullanılarak geçilen açıklıklara kıyasla ondülin gövdeli kirişler kullanıldığında daha geniş açıklıklar daha hafif ve daha narin kesitler ile geçilebilmektedir. Ondülin gövdeli çelik kirişler bu sistemlere örnek olarak gösterilebilirler. Gelişmiş tasarımları sayesinde ince cidarlı gövdelerine rağmen genel ve yerel burkulma için diğer kirişlere oranla daha fazla direnç sağlamaktadır. Trapezoidal ve sinüzoidal formlu gövdeleri ile yatay güçlendiricilere gerek kalmadan daha ince bir gövde kalınlığı kullanılabilmektedir. Aynı zamanda yük altında yerel burkulmaları azaltan ondülin gövdeli kirişlerin asıl amaçları şunlardır;

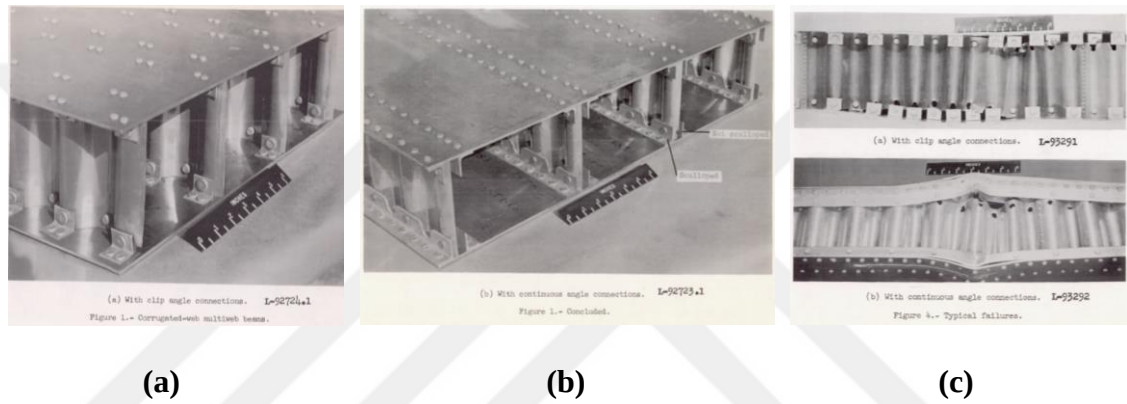
1. Ondülin gövdeli kirişlerin uluslararası şartnamelerce belirlenmiş sınırlayıcılar altında optimum boyutlandırılmasını yapacak algoritmaların geliştirilmesi, bu bağlamda yapıya uyarlamaları yeni yapılacak olan stokastik optimizasyon yöntemlerinden ateşböceği algoritması arama tekniğinin ondülin gövdeli çelik kirişlerin optimum tasarımında kullanımının araştırılması ve yöntemlerin performanslarının kıyaslanması,
2. Araştırmanın büyük bir kısmını alacak olan deneysel süreçte; ilk kısımda stokastik yöntemler yardımıyla optimizasyonu yapılan trapez ve dalgalı formdaki ondülin gövdeli çelik kirişlerin eleman bazında taşıma gücü kapasitelerinin deneysel olarak belirlenmesi,
3. Kiriş numunelerinin gövde levhası burkulma analizleri ile taşıyabilecekleri kritik yüklerin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanması ve sonuçların deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile karşılaştırmalı analizlerinin yapılması,
4. Yapısal optimizasyon tekniklerinin trapezoidal ve sinüzoidal gövdeli kirişlerin tasarımında kullanılmasının sağlayacağı tasarrufun belirlenmesi,
5. Hafif çelik yapılar hakkında ülkemizde yaşanan standart sıkıntısına tasarım boyutunda alternatif bir öneri getirilmesi,
6. Elde edilen sonuçlar ışığında önerilen optimum boyutlandırılması yapılan ondülin gövdeli kirişlerin pratik uygulamalarda kullanılabilirliğinin incelenmesi

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Literatür Araştırması

2.1.1. Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişler

Bir ondülin gövdeli kiriş (OGK) tipi olarak kullanılan Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş (SGOK) soğuk şekillendirme yapılarak bükülen ince gövde levhasına sahip bir kiriş tipidir. İlk olarak 1956 yılında NACA (ABD ulusal havacılık Danışma Komitesi) tarafından yayınlanmıştır. Yapılan bu çalışmada Fraser (1956) gövde-başlık bağlantıları 2 farklı tip olacak ve 3 hücreli 9 adet alüminyum malzemeden kiriş imal edilmiştir (Şekil 2.1). Deney sonucunda Sinüzoidal gövdeli kirişlerin kanal gövdeli kirişlerden (channel-web beam) daha iyi bir yapısal verimlilikte olduğunu göstermektedir.



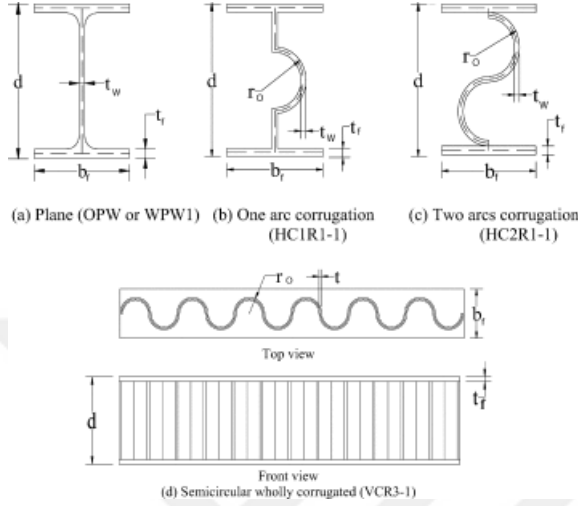
Şekil 2.1. (a) Kısa köşebent bağlantı detayı ile oluşturulmuş ondülin gövdeli çok-gövdeli kiriş; **(b)** Devamlı köşebent bağlantı detayı ile oluşturulmuş ondülin gövdeli çok-gövdeli kiriş; **(c)** Şekil 2.4 a ve b şekillerinde gösterilen kirişlerin deney sonuçları

Ondülin gövdeli kirişler üzerine ilk çalışmalarda trapez şeklinde oluklar üzerine odaklanılmıştır. Elgaaly ve diğ. bu kirişlerin farklı yük koşulları altında kesmeden kaynaklanan (1996) ve eğilmeden kaynaklanan (1997) göçme durumlarını araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda narin gövdenin kirişin yük taşıma kapasitesine önemsiz denecek kadar az etkisinden dolayı eğilme tasarımında ihmal edilebileceğini öne sürmüşlerdir.

Kesme ve eğilmeden kaynaklı göçme durumlarının, yüklerin konumu ve ondülinin trapez yapısına bağlı olduğu Johnson ve Cafolla tarafından incelenmiştir (1998). Li ve diğ. Tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ise trapez gövdeli kirişlerin düz gövdeli kirişlere oranla 1.5-2 kat daha fazla burkulma dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir (2000).

Khalid vd. (2004) yumuşak çelik malzeme tipi kullanılarak üretilen ondülin gövdeli kirişlerin tek noktalı yükleme altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yatay ve dikey şekilde Sinüzoidal gövde yapısına sahip birbirinden farklı çelik kiriş deney numuneleri nümerik olarak incelenmiştir (Şekil 2.5). Yapılan deneylerde görülmüştür ki dikey oluklu Sinüzoidal gövde yapısına sahip ondülin gövdeli kirişler yatay oluklu deney

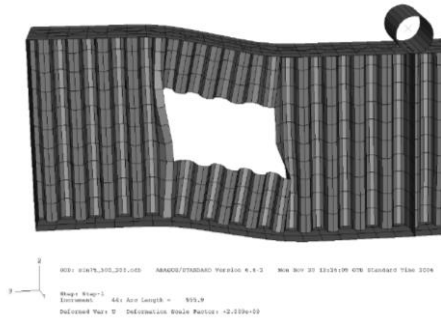
elemanlarına kıyasla %13,3 ile %32,8 arasında daha fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir. Hiçbir elemanda başlıklar ile gövde levhası arasındaki kaynaklarda yırtılma gözlemlenmemiştir. Ondülin gövdeli kirişlerde büküm açısının artırılması ile moment taşıma kapasitesinin de artırılabilceği gösterilmiştir. Ayrıca tasarımda kullanılan dikey oluk yapısına sahip Sinüzoidal gövdeli kirişlerin en büyük büküm açısı ile tasarım yapılması durumunda çelik malzemeden %13,6 tasarruf yapılabileceği görülmüştür.



Şekil 2.2. Khalid vd. (2004) dikey ve yatay oluklu Sinüzoidal gövdeli kirişler

Abbas vd. (2006) düzlem içi gerilmeler altında ondülin gövdeli kirişlerde meydana gelen kesit gerilmeleri ve eğilme momentleri ile kesme kuvvetleri vasıtası ile oluşan bileşke gerilmeleri araştırmışlardır. Ondülin gövdeli kirişlerin geleneksel kiriş hesap teorileri ile analiz edilemeyeceği anlaşılmıştır. Bundan dolayı standart düzlem içi gerilmeler altında Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişler için yeni çözümler türetilmiştir.

Kıymaz vd. (2007) bu çalışmada esas olarak gövde açıklıklarının sinüzoidal oluklu kirişlerde kayma dayanımı / stabilitesi üzerindeki etkisi ele alınmaktadır. Genel amaçlı bir sonlu elemanlar programı (ABAQUS) kullanılmıştır. 2 m uzunluğundaki ve çeyrek aralık noktalarında dikdörtgen ağ açıklıklı basitçe desteklenmiş oluklu ağ kirişleri dikkate alınmıştır. Açıklıkların boyutları ve sinüs dalgasının genliği ve oluklanma yoğunluğu gibi oluklanma parametreleri de dahil olmak üzere çeşitli durumlar analiz edildi (Şekil 2.7). Gövde delikleri olmayan modeller de analiz edildi ve hepsi birlikte yük deformasyon özellikleri ve en yüksek kayma direnci açısından incelenmiş olan diğer durumlarla karşılaştırıldı. Oluk yoğunluğu, toplam yük sapma tepkisini etkiliyor gibi görünmektedir. Oluklar, nihai davranışta belirgin bir farklılığa neden olmuştur. Tabii oluklu modeller için nihai yükte ani bir düşüş gözlemlendi. Deliksiz gövdelere sahip modeller için öngörülen nihai gövde kayma kuvvetlerinin, kod tahminleriyle makul bir uyum içinde olduğu bulundu.



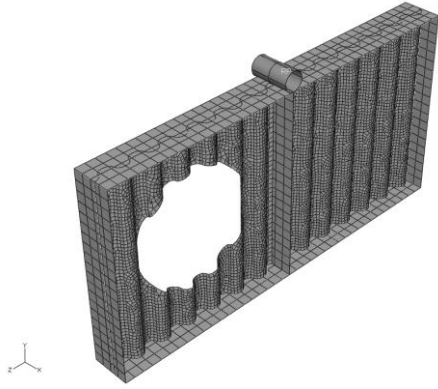
Şekil 2.3. Kıymaz vd. (2007) gövde dikdörtgen boşluklu SGOK'in SE modeli

Gönen (2007) 25 m genişliğinde 40 m boyunda ve 12 m çatı makası alt kotuna sahip, içinde 100 kN'luk bir vinç barındıran çelik bir endüstri yapısının standart hadde profiller ve sinusoidal gövdeli kirişler ile ayrı ayrı modellemesi yapılarak karşılaştırmalı analizini yapmıştır. Sinüzoidal gövdeli profiller ile tasarlanan yapının periyodu standart profiller kullanılarak yapılan yapıya oranla periyodunun çok daha düşük olduğu ve daha az deplasman yaptığı görülmüştür. Sinüzoidal gövdeli elemanlar kullanılarak oluşturulmuş yapının ağırlıkça daha düşük olduğu ve hem deprem daha az deprem riski taşıdığı hem de daha ekonomik olduğu ortaya konmuştur.

Eldip (2009) köprüler için ondülin gövdeli çelik kirişlerin kayma dayanımı kuvvetini etkileyen geometrik parametreleri incelemek için sonlu bir eleman analizi yapılmıştır. Sayısal sonuçlara dayanarak, yerel, genel veya etkileşimli burkulma parametrelerinin hesaplanmasına gerek kalmadan bir kesme burkulma parametresi formülü önerilmiştir. Kıvrımlı gövdenin kesme burkulma kapasitesini en üst düzeye çıkarmak için başka bir formül sunulmuştur. Önerilen formüller yayınlanan deneysel verilerle iyi uyum sağladığı gözlenmiştir. Önerilen yaklaşımın, köprülerin kıvrımlı oluklu çelik gövde levhalarının kayma dayanımı için iyi bir öngörü sağladığı bulunmuştur.

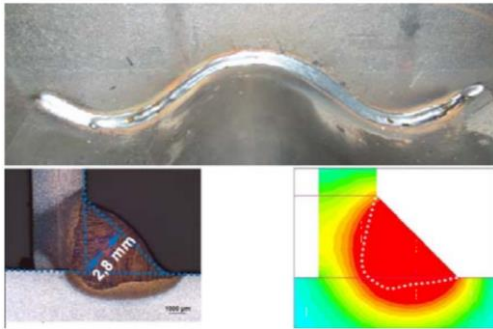
Ondülin kirişlerin ince gövde kalınlıklarının burkulma dayanımının düz daha büyük kalınlıktaki gövdeli kirişlerle kıyaslanabilir oluşu ise Pasternak ve diğ. tarafından araştırılmıştır (2010). Yukarıda bahsedilen çalışmalarda kirişin gövde yapısı ile ilgili hep sabit parametreler kullanılmıştır.

Kıymaz vd. (2010) ondülin gövdeli kirişlerde gövde açıklığı olan ve olmayan tasarımlar üzerinde çalışmıştır. Bu çalışma, esas olarak gövde boşluklarının sinüzoidal oluklu levhalar ile çelik kirişlerin enine yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisiyle ilgilidir. Genel amaçlı bir sonlu elemanlar programı (ABAQUS) kullanılmıştır. 2 m uzunluğunda ve çeyrek aralık noktalarında dairesel ağ açıklıkları ile basitçe desteklenmiş ondülin gövdeli kirişler dikkate alınmıştır. Açıklıkların boyutu ve sinüs dalgasının büyüklüğü ve uzunluğunun bir fonksiyonu olan oluklanma yoğunluğu dahil çeşitli durumlar analiz edildi (Şekil 2.6). Gövde delikleri olmayan modeller de analiz edildi ve hepsi birlikte yük deformasyon özellikleri ve nihai gövde kayma direnci açısından incelenmiş diğer durumlarla karşılaştırıldı. Çalışmada ele alınan geometriler için, bir gövde açıklığının kullanılması, %15 ila %50 arasında bir kapasite azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.4. Kıymaz vd. (2010) gövde dairesel boşluklu SGOK'in SE modeli

Pasternak ve Kubienec (2010) 7 m boyunda simetrik bir kiriş üzerinde iki noktalı yükleme altında kiriş gövdesinin, kiriş başlıklarına kaynaklandığı bölgelerde yapılan kaynaklama işleminin kirişin taşıma kapasitesine etkisini araştırmıştır (Şekil 2.8). Bunun için bir kaynaklama simülasyonu da yapılmıştır. Simülasyonda kaynaklama esnasında ortaya çıkan ısıнын 4 mm çapında bir alanı etkilediği görülmüştür. Gerinim pullarından elde edilen veriler göstermiştir ki; testler doğrusal olmayan bir gerilme dağılımı vardır. İlgili şartnamelerde ise gövdenin soğuk şekillendirilmesinden kaynaklanan akma gerilmesindeki yükselmeler ve kaynaklama işleminde başlık levhalarında ortaya çıkan yüksek normal gerilmeler dikkate alınmadığı vurgulanmıştır.



Şekil 2.5. Pasternak ve Kubjenec (2010) SGOK kaynak simülasyonu

Pimenta vd. (2012) hem bileşik sinüzoidal kirişler hem de bunların bitişik elemanlarla bağlantıları için güvenilirlik temelli tasarım önerileri geliştirildiği bildirilmektedir. Bu amaçla: (i) bağlantılar ve kompozit kirişler için sonlu elemanlar modelleri geliştirilir ve doğrulanır, (ii) teorik modeller önerilir, (iii) güvenilirlik analizleri yapılır ve (iv) örtük güvenilirlik seviyeleri mevcut uygulamaya göre kontrol edilir. Önerilen teorik modellerin, tüm karmaşıklıklara rağmen, hem deneysel hem de sayısal analizlerle iyi bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Önerilen tasarım önerilerinden kaynaklanan güvenlik seviyelerinin yapısal mühendislik uygulamasındaki mevcut eğilimlerle tutarlı olduğu bulunmuştur.

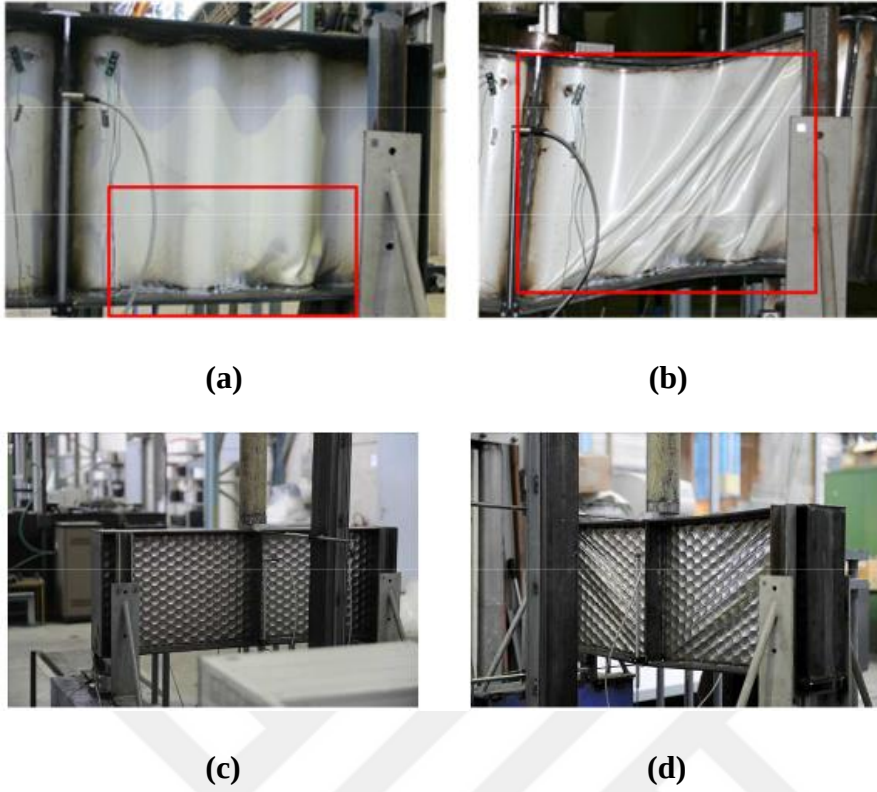


(a)

(b)

Şekil 2.6. (a) Pimenta vd. (2012) birleşim detayı yükleme sonrası deformasyon sonucu; **(b)** Birleşim detayında başlıkta ve gövdede oluşan deformasyonun ölçülmesi

Bartholome ve Pasternak (2013) I-kesitli kaynaklı ince kirişler için Sinüzoidal, trapezoidal ve ince bal-peteği yapılı gövde incelenmiştir. Farklı gövde yapılarına (düz, profilli veya yapılandırılmış) sahip bir dizi plaka kirişi üretilmiştir (Şekil 2.8). Testlerin amacı, kirişlerin yapılandırılmış gövde ile davranışlarının benzer düz veya Sinüzoidal gövdelerden farklı olup olmadığını incelemektir. Sandviç elemanın rijitliği düz plakadan daha yüksektir. Düzlemsel ve yapılandırılmış gövdeye sahip nihai kiriş yükleri karşılaştırılabilir. Kirişin yapısal bir gövde ile bükülme davranışı, peteklerin oryantasyonuna bağlıdır. Sinüzoidal gövdeli kirişler en yüksek nihai yükü verir. Tasarım modeli [Aschinger1991], [DAS1990] ve [DIN1993 2010] 'a göre geliştiriliyor. Yapılandırılmış gövde modelinin geometri ve malzeme özellikleri ile daha da geliştirilmesi gerekir.



Şekil 2.7. (a) Sinüzoidal gövde yapısına sahip kirişte yerel burkulma; **(b)** Sinüzoidal gövdeli kirişte global burkulma; **(c)** Petek kabartmalı gövdeli kirişte deney öncesi sistem durumu; **(d)** Petek kabartmalı gövdeli kirişte kesme yüklemesi altında deney sonrası gövdede global burkulma deformasyon durumu

Chen vd. (2013) Tüm yayılma alanı boyunca eşit bir dikey yük altında sinüzoidal bir oluklu ağ-yapıya sahip dairesel çelik I-kesit kemerlerin düzlemsel mukavemeti için basit ve doğru bir tasarım yöntemi geliştirmek için kullanılan deneysel ve sayısal araştırmaları bildirmektedir. Hem kayma hem de normal gerilmelere dayanabilecek düz bir ağa nazaran, sinüzoidal bir oluklu ağ sadece eksenel ve bükülme sertlikleri oldukça küçük olduğundan, kayma gerilmelerine karşı koyabilir. Küresel düzlemsel elastoplastik davranış ve simetrik yükleme altında sinüzoidal oluklu bir ağ ile dairesel çelik I-kesit kemerin gücünü araştırmak için testler yapılır. Sonlu elemanlar modeli de geliştirildi, test sonuçları ile doğrulandı ve daha sonra kullanılmıştır. Küresel düzlem içi elasto-plastik davranışı ve çelik kemerlerin kuvvetini daha fazla araştırmak. Test ve sonlu elemanların sonuçlarına dayanarak, dairesel çelik I-kesitin küresel düzlemsel mukavemetini, tüm açıklık boyunca eşit bir dikey yüke maruz kalan sinüzoidal oluklu bir ağ ile öngörmek için bir tasarım denklemi önerilmiştir. Sonlu elemanlardan elde edilen sonuçların, düzlem içi bir global göçme durumuna ek olarak, oluklu bir ağa sahip dairesel bir çelik I-kesitli kemerin ayrıca bir elasto-plastik gövde kesme burkulma durumunda da göçme olabileceği bulunmuştur. Bu nedenle, kirişlerdeki sinüzoidal oluklu gövdenin elasto-plastik kayma burkulması tasarımlarında da göz önüne alınmalıdır.



(a)



(b)

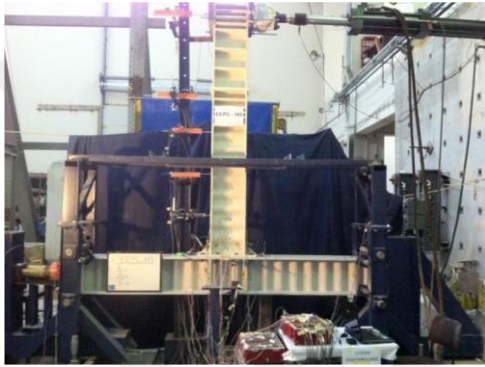
Şekil 2.8. (a) Deney kurulumu; (b) Bitiş mafsalı ve gövde ile bağlantısının gösterilmesi

Shahmohammadi vd. (2013) çelik bağlantı kirişleri, betonarme (RC) bağlantı kirişlerine etkili bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Özellikle birleştirilmiş perde duvar sistemlerinde, birleşme kirişleri sismik enerjiyi dağıtmak için ana elemanlardır. Bu yazıda, ilk olarak, oluklu levhaların çelik kaplama kirişleri ağı (düz levha ve sertleştiriciler yerine) olarak uygulanması, bu kirişlerin sismik davranışının iyileştirilmesi için bir önerme olarak incelenmiştir. Çalışma, ANSYS yazılımının kullanıldığı sonlu elemanlar tekniğini kullanarak düz ve oluklu ağlara sahip çelik bağlantı kirişlerinin doğrusal elastik bükülme analizi ve doğrusal olmayan analizini ele almaktadır. Dokuma plakasının şekli (trapez, kavisli ve zikzak dahil düz ve üç oluklu tipler), örtü kalınlığı, oluk sayısı ve oluk açısı gibi parametreler dikkate alınarak 160 model çalışılmıştır. Sonlu elemanlar, diğer araştırmacılar tarafından test edilen ortak bir çelik bağlantı kirişinin deneysel sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanır. Ağ sertleştiricilerin ortadan kaldırılmasının avantajlarına ek olarak, bu çalışmanın sonuçları, oluklu ağın önerilen geometrik kriterler ile uygulanmasının imkansız hale getirilmesi imkansız hale getirildiğini göstermektedir.

Model Label	F-7 (HCWS-SCF)	T-45-3-7	C-45-3-7	Z-3-7
Meshing (3-D)				
Connection of web to flanges				

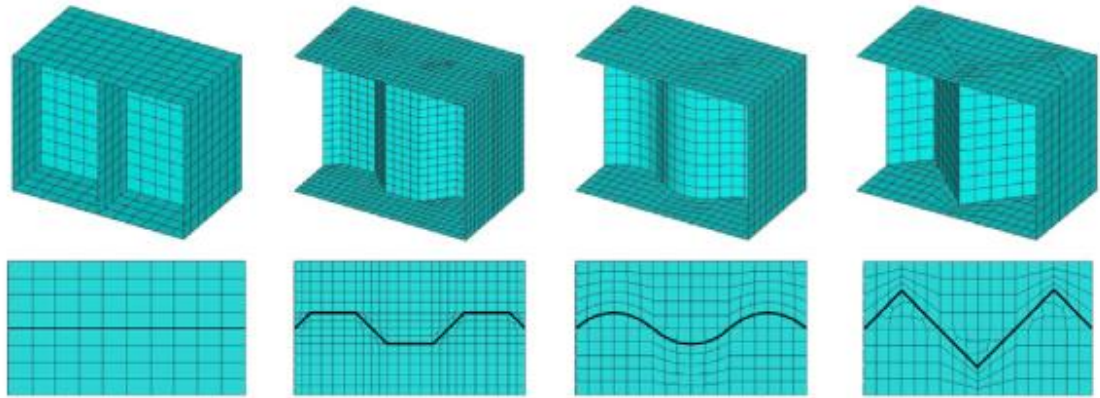
Şekil 2.9. Test edilen kirişlerin sonlu elemanlar modelleri (ANSYS)

Aydın vd. (2014) İnce cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I elemanlardan oluşturulan moment aktaran alın plakalı kolon-kiriş birleşimleri farklı panel bölgesi uygulamaları için deneysel ve kuramsal olarak incelenmiştir. Panel bölgesinin oluşturulmasında uygulanan farklı yaklaşımların kolon-kiriş birleşimlerinin genel davranışı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda; uygulamada kullanılan düzlem levhadan oluşturulmuş panel bölgelerinin davranışı, çapraz elemanlar kullanılarak oluşturulan panel bölgesi davranışı ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada, 6 adet 1/1 ölçekli kolon-kiriş birleşim bölgesi İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında iki yönlü tekrarlı yer değiştirme çevrimleri etkisinde incelenmiştir. ABAQUS yazılımı kullanılarak tüm numunelerin sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve kuramsal analizleri yapılmıştır. Kuramsal olarak elde edilen yük-yer değiştirme ve moment-dönme ilişkilerinde, başlangıç rijitliği, akma dayanımı, akma sonrası rijitlik ve boşaltma kolu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ile yeter derecede yakındır.



Şekil 2.10. Test düzeneğinin deney öncesi genel görünüşü

Hajsadeghi vd. (2014), Çelik bağlantı kirişleri, birleşik perde duvar sistemlerinde betonarme bağlantı kirişlerine etkili bir alternatif olarak kabul edilir. Kıvrımlı gövdelerin, çelik bağlantı kirişlerinde güçlendiricilere alternatif olarak düzlemsel gövdelere uygulanması son zamanlarda önerilmiş ve bu kirişlerin nihai dönme kapasitesinin artırılmasındaki etkili rolü yayınlanmış çalışmalarda gösterilmiştir. Bununla birlikte, kıvrımlı gövdelerin çelik bağlantı kirişlerinin enerji emme özellikleri araştırılmamıştır. Bu çalışmada, düz ve kıvrımlı gövdeler ile çelik bağlantı kirişlerinin döngüsel performansının yanı sıra enerji dağılımı özellikleri, detaylı sayısal simülasyonlar ile incelenmiştir. Bu amaçla ve sayısal simülasyonun onaylanmasının ardından, yassı, yamuk, kavisli ve zikzak gövde oluk formları, gövde kalınlığı, kıvrımlı yarım dalgaların sayısı gibi çeşitli temel parametrelere dayanan çok sayıda sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve kıvrım eğim açısı kıvrımlı gövdelerin gövde güçlendiricilerinden giderilmesinde ve çelik bağlantı kirişlerinde nihai dönme kapasitesinin artırılmasındaki avantajlarının yanı sıra, bu çalışmanın sonuçları ve bulguları, kıvrımlı gövde çelik bağlantı kirişlerinin uygun enerji emme özelliklerine sahip olduğunu ve dağılabildiğini göstermektedir girdi enerjisi oldukça arzulanan ve verimli bir şekilde gösterilmiştir. Dahası, böyle bir bağlantı kirişlerinin enerji yayma yeteneklerinin, verimli tasarım ve kıvrım parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması yoluyla etkili bir şekilde geliştirilebileceği gösterilmiştir.



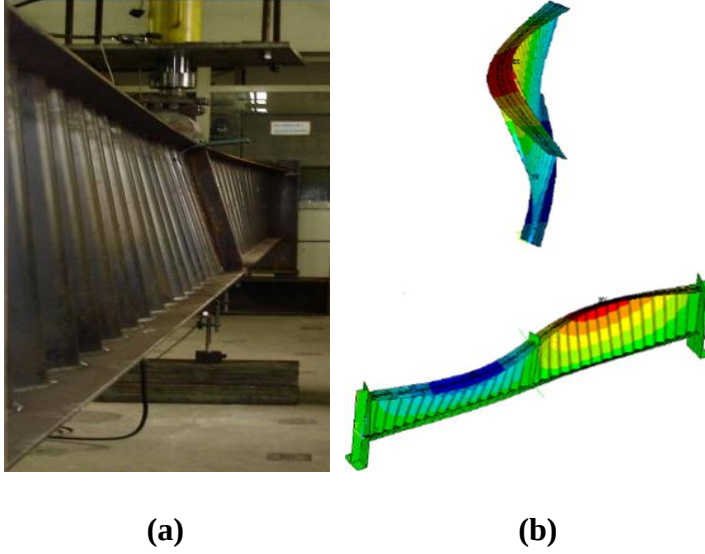
Şekil 2.11. Tipik SEA modelleri ve gövde-başlık bağlantı detayları

Aydın vd. (2015) Sinüzoidal kirişlerin moment dönüş eğrileri, sabitlenmiş uç plaka bağlantıları kullanılarak incelenmiştir. Yeni bir sinüzoidal ışın modeli kullanılması önerilmiştir. Sonuçlar sadece IPE profili ile değil, aynı şekilde imal edilmiş profil ile yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Sonuçta, 70° kirişler için ağırlık azalmış ve moment direnci açısından gelişmeler kaydedilmiştir.



Şekil 2.12. Sinüzoidal gövdeli kirişin deney sonrası göçme durumu ve bulonları

Pimenta vd. (2015) LTB'nin sınır durumu için sinüzoidal ağ kirişleri için güvenilirlik bazlı tasarım önerileri sunulmaktadır. Bu amaçla: (i) sinüzoidal ağ kirişlerinin direnci konusunda deneysel bir araştırma yapıldı, (ii) sonlu elemanlar modeli deneysel sonuçlarla geliştirilmiş ve doğrulanmış, (iii) sinüzoidal ağ için teorik bir model geliştirilmiştir. Kiriş direnci tahmini önerilmektedir, (iv) temel değişkenlerle ilgili hem fiziksel hem de epistemik belirsizliklerin değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir program oluşturulmuştur, (v) güvenilirlik analizleri Birinci Mertebeden Güvenilirlik Yöntemi (FORM) kullanılarak yapılmıştır ve (vi) sonuç örtük güvenilirlik seviyeleri mevcut uygulamaya karşı kontrol edilir. Önerilen önerilerdeki örtük güvenlik seviyelerinin yapısal mühendislik uygulamasındaki mevcut eğilimlerle uyum içinde olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.13. (a) Pimenta vd. (2015) Yanal burkulma burkulmasına maruz kalan sinüzoidal ağ kirişi deney sonrası yanıl deplasman durum; **(b)** Sinüzoidal gövdeli kirişin SEA sonucunda deforme durumu

Guo vd. (2015), Global göçme davranışını, yerel gövde kesme göçme mekanizmasını ve sinüzoidal bir kıvrıma sahip gövde ile çelik I kesitli dairesel yayların dayanımını incelemektedir. Hem kayma hem de eksenel kuvvetlere dayanabilen düz bir gövdeye atıfta bulunarak, sinüzoidal gövde sadece kesme kuvvetine dayanabilir. Sonuç olarak, sinüzoidal gövde, elastik-plastik bir kesme burkulma durumunda göçebilir. Bu çalışma, tek tek radyal yük altında sinüzoidal bir gövde ile pim uçlu dairesel çelik kemerler veya farklı göçme durumlarını sayısal olarak açıklamak için tek tip bir dikey yük dikkate alınmıştır. Yerel gövde göçme durumunun herhangi bir uyarı olmadan aniden gerçekleştiği ve yerel gövde kayma kapasitesinin yetersizliğine ilişkin tüm yönlerin, tek biçimli olmayan gövdelerin nihai kesme kayma kapasitesi için bir denklem ile araştırılmıştır. Ayrıca gövdenin kayma şekil değiştirmelerinin global düzlemsel burkulma ve çelik kemerlerin kuvvetleri üzerindeki etkilerinin de önemli olduğu bulunmuştur. Nominal düzgün eksenel basınç altındaki kemerler için bir kuvvet tasarım denklemi ve düzgün bir dikey yük altındaki kemerler için bir etkileşim denklemi geliştirilmiştir. Sinüs biçimli gövde yapısına sahip çelik kemerler için global göçme ve gövde kesme kaymalarına karşı dayanıklı tasarım prosedürleri önerilmiştir. Global düzlem içi burkulma, yerel gövde kesme burkulma, global düzlem içi kuvvet ve gövde kayma mukavemeti için önerilen tüm denklemler sonlu elemanlar sonuçları ile örtüşmektedir.

Vachca vd. (2016) Yüksek sıcaklıklara maruz kalan sinüzoidal oluklu ağ kirişlerinin termal ve mekanik tepkisini sunmaya odaklanmıştır. Oluklu ağ kirişleri ile izole edilmiş elemanların ve kompozit plakaların davranışını izlemek için iki test yapıldı. İlk deneyde, standart yangın sıcaklıklarına ve aynı zamanda mekanik yüke maruz kalan bir kirişe sahip farklı en boy oranı kirişleri test edildi. İkinci çalışma, oluklu ağ kirişleri-betonarme kompozit döşemesi kullanılarak tasarlanmış gerçek ölçekli bir bina bölmesinde gerçekleştirildi. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, çelik profildeki gerçek sıcaklık dağılımını ve sinüzoidal oluklu ağ kirişlerinin yangın performansını ortaya koymaktadır. Sırasıyla standart yangına ve doğal yangına maruz kalmış oluklu ağ

kirişleri için tek eleman ve gerçek bina testlerinin sonuçlarını sunmaktadır. Tek eleman testleri, flanş ve ağ kalınlığı arasındaki oranın kiriş kesitindeki sıcaklık gelişimi üzerinde bir etkisi olduğunu göstermektedir. Flanş çevresindeki ağ bölgeleri, yapı elemanlarının taşıma kapasitesi değerlendirmesini etkileyebilen ağın orta yüksekliğine kıyasla daha düşük bir artış oranına sahiptir. Gerçek bina testi, oluklu levha kirişlerin aynı tepkilerini termal bakış açısıyla göstermektedir. Her iki test için deformasyon gelişimi benzerdir ve hızlı sıcaklık artışı nedeniyle ağın direnç kaybı şeklinde sunulur. Her iki testte elde edilen sapmaların karşılaştırılmasıyla, kiriş beton levha ile birlikte çalışıyorsa, tek eleman testlerinde mevcut olan yangından kaçabilmeyi ortadan kaldırılır.



(a)



(b)



(c)

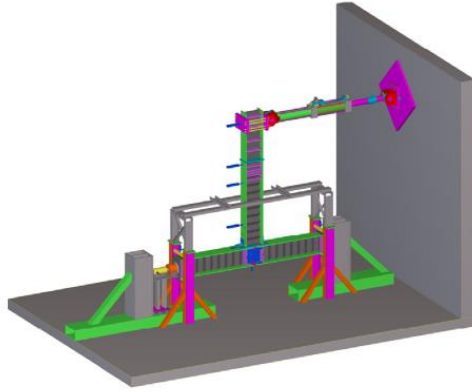


(d)

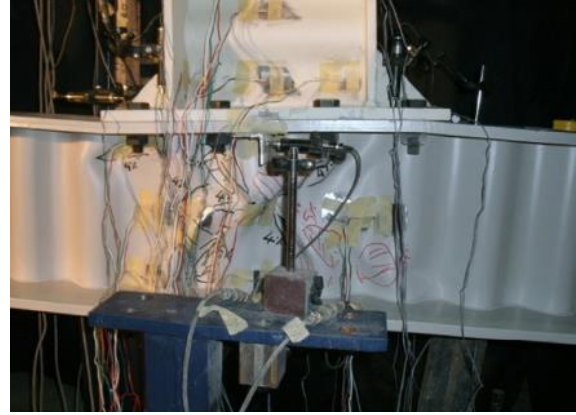
Şekil 2.14. (a) Deney öncesi kiriş-kiriş bağlantısı ve döşeme trapezi; (b) Deney sonrasında kirişin deformasyona uğramış durumu; (c) Deney öncesi döşeme üstüne yapılan yükleme ve sistem kurulumu; (d) Deney sonrası sistem durumu

Aydın vd. (2016) İnce duvarlı sinüzoidal-oluklu gövde I-kesitli bölümlerinin moment dirençli kiriş-kolon bağlantılarının düzlem içi davranışını incelemek için yapılan deneysel bir çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. Sinüzoidal oluklu gövde I kesit bölümlerinden oluşan neredeyse tam boyutlu kiriş sütun düzeneklerinden oluşan bir grup örnek, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Yapısal ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda döngüsel yükleme altında test edildi. Örneklerin ikisinde oluklu panel bölgeleri varken, diğerleri mevcut bir uygulamaya göre düz plaka panel bölgelerine sahiptir. Deneysel çalışmaların sonuçları, numunelerin genel davranışı ve panel bölgelerin bölgesel davranışı açısından değerlendirilmektedir. ABAQUS'te üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi (FEA) modelleri, temas eden parçalarla birlikte doğrusal olmayan etkileşimi içeren ABAQUS'te geliştirilmiştir. Analitik sonuçlar, deneysel sonuçlarla tatmin edici bir yakınlaşma göstermektedir. Panel bölgesinde

nispeten daha kalın düz plaka ağırları bulunan örnekler, oluklu ağ panellerine sahip olanlardan daha stabildi.



(a)



(b)

Şekil 2.15. (a) Deney öncesi sistem kurulumunun gösterimi; **(b)** Bağlantı detayında deney sonrası deformasyon durumu

Guo vd. (2016) Gövde levhası, lokal burkulma ve burkulma sonrası düzlem-çelik düzlemlerin davranış ve gerilme üzerindeki etkilerini araştıran çok az araştırma bildirilmiştir ve şimdiye kadar ilgili tasarım rehberliği mevcut değildir. Bu çalışma, çelik kemerlerin yapısal davranışlarının sayısal bir incelemesini sunar ve plakanın yerel elasto-plastik burkulma ve global elasto-plastik burkulma ile birleştiğinde burkulma sonrası dikkate alınarak düzlemsel bozulmalarına karşı dayanıklı bir tasarım yöntemi önerir. Düzgün bir şekilde dağıtılmış radyal yükün altında bir kutu bölümüne sahip olan pim uçlu çelik dairesel yayların göçme modları, büyük bir deformasyon elasto-plastik sonlu eleman formülasyonu kullanılarak analiz edilir. Plaka lokal burkulmasının düzlem içi göçme davranışını ve bir çelik kemerin kapasitesini önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Kemer, plakalarının lokal elasto-plastik eğilmesinden, kemerin global elasto-plastik eğilmesinden veya birleşmiş yerel ve global elasto-plastik eğilmeden dolayı göçme olabilir. Göçme durumu plaka bileşenlerinin yükseklik-kalınlık oranı, enine kesitin en boy oranı, yayılma oranının ve kemerin düzlüğünün olması gibi bir dizi faktöre bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, kemerin taşıma kapasitesini etkileyen en önemli faktörlerin, kemerin normalleştirilmiş global esnekliği ve kesitin plaka bileşenlerinin normalleştirilmiş yükseklik-kalınlık oranı olduğu bulunmuştur. Kemerlerin düzlem içi taşıma kapasitesini tahmin etmek için bir kuvvet azaltma katsayısı bu iki en önemli parametreye dayanarak geliştirilmiş ve karşılık gelen bir kuvvet tasarım yöntemi önerilmiştir.



Şekil 2.16. Guo vd. (2016) kemer test düzeneği

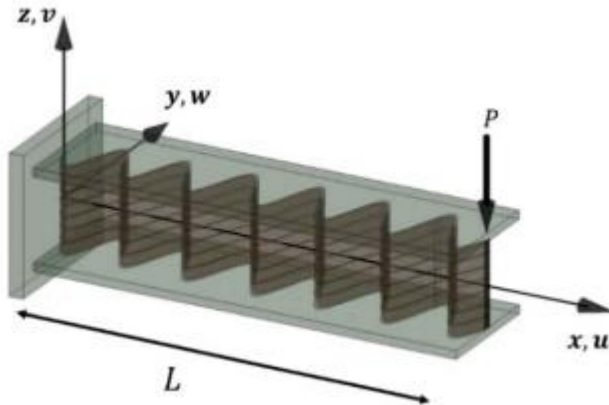
Olivera vd. (2016) Yanal burulma burkulması (LTB), kesintisiz çelik ve beton kirişlerin negatif moment bölgelerinde oluşabilecek nihai bir sınır durumudur. Bu sınır durumu, çelik profil ağının bozulması ile birlikte çelik profil basınç altındaki flanşın (alt flanş) küçük eksen etrafında bükülmesi ile karakterize edilir. EN 1994-1-1: 2004 sayılı Avrupa Standardı, LTB tasarımı için sürekli kompozit kirişlere uygulanabilecek yaklaşık bir prosedür sunmakta, ancak sadece düz çelik gövde profiline sahip olanlara uygulanmaktadır. Bu prosedürün en önemli adımı, elastik kritik anın belirlenmesidir. Bu yazıda, literatürdeki sayısal verilere karşı değerlendirilen oluklu sinüzoidal-gövde çelik profilli sürekli kompozit çelik ve beton kirişlerin elastik kritik momentlerini belirlemek için ANSYS yazılımı kullanılarak bir sonlu eleman analizi (FEA) modeli geliştirilmiştir. Sonuçta, FEA modellemesine dayanarak 45 model içeren bir çalışma yapılmış ve kompozit kirişlerin sinüzoidal-gövde çelik profilli elastik kritik momentlerini tahmin etmek için bir prosedür önerilmiştir.

Razia vd. (2016) farklı eğriliklere sahip sinüsoidal gövdeli ondülin kirişlerin nihai yük taşıma kapasitelerini SOLID-185 eleman tipi kullanarak sonlu eleman modelleri ile hesaplamışlardır. Gövdenin ondülin forma sokulmasının kirişin yük taşıma kapasitesini %18,41 oranında artırabileceğini ve kirişin eğilme kapasitesinin de oldukça artırılabilceğini göstermiştir. Bu çalışmada ondülin gövdeli kirişlerde gövde formunu oluşturan geometrinin optimize edilmesinin kirişin taşıma kapasitesine olan etkisi incelenmiştir.

Shlyakhin ve Lukin (2016) Eğilme momenti alan mafsallı bir kirişin parçası olan oluklu bir gövdenin gerilme durumunu incelemektedir. Bu çalışmada nümerik sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Araştırmanın ana parametreleri mevcut yükün büyüklüğü, sinüsoidal formun geometrik parametreleri ve sinüsoidal formun bir türüdür. Sinüsoidal gövde yapısına sahip kirişlerin geometri hesaplama

modelleri hakkında veri toplarken, yazarlar “Gofro” adında yazara ait bir yazılım kullandılar. Sonlu eleman ızgaralarının üçgenleştirilmesi GMSH önişlemcisi tarafından yapıldı. Her parametrenin analizinden sonra, araştırmacılar eğilme momenti alan bir kirişin gövdesinin katılım derecesini belirlediler ve dalgalı formun sinüzoidal şeklinin avantajını kanıtladılar.

Jiao vd. (2017) Burkulma dengesizliği, kritik burkulma yükünün ciddi şekilde azalmasına neden olan I-bölüm elemanlarına sahip yapılar üzerinde önemli bir sınır anlamına gelir. I-kesit yapıların yükleme kapasitesini arttırmak için, örneğin kompozit materyaller kullanarak veya gövde geometrisini değiştiren birçok mekanizma ve teknik geliştirilmiştir. Bu çalışma, geometrinin sinüs biçimli oluklu gövde ile ahşap kompozit I-kirişlerin bükülme kapasitesi üzerindeki etkisini teorik olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Teorik tahminleri doğrulamak için deneyler ve sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sunulan model aynı zamanda mevcut bir çalışmayı doğrulamak için düz gövdeye indirgenmiştir. Gövde geometrisinin kritik burkulma yükü üzerindeki etkilerini göstermek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Yassı ve sinüzoidal gövdeli I-kirişler arasında önemli bir burkulma yükü artışı (en az% 17.7) elde edilir. Sinüzoidal I-kirişlerin yükleme kapasitesi üzerindeki gövde kalınlığı, kiriş uzunluğu ve kiriş yüksekliğinin etkilerini değerlendirmek için hassasiyet çalışması yapılmıştır. Dalga boyu-kiriş uzunluğu (aL) ve dalga genliği-başlık genişliği (AT) oranlarının kritik burkulma yükü ve ahşap oluklu I-kirişlerin hacmi üzerindeki etkisinin araştırılması için optimum tasarım yapılmıştır. Bu çalışmadaki bulgular, sinüzoidal oluklu gövde ile kompozit I-kirişlerin tasarımında kılavuz olarak kullanılabilir.



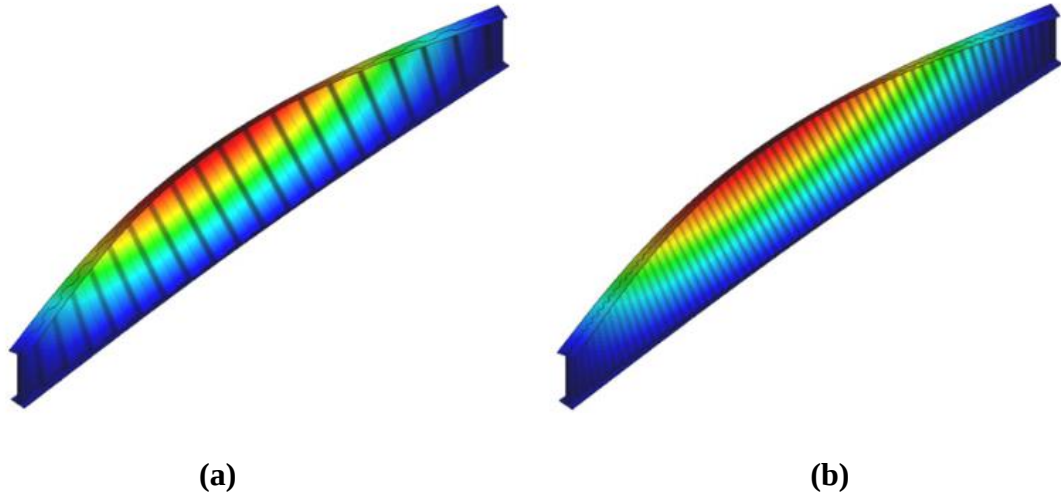
(a)



(b)

Şekil 2.17. (a) Bir uç yükü altında sinüzoidal gövdeli bir konsol I-kirişinin şematik gösterimi; **(b)** Birleştirilmiş ahşap kompozit I-kirişler, sinüzoidal gövdeli

Lopes vd. (2017) Oluklu kirişlerin elastik kritik moment kapasitesini incelemiştir, ya düzgün bir eğilme momentine, gradyan eğilme momentlerine veya düzgün dağılmış bir yüke maruz kalır. Ondülin gövdeli kirişlerin yanal burulma burkulması (LTB) konusundaki önceki araştırma sunulmuş ve eleştirel bir şekilde gözden geçirilmiştir. Trapez oluklu kirişler ile kirişlerin enine kesit özelliklerine ilişkin daha önceki çalışmalara dayanarak, ondülin gövdeli kirişler için sinüs biçimli oluk ile çözümleme veya burulma sabitini elde etmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca, çok çeşitli farklı kıvrımlı gövdeli profiller ve uzunlukları için kapsamlı bir sayısal çalışmaya dayanarak, düz gövdeli kirişler için moment modifikasyon faktörü mevcut tasarım formülünün, kapasiteyi tatmin edici bir şekilde tahmin etmek için geliştirilebileceği gösterilmiştir. Düzgün olmayan eğilme dağılımları altında ondülin gövdeli kirişlerin kapasiteleri bu nedenle, moment modifikasyon faktörü için yeni bir kapalı form ifadesi önerilmiş ve başarılı bir şekilde doğrulanmıştır. Son olarak, analitik sonuçların kabuk sonlu elemanlar kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal bir burkulma analizinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasıyla, önerilen modifikasyonların, ondülin gövdeli kirişlerin burkulma mukavemetinin kesin bir tahminine yol açtığı gösterilmiştir.



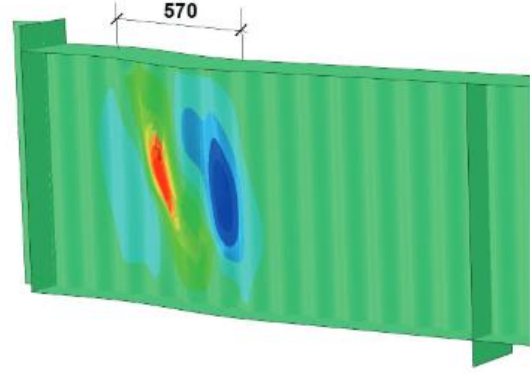
Şekil 2.18. (a) Yayılı yük altında trapezoidal gövdeli kirişin burkulma davranışının sonlu eleman modeli ile gösterimi; **(b)** Yayılı yük altında sinüsoidal gövdeli kirişin burkulma davranışının sonlu eleman modeli ile gösterimi

Basinski (2018) Uç güçlendiricilerin eğilme rijitliğinin ürettiği, kirişlerin sinüs dalgalarının tasarım eğilme direnci üzerindeki etkisine ilişkin araştırmaları rapor etmektedir. Deneysel incelemeler, yapısal öğelerden oluşan ve tam ölçekte yapılan sinüzoidal gövdeli kirişlerinde yük yer değiştirme yolları ile ilgiliydi. Deneysel araştırmalarda ortaya çıkan olaylar SEA kullanılarak temsil edilmiştir. SEA analizine dayanan sayısal modellerde, ondülin gövdeli kirişlerde yapılan deneysel araştırmalarda bulunan gövdenin aynı göçme modları hesaba katılmıştır. Kalınlığı 2, 2,5 ve 3 mm oluklu sacdan yapılmış 500, 1000, 1250 ve 1500 mm yükseklikte gövdeye sahip kiriş modelleri için SEA sayısal analizi yapılmıştır. Laboratuvar testleri ve SEA analizine dayanarak, yarı-rijit ve rijit uç güçlendirici plakalara sahip kirişler için tasarım kesme eğilme direncinin tahmin edilmesinde yeni bir yöntem önerildi. Yöntem, etkileşimli burkulma direncinin belirlenmesine dayanır. Bu çalışmada sunulan çözüm, şu anda burkulma dayanımı

tahmini için kullanılan formüllerle karşılaştırılmıştır. Kiriş uçlarında kullanılan güçlendirici plakaların, kayma burkulma direncinde %11'e kadar artış sağladığı gösterilmiştir. Çıkarımlar ve uç güçlendirici plakaları olan sinüs dalgalı oluklu gövde yapısına sahip kirişlerin boyutlandırılması konusunda sonuçlar çıkarılmış ve önerilerde bulunulmuştur.



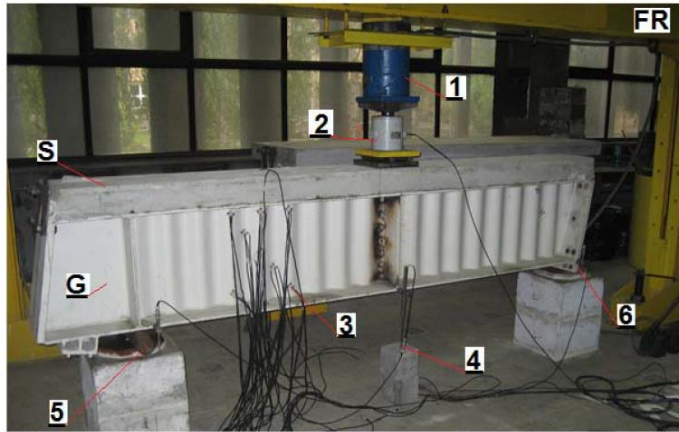
(a)



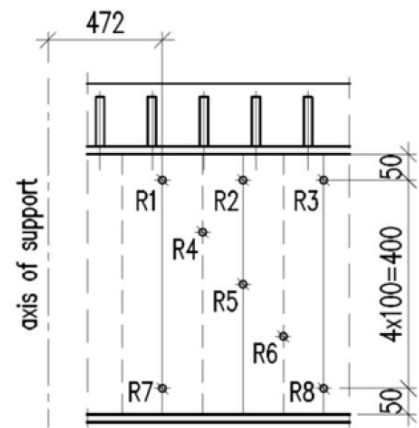
(b)

Şekil 2.19. (a) Bir uç yükü altında sinüzoidal gövdeli bir konsol I-kirişinin şematik gösterimi; **(b)** Birleştirilmiş ahşap kompozit I-kirişler, sinüzoidal gövdeli

Gremza ve Basinski (2019) Eurocode 4'ün tanımına uygun olarak kompozit bir yapı oluşturulmasına izin verecek şekilde betonarme bir döşeme ile birleştirilmiş oluklu ağ ile kirişlerin kayma direnci analizini tartışmaktadır. Yazarların, oluklu bir kirişli kirişli deney deneylerinin sonuçları Bir betonarme döşemeye bağlı ağ ve betonarme bir döşemesiz kirişler üzerinde yapılan testlerin sonuçları kullanılmıştır. Deneyisel araştırmalar, SIN kirişinin (yani, sinüzoidal oluklu) WTA 500 / 300x15'in bütün çelik-beton elemanın kayma dayanımı ve gövdenin kayma dayanımı için beton levha ile güçlendirilmesi etkinliği ile ilgilidir. Yük-yer değiştirme yolları LDPs P (y) ve ayrıca gövdenin tensometrik gerilim ölçümlerinin sonuçları analiz edildi. Kompozit kiriş testlerinin sonuçları, benzer bir statik şemaya sahip beton plakasız SIN kiriş testlerinin sonuçları ve gövde stabilitesinin kaybına bağlı olarak benzer bir göçme durumu ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak, ilk burkulma yükü ve kesme kuvveti transferine betonarme plaka katkısı analiz edilmiştir. Deneyisel sonuçların ve mevcut analitik modellerin analizine dayanarak, bir beton plaka ile güçlendirilmiş oluklu gövde ile kirişlerde tasarım kesme burkulma direncinin tahmin edilmesi için bir çözüm önerilmiştir. Önerilen formül kullanılarak, gövde ve beton levhanın tüm kiriş serileri için kesme yükünün transferine $h_w = 500 \text{ mm}$ ila 1500 mm ve kalınlığı $t_w = 2 \text{ mm}$, $2,5 \text{ mm}$ ve 3 mm olan katkısı gösterilmiştir. Önerilen formül, gövdenin yerel ve genel kayma stabilitesi durumu arasındaki karşılıklı etkileşimi hesaba katar, bu da tasarım kayma eğilme direncinde azalmaya yol açar. Ek olarak, beton sınır koşullarında beton levhaya birleştirilmesinden kaynaklanan artan flanş rijitliğinin bir etkisi olarak gelişme göz önüne alınmıştır. Bu yazı aynı zamanda, WTA 500 / 300x15'ten farklı kalınlık ve kalınlıktaki betonarme döşemesiz SIN kirişler ile ilgili testlerin sonuçlarını kullanmaktadır.



(a)

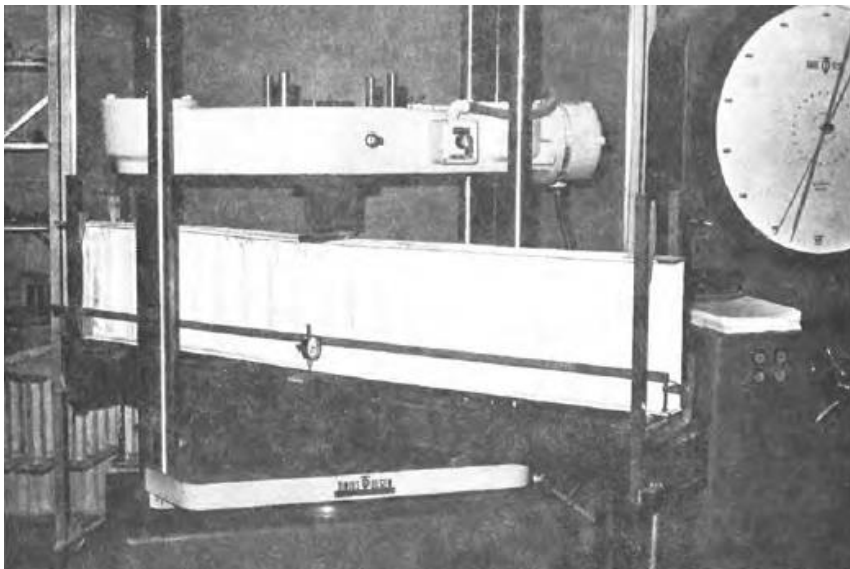


(b)

Şekil 2.20. (a) Test düzeneği; (b) Gövde üzerinde gerginlik göstergesi rozet düzenlenmesi

2.1.2. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişler

Sherman ve Fisher (1971) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda statik yükler altında trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin gövde-başlık bağlantıları için kullanılabilirliğin en aza indirilmesi ile ilgilidir. Üç farklı gövde et kalınlığına sahip numuneler ile 25 adet deney yapılmıştır. Sonucunda gövde-başlık birleşim bölgelerinde sadece kiriş eksenine paralel olan kaynakların gerekli olduğunu ve diyagonal kaynakların birleşim mukavemeti ve rijitliği üzerinde çok az ya da hiç etki etmediği gösterilmiştir. Şekil 2.21’de test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Sherman and Fisher (1971) test düzeneği

Linder ve Hung (1994) trapeziodal gövdeli ondülin kirişler için dış yükler etkisi altında ilave çarpılma gerilmelerinin ortaya çıktığını ileri sürmüşlerdir. Basınca etkisi altında kalan kiriş başlığında bu durumun giderilebilmesi için bazı burkulma katsayılarının hesaba katılması gerektiğini belirlemişlerdir. Çalışmada kiriş başlıklarında oluşan noermal kuvvetin trapeziodal formdaki gövdenin etkisiyle başlık kesiti boyunca düzgün dağımadığına ve ayrıca bu durumun kirişin geometrisine bağlı olarak da değişiklik gösterdiğine dikkat çekmişlerdir.

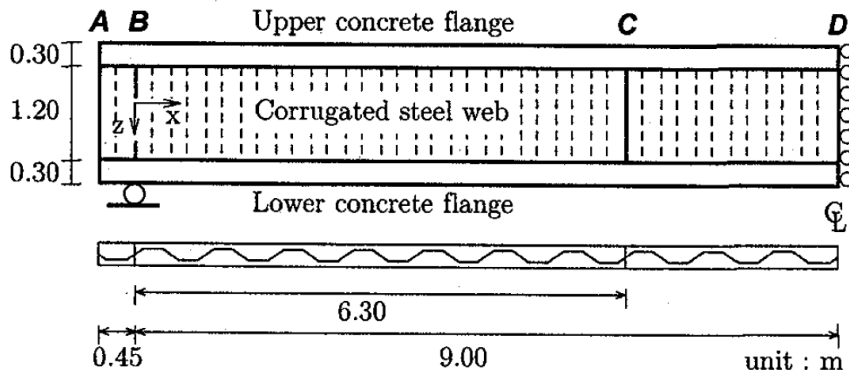
Elgaaly vd. (1996) oluklu gövdeye sahip kirişler kesme altında bozulmaya karşı test etmiş, göçme durumu gövdenin eğilmesinden kaynaklanmıştır. Test numuneleri sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir ve ABAQUS bilgisayar programı doğrusal olmayan analizler yapmak için kullanılmıştır. Yük artışının yanı sıra gövde boyutunun da etkilerini inceleyen çalışmalara dayanarak seçilmiştir. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar ile testler arasındaki karşılaştırma tatmin edicidir. Analitik ve deneysel burkulma yükleri arasındaki ortalama oran 1,15 olarak hesaplandı. Analitik sonuçların daha yüksek olmasının birincil nedeni, test numunelerinin gövdelerinde kaçınılmaz kusurların varlığıdır. Çekirdek kusurları olan sonlu elemanlar modelleri testlerden elde edilenlere çok yakın sonuçlar verdi. Deneysel ve analitik sonuçların yanı sıra gövdenin eğilmesinin sırasıyla kaba ve yoğun oluklar için yerel ve genel olduğu belirtildi. Oluklu kıvrımların izotropik yassı plakalar olarak lokal burkulmalarına veya ortotropik bir levha olarak bütün gövde panelinin global burkulmalarına dayanan burkulma formülleri önerilmektedir. Formüllerin sonuçları, sonlu elemanlar analizi ve testler arasındaki karşılaştırmalar verilmiştir ve tatmin edici olduğu gösterilmiştir.

Elgaaly, Seshadri ve Hamilton (1997) dalgalı gövdeye sahip kirişler düzgün eğilme altında göçmeye karşı test edildi. Göçme ani oldu ve flanştaki gerilme verim gerginliğine ulaştıktan sonra basınç flanşının gövdeye dikey olarak bükülmesi nedeniyle göçme gerçekleşti. Test sonuçları, gövdenin kirişin moment taşıma kapasitesine önemsiz bir katkı sunduğunu göstermektedir. Test numuneleri sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir ve ABAQUS bilgisayar programı doğrusal olmayan analizler yapmak için kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli, test sonuçlarını çok iyi bir doğruluk derecesinde göstermiştir. Flanş ve gövde kalınlıkları ile verim gerilmeleri arasındaki oranın etkisini, oluk düzenini, gövde boy oranını ve gerilme-gerinme ilişkisini incelemek için parametrik analitik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara dayanarak, tasarım için nihai moment kapasitesinin gövdeye dayalı olmadığı gözlenirken, flanşa dayalı olarak hesaplanabileceği sonucuna varıldı.

Elgaaly ve Seshadri (1997) dalgalı gövdeye sahip kirişler kısmi basınç kenarı yüklemesi altında göçmeye karşı test etmişlerdir. Göçme, bir flanş çöküşü mekanizması ve gövdenin bükülmesi veya gövdenin verimi nedeniyle oldu, ardından flanşın kıvrılmış gövde kıvrılması ve düşey bükülmesinden kaynaklandı. Test örnekleri sonlu elemanlar modelleri kullanılarak analiz edildi ve analitik ve deneysel sonuçlar arasındaki korelasyon çok iyi sonuçlar vermiştir. Sonlu elemanlar modelleri kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmış ve basit tasarım denklemleri geliştirilmiştir. Düzlem içi eğilme veya kayma varlığının yükü altındaki kapasiteye etkisi analitik olarak incelenmiş ve tasarım önerileri yapılmıştır.

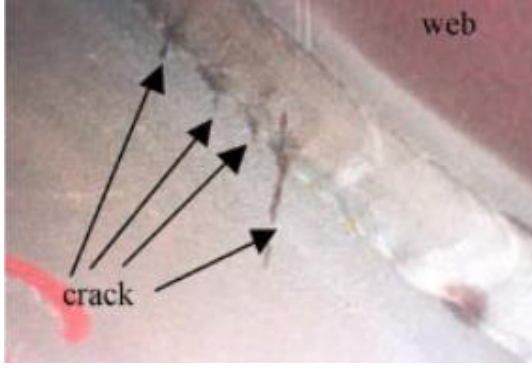
Elgaaly ve Seshadri (1998) Oluklu mukavvaların düzlem dışı sertliği arttırmak ve düşey sertleştirici kullanmaksızın bükülme mukavemetini arttırmak için bir süre önce uçak tasarımında, daha sonra da bina ve köprülerde inşaat mühendisliği uygulamaları için düşünülmüştür. Oluklu ağırları olan çelik kirişlerin test numunelerinin sonlu eleman modelleri, ince kabuk elemanları kullanılarak geliştirilmiştir. Örnekler üst flanşa kayma, düzgün bükülme ve yerel ayırık basınç yükleri altında test edildi. Hem geometrik hem de malzeme doğrusal olmayanları dikkate alan doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu elemanların ağ boyutu, yük artışının büyüklüğü ve ilk kusurun etkisi araştırılmıştır. Test sonuçları ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar sunulmuş, karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Analiz, yukarıda belirtilen üç yükleme koşulunda test sonuçlarını çok iyi bir doğruluk derecesinde gösterebildi. Göçene kadar davranış, göçme durumu ve hesaplanan nihai kapasite, test sonuçları ile iyi bir uyum içinde idi.

Machimdamrog (2003) yükleme altında trapeziodal gövdeli kompozit kirişlerde oluşan kesme kuvveti ve deplasmanların tahmininde kullanılmak üzere diferansiyel denklemler oluşturmuşlardır. Teorik adımın ardından bu kirişlerin SEA modelleri de oluşturularak sonuçlarda kıyaslamalar yapılmıştır. Sonuç olarak yapılan hesaplamalarda uygulanan diferansiyel denlemlerin ve SEA modellerinin tutarlı olduğu gösterilmiştir.

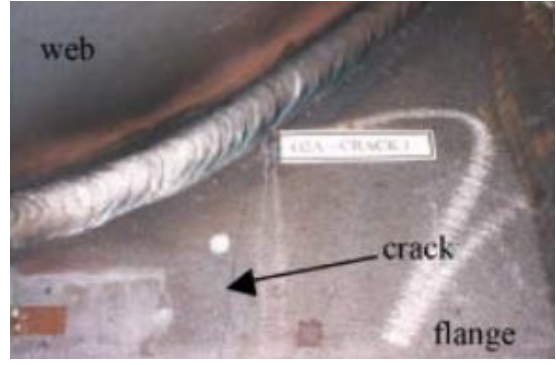


Şekil 2.22. Basit mesnetli yarı simetrik kirişin şekilsel gösterimi

Anami ve Sause (2005) dalgalı gövde yapısına sahip kirişlerinin gövde-başlık kaynağının yorulma dayanımının değerlendirilmesindeki zorluklar, stres alanının karmaşıklığı ve uygun yorulma dayanımı kategorisine ilişkin belirsizliktir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizi ve çatlak yayılma analizi kullanılarak, bu gövde-başlık kaynağının yorulma mukavemeti analitik olarak incelenmiştir. Ana sonuçlar, yorulma dayanımının, dalgalı gövdenin uzunlamasına kıvrımlarının varlığından olumsuz etkilenmesi ve eğimli kıvrımlar üzerindeki yorulma kritik noktasının uzunlamasına kıvrımlardan uzak olması için büyük bir bükülme yarıçapına sahip olması gerektiğidir. Ek olarak, dalgalı gövde kirişlerinin gövde-başlık kaynaklarının yorulma ömrünü tahmin etmek için basit yöntemler önerilmiştir.



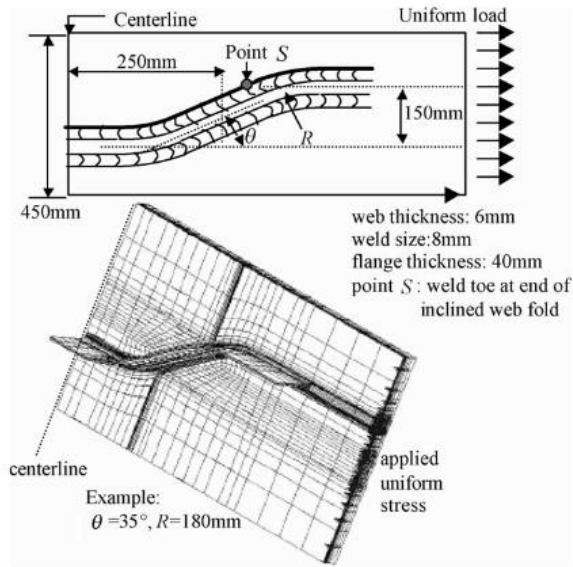
(a)



(b)

Şekil 2.23. (a) Göçme öncesi kaynakta oluşan çatlaklar; **(b)** Göçme sonrası çatlak oluşumu

Anami ve Sause (2005) Çelik kirişlerin gövde-başlık kaynağının trapez dalgalı gövdeye sahip yorulma performansı deneysel olarak, büyük ölçekli kiriş örnekleri kullanılarak ve analitik olarak incelenmiştir. Odak sabit bir eğilme momenti bölgesi olarak seçilmiştir. Yorulma çatlakları eğimli kıvrımlar boyunca birçok noktada başlamış ve daha sonra ana gerilme yönüne dik olarak yayılmıştır. Eğimli kıvrımların sonuna doğru başlayan çatlakların yayılması, göçmeye yol açtı. Parametrik SEA analizleri, gövde dalga açısının ve dalgaların katlama çizgilerindeki bükülme yarıçapının, gövde başlıklı kaynak ucundaki gerilimi en çok etkileyen parametreler olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.24. Anami ve Sause (2005) trapeziodal gövdeli kirişlerde gövde-başlık birleşiminin SE modeli

Dabon ve Elamary (2006) bu çalışmada trapeziodal gövdeli kiriş başlığının burkulmaya karşı narinliğinin kirişin davranışına etkisini incelemişlerdir. Deney için hazırlanan numuneler düz / ondülin gövdeli ve yarı kompakt / kompakt olmak üzere 4 farklı basit kiriş şeklinde oluşturulmuştur. Parametrik çalışma yapmak ve yapılan testlerin simülasyonunu yapabilmek için SEA yapılmıştır. Başlık kalınlığı, genişliği ve başlık berkitmesinin kalınlığı tasarım değişkeni olarak alınmıştır. Kompakt olmayan kirişlerde trapeziodal gövdeli kirişlerin aynı narinlikteki düz gövdeli kirişlere göre kapasitelerinin %38 daha fazla olduğu gösterilmiştir. Şekil 2.25’de deformasyona uğramış kiriş test numunesi gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Deformasyona uğramış kiriş test numunesi

Abbas vd. (2007) dalgalı gövde çelik I kirişlerinin düzlem içi yükler altında doğrusal elastik davranışları için teorik, deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçları sunmaktadır. Tipik bir ondülin gövdeli çelik I kirişli bir dalgalı çelik gövdeye kaynaklanmış iki çelik flanştan oluşur. Önceki araştırmalar, ana moment ve kayma altındaki bir dalgalı gövde I kirişinin, yalnızca geleneksel kiriş teorisi kullanılarak analiz edilemediğini ve bir flanş enine bükülme analizinin gerekli olduğunu göstermiştir. Hayali bir yük yöntemi olan teorik bir yöntem, burada dalgalı gövde-kirişlerde flanş çapraz bükülmesinin ölçülmesi için analitik bir araç olarak sunulmaktadır. Bu yöntemi doğrulamak için, büyük ölçekli bir dalgalı gövde I kirişin dört noktalı bükülme deneysel sonuçları sunulmuştur. Ölçülen flanş enine yer değiştirmeleri ve flanş gerilmeleri, özellikle sabit kayma bölgelerinde teorik sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Daha fazla bilgi edinmek için, test kirişi için sonlu elemanlar analiz sonuçları sunulmuş ve hem deney hem de teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tahir vd. (2008) yarı rijit bağlantı kullanarak birleşimlerin tam ölçekli trapeziodal gövdeli kirişlerde yapısal davranışları incelemişlerdir. Kısmi rijit veya yarı-rijit bağlantıların kullanılmasında EC3 (Eurocode) şartnamesi baz alınmıştır. Bu çalışmanın amacı, trapezoidal gövde profilli çelik kirişler için kısmi dayanımlı bağlantılara sahip, alt montaj çelik kiriş ve izole kiriş-kolonun tam ölçekli testinin performansını sunmaktır. Trapeziodal gövde profilli çelik kirişlerde, flanşın S355 çelik sınıfı ile ve dalgalı gövdenin

S275 çelik sınıfı ile oluşturduğu bir bölümdür. Kiriş-kolon bağlantısı olarak iki tam ölçek testi, kısa ve uzatılmış uç plaka bağlantıları için gerçekleştirilmiştir. Uzatılmış kiriş-kolon bağlantı plakasının kullanılması, sapmadaki önemli bir azalmaya ve kirişin moment kapasitesinde plakadaki uzatılmamış kiriş-kolon bağlantısına göre önemli bir artışa neden olduğu sonucuna varılmıştır.



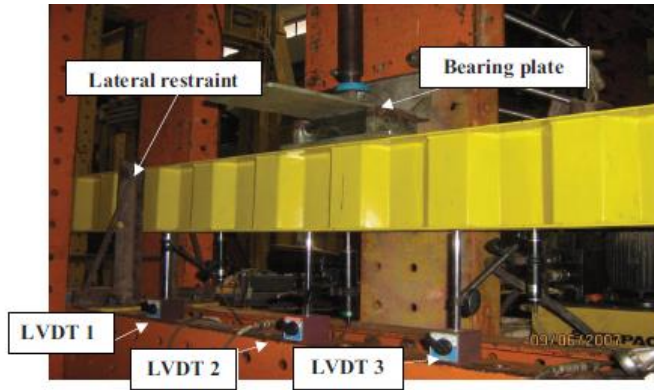
(a)



(b)

Şekil 2.26. (a) Uzatılmamış kiriş-kolon bağlantı plakasında deneysel deformasyon sonucu; **(b)** Uzatılmış kiriş-kolon bağlantı plakasında deneysel deformasyon sonucu

Denan vd. (2009) trapeziodal majör (Ix) ve minör (Iy) eksenlerinde atalet momentleri üzerinde çalışmışlardır. Toplam 24 adet elastik eğilme altında test yapılmıştır. Sonuç olarak minör atalet momentlerinin trapeziodal gövdeli kirişlerde düz gövdeli I kesitli kirişlere kıyasla %1,28 ile %6,57 arasında daha fazla olduğunu ve buna karşılık majör atalet momentinin %11,5 ile %16,54 arasında daha düşük olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.27. Test kurulumu

Nguyen vd. (2010) Bu çalışmada, bir I kirişinin yanal burulma burkulmasının, tek bir moment altında trapez gövde oluklarıyla teorik ve sonlu eleman analizi sonuçları hesaplanmıştır. Sayısal denklemler ve yöntem kullanılarak, kayma merkezinin ve çözgü sabitinin yeri önerilmiştir. Elastik yanal burulma burkulma dayanımı daha sonra önerilen enine kesit özellikleri ile hesaplanır. Sonuçlar literatürdeki önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Farklı oluk profillerine ve uzunluklarına sahip bir dizi sonlu eleman analizi incelenmiş ve sonuçlar önerilen formüllerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sayısal çalışmalar sayesinde, önerilen formüller başarıyla doğrulanmıştır. Dalgalı gövdeye sahip kirişlerin elastik yanal burulma burkulma mukavemeti üzerindeki etkileri de araştırılmış ve tartışılmıştır.

Baser vd. (2011) trapeziodal gövdeli kiriş üzerine betonarme döşeme de koyarak trapeziodal gövdeli kompozit kirişler tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan bu kirişlerin SEA'leri yapılarak nihai yük taşıma kapasiteleri de hesaplanmıştır. Kirişin gövde narinliği, gövde paneli en boy oranı, ondülin formda derinlik oranı ve gövde boşluğu boyutu parametreleri ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan SEA'lerinden göçme mekanizması ve yük deplasman eğrisi incelenmiştir. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin kesme yükü altında taşıma kapasitelerinin hesabı için yaklaşık bir yöntem önerilmiştir.

Sause ve Braxtan (2011) trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin gövde kayma dayanımına odaklanmaktadır. Trapeziodal gövdenin kayma mukavemetini tahmin etmek için önceden geliştirilmiş formüller ve bunlara karşılık gelen teori özetlenmiştir. Çeşitli kesme göçme modları arasındaki etkileşimi dikkate alan yeni bir formül geliştirilmiştir. Önceki araştırmalardan 100'den fazla test sonucu, ilgili test örneği parametrelerine göre düzenlenir ve değerlendirilir. Bu testlerin çoğunun koşullarının, kayma mukavemeti formüllerinin türetilmesinde varsayılan teorik şartlarla tutarsız olduğu bulunmuştur. Kesme mukavemetini tahmin etmek için çeşitli formüller daha sonra seçilen test sonuçlarıyla karşılaştırılır. Yeni formülün, dalgalı gövde ile kayma mukavemetini tahmin etmek için önceki formüllerden daha doğru olduğu gösterilmiştir.

Kövesdi vd. (2012a) köprü tipi yapılarda kirişlerde oluşan karmaşık tipli moment, kesme kuvveti ve normal kuvvet gibi yüklere maruz kalmaktadır. Bu anlamda trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin bu yüklemeler altında davranışı incelenmiştir. Gerçek ölçekli olarak 12 adet kiriş numunesinin eğilme momenti ve kısmi yükleme altında testleri yapılmış, hem nümerik hem de deneysel açıdan incelenmiş ve doğrulanmıştır. Sonuçlar değerlendirilmiş ve trapeziodal gövdeli ondülin kirişler için bir etkileşim denklemi yapılmıştır. Literatürde yapılan diğer araştırmalar sonucunda çıkarılan denklemler ile sonuçlar kıyaslanmış ve hangi durumlar altında hangi denklemlerin kullanılması gerektiği hakkında bilgi verilmiştir.

Kövesdi vd. (2012b) trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerde başlıklarda oluşan gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerde oluklu gövde yapısından dolayı eğilme momentleri aktarılırken kiriş başlıklarında ilave moment gerilmelerinden kaynaklanan normal gerilmeler oluşur. Oluşan ek normal gerilmeler kirişin taşıma kapasitesini direk olarak etkilemektedir. Bu çalışmada deneysel çalışmaların SEA modelleri de oluşturulmuştur. Bu kirişlerin moment taşıma kapasiteleri ile ilgili bazı katsayılar geliştirilmiş ve trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin

taşıyabileceği eğilme momenti hesaplanırken kiriş gövde etkisinin ihmal edilebileceği gözlemlenmiştir.

Arunkumar vd. (2013) soğuk şekillendirilmiş 1 tanesi düz ve 4 tanesi trapezoid formdaki gövdeye sahip olan toplamda 5 adet çelik kirişin iki noktalı yükleme altında deneysel çalışmaları yapılmış ve SEA modelleri oluşturulmuştur. Trapeziodal gövdeli kirişlerde daha yüksek kapasite elde edilmiş ve kiriş gövdesinde kesme gerilmelerinden kaynaklı meydana gelen göçmelerin trapeziodal form ile önüne geçilebileceği gösterilmiştir.

Lho vd. (2014) trapeziodal gövde yapısına sahip çok narin gövdeli I kesitli kirişlerin eğilme kapasiteleri ve eğrilik limitlerinin araştırılması için gerçek ölçekli numuneler ile deneyler yapılmıştır. Yapılan testlerde başlığın akması sonucunda düşey yönde gövde burkulması gerçekleşmiştir. Yapılan deneylerin SEA modelleri oluşturulmuş ve doğrulaması yapılmıştır. Deney sonuçlarında düzenlenmiş maksimum narinlik oranı limiti önerilmiştir. Nümerik sonuçlarla deneysel sonuçlar eşleşmiştir. Sonuç olarak maksimum gövde narinlik oranı limiti standart düz gövdeli kirişlere kıyasla 1,65-2,35 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Cao vd. (2015) trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin yük altındaki davranışlarını incelemek için H kesitli kiriş tipi elemanlarda yükleme altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde kirişlerin yerel ve genel burkulma modlarından göçme gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sonuçlar SEA modelleri oluşturulmuş, yük-deplasman, yük-birim şekil değiştirme ve kesme kapasitesi grafikleri oluşturulmuştur. Yapılan parametrik çalışmada ise gövde kalınlığının artırılması ile kirişin kesme kapasitesi de ortalama %45 oranında arttığı gözlemlenmiştir.

Jager vd. (2016) trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin bileşik yükler altında stabilite problemlerinin incelenmesi ve deneysel çalışmalara bağlı sayısal modelin oluşturulması hedeflenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda 11 adet numune moment, kesme kuvveti ve yanal kuvvetin farklı kombinasyonları altında test edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilen sayısal modelde eşdeğer geometrik kusurlar ile doğrusal olmayan geometrik ve malzeme ayarları kullanılmıştır. Kombinasyonu yapılan yüklemeler altında bu tip kirişlerde eşlenik geometrik kusurlar için ilk normal mod durumu önerilmiştir. Kusur hassasiyeti analizinde kullanılacak değerlerle ilgili tavsiyeler verilmiştir.

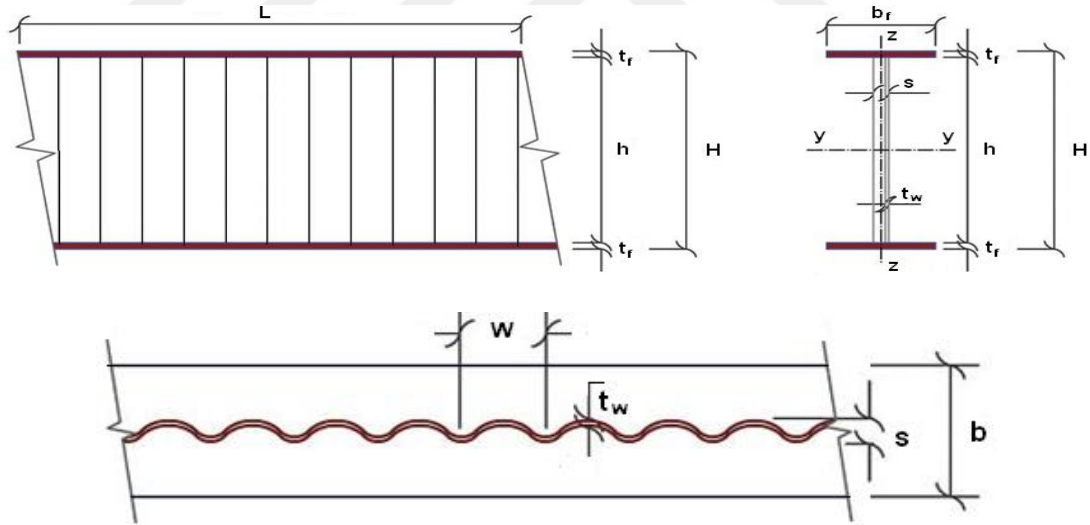
Elkawas vd. (2017) trapeziodal gövdeli ondülin kiriş olarak yüksek mukavemetli çelik sınıftan üretilmiş değişken kesite sahip kiriş tipi elemanlarda kesme etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışlarını incelemek için sayısal tabanlı bir çalışma yapmışlardır. Literatürde mevcut olan bazı trapeziodal gövdeli ondülin gövdeli çelik kirişlerin doğrusal olmayan SEA'lerini doğrulanmıştır. Sonlu eleman yazılımı kullanılarak modellemesi yapılan kirişlerin kesme yükleri altında parametrik çalışması yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde flanşlarda oluşan kesme yükünün çok düşük çıkması ve gövdede oluşan kesme kuvvetlerinin ise flanşlardaki kesme yüküne oranla çok daha büyük çıkması kesme kuvveti hesabında kiriş flanşlarının ihmal edilebileceğini göstermiştir. Deney elemanlarında oluşan göçmeler kiriş gövde yüksekliğinin en kısa olduğu enkesite yakın bir bölgede meydana gelmiştir.

Aggarwal vd. (2018) trapeziodal gövdeli kirişlerde farklı gövde geometrilerine sahip ankastre kirişlerin lokal kesme burkulması elastik eigenvalue burkulma analizlerini sonlu eleman yazılımı kullanarak yapmışlardır. Toplamda 90 adet SEA modeli için gövde kalınlığı, panel genişliği ve gövde yüksekliğinin yerel kesme burkulması davranışı üzerinde inceleme yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda lokal kesme burkulma katsayısı 5,34-8,98 arasında hesaplanmıştır. Ayrıca, yapılan analizlerin sonucunda gövde panel genişliği/gövde derinliği oranı artırıldıkça ya da gövde kalınlığı azaldıkça bahsi geçen katsayının da arttığı gözlenmiştir.

Leblouba vd. (2019) trapeziodal gövdeli kirişlerin kesme kuvvetlerinin hesaplanmasında matematiksel model oluşturulması için kapsamlı analiz yapmışlardır. Mevcut deneysel veriler kullanılarak 144 numune testi üzerinde çalışmalar yapılmış ve yeni bir matematiksel model geliştirmişleridir. Geliştirilen modelin literatürde mevcut olan birçok matematiksel modele göre daha iyi performans gösterdiği saptanmıştır.

2.2. Sinüzoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Avantajları

Çelik ondülin gövdeli kirişler, sinüs fonksiyonu şeklinde dalgalı soğuk haddemiş ya da asitle temizlenmek suretiyle sıcak haddelenmiş ince bir gövdenin düz çelik plaka şeklindeki alt ve üst başlıklar ile kaynakla birleştirmesi sonucunda oluşan taşıyıcı yapma kirişlerdir.



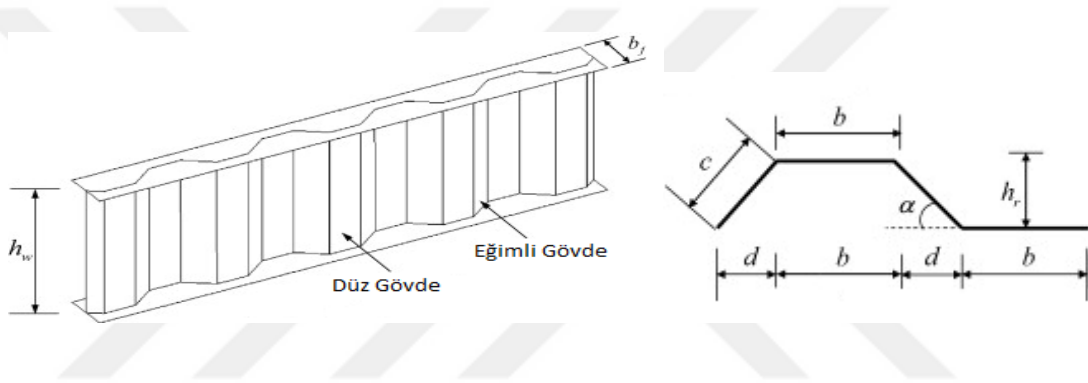
Şekil 2.28. Sinüzoidal çelik ondülin gövdeli kirişlerin ölçülendirilmesi

Geometrik özellikleri Şekil 2.1’de detaylı olarak gösterilen bu kirişlerin Sinüzoidal dalga yapısı kiriş rijitliğine ek olarak kesme kuvveti ve bölgesel etkilere karşı kirişin direncini artırır. Sinüzoidal gövde aynı zamanda yük altında trapez kesitli düz gövde levhalarında meydana gelen lokal burkulmaları azaltır. Buna bağlı olarak bu dalgalı özellik yatay güçlendiricilere gerek kalmadan daha ince bir gövde kalınlığına imkan verir. Bu gövde yapısı aynı zamanda kirişin nihai yük taşıma kapasitesinde artış sağlarken kiriş ağırlığında ve buna paralel olarak yapı maliyetinde azalmaya neden olur. Yüksek taşıyıcı yeterlilikleri ve kolay uygulanabilirlikleri Sinüzoidal çelik ondülin

gövdeli kirişler köprü, hangar ve endüstriyel yapılar gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kirişler herhangi bir yapısal sınırlandırma olmadan kat ya da çatı kirişi olarak kullanılabilirlerinin yanısıra düşük yatay sistemlerin etkisindeki kolon görevini de üstlenebilirler.

2.3. Trapezoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Avantajları

Çelik trapez ondülin gövdeli kirişler, trapez formda soğuk haddeli ince bir gövdenin düz çelik plaka şeklindeki alt ve üst başlıklara kaynakla birleştirilmesi sonucunda oluşan taşıyıcı yapma kirişlerdir. Geometrik özellikleri Şekil 2.2’de detaylı olarak gösterilen bu kirişlerin düz olmayan yapısı sayesinde kesme kuvveti ve bölgesel etkilere karşı kirişin dirençleri fazladır. Trapez gövde formu sayesinde yatay güçlendiricilere gerek kalmadan daha ince bir gövde kalınlığına imkan verir. Bu gövde yapısı aynı zamanda kirişin nihai yük taşıma kapasitesinde artış sağlarken kiriş ağırlığında ve buna paralel olarak yapı maliyetinde azalmaya neden olur



Şekil 2.29. Trapezoidal ondülin gövdeli kirişlerin gösterimi

2.4. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Avantajları ve Standart Bir Profil Kesit ile Kıyaslanması

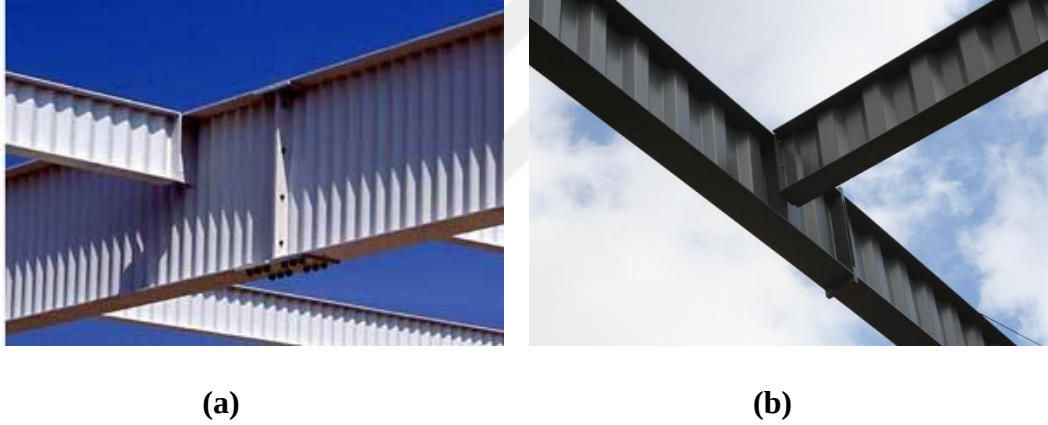
2.4.1. Ondülin gövdeli kirişlerin avantajları

Bu tez kapsamında ondülin gövdeli kirişler Sinüzoidal ve trapezoidal gövde formuna sahip iki farklı şekilde oluşturulmuştur. Gövdenin bu kıvrımlı yapısı sayesinde yatay güçlendiricilere gerek kalmadan daha ince bir gövde kalınlığı ve aynı zamanda yük altında yerel burkulmaları azaltan bir yapı oluşturulmuştur. Şekil 2.8’de trapezoidal ve Sinüzoidal gövdeli kirişlerin en kesit ve boy kesitleri gösterilmiştir.



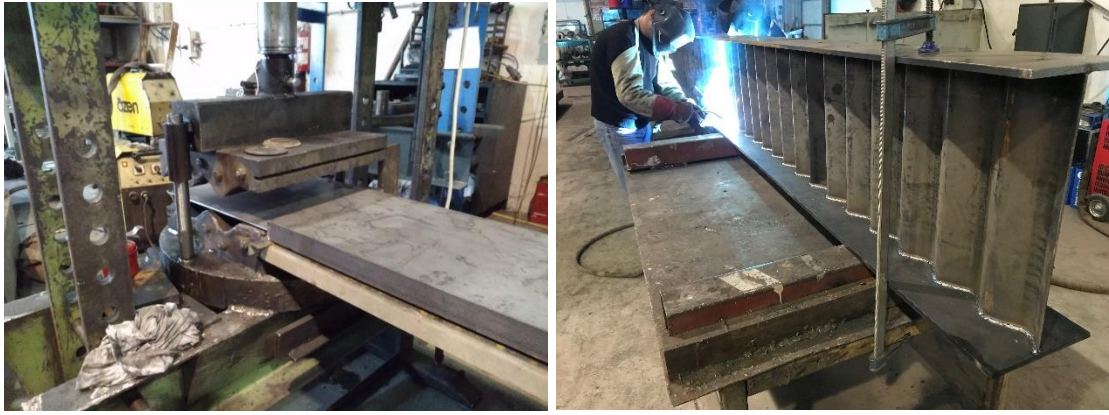
Şekil 2.30. Sinüzoidal ve Trapezoidal gövdeli çelik kirişler

Ondülin kirişlerin gövdesi boyunca geometrisine bağlı olarak soğuk şekillendirilerek elde edilen ince gövde levhalarının başlıkları ile birleştirilmesi sonucunda kirişin gövde burkulma kapasitesi artırılmış olur. Şekil 2.9’da ilave gövde güçlendiricileri kullanılmadan oluşturulmuş ondülin gövdeli kirişler gösterilmiştir.



Şekil 2.31. (a) Uygulanmış bir SGOK örneği; **(b)** Uygulanmış bir TGOK örneği

Ondülin gövdeli kirişlerde gövdenin kıvrımlı yapısı sayesinde berkitme levhalarına ihtiyaç duymadan ince gövde levhaları başlıklar ile kaynatılarak Şekil 2.9’da gösterildiği gibi ondülin gövdeli kirişler oluşturulur.



Şekil 2.32. Kiriş gövdelerinin kalıplar ile soğuk şekillendirilmesi ve başlıklar ile birleştirilmesi (NAP-3668 deneysel elemanların fabrikasyon aşamaları)

Ondülin gövdeli kirişlerin avantajları;

- Standart çelik kirişlerle kıyaslandığında kütleleri az olduğundan dolayı deprem etkisinde oluşacak kuvvetler daha düşüş olacaktır.
- Daha düşük ağırlık sebebi ile daha düşük yatırım maliyeti söz konusudur.
- Kıvrımlı gövdeleri sayesinde global ve lokal burkulmalara daha dirençli hale gelen gövde için ilave yatay güçlendiricilere gerek kalmadan üretimleri yapılabilir. Eğer ondülin gövdeli kirişlerin imalatı için bir otomasyon sistemi kurulursa üretim işçilik maliyetleri de çok düşeceğinden dolayı bir tercih sebebi olmaktadır.
- Standart bir IPE kirişine kıyasla ondülin gövdeli kirişler sayesinde daha uzun açıklıklar geçilebildiği için daha az bağlantı kullanılacağından kaynaklı da bir tasarruf sağlanacaktır.
- Ondülin gövdeli kirişler kullanılarak birçok farklı kompozit eleman da oluşturulabilir.
- İnce gövdeden kaynaklı ağırlık azalmasına bağlı olarak ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır. Ayrıca üretimden yapılan tasarruf sayesinde Dünya'ya daha az karbon salınımı olacaktır.

2.4.2. Ondülin gövdeli kirişlerin standart bir IPE profili ile kıyaslanması

Bu kirişlerin en önemli avantajlarından birisi de ağırlık azaltılmasıdır. Çizelge 2.1'de Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş ile standart IPE 300 profilin yapılan deneylerde görülmüştür ki; ağırlıkları farklı olsa da uygulanan iki noktalı yükleme altında SGOK_415 ağırlık olarak IPE 300 profiline kıyasla %4,71 daha hafif olmasına karşın, %15,8 daha fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bu avantajların yanı sıra IPE 300 profilinin kuvvetli ekseninde atalet momenti 8356 cm⁴ iken, SGOK_415 profilinin 19954 cm⁴'tür. Bu sonuçlar gösteriyor ki, ondülin gövdeli kirişler ile daha az malzeme kullanılarak, daha yüksek yük ve sehim kapasitesine sahip kirişler elde edilebilmektedir. Ondülin gövdeli kirişlerin imalat yöntemlerindeki tüm basamaklar günümüz teknolojileri sayesinde makineleştirilip insan faktörünü olmadan üretim yapılabilir. Bu işçilik tasarrufu da göz önünde bulundurulduğu zaman birçok yapı için uygulanabilir olduğu ispat edilmektedir. Çizelge 2.1'de bahsedilen deneylerle ilgili yük-deplasman grafikleri, deney sonuçlarında oluşan deformasyon ve SEA sonuçları Bölüm 4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. IPE 300, SGOK_415 ve SGOK_330 profillerinin deneysel karşılaştırma sonuçları (NAP-3668 deneysel elemanlarından alınan sonuçlar)

Kiriş Tipi	Yükleme Tipi	I _x (cm ⁴)	A (mm ²)	Ağırlık (kg/m)	Göçme Yüğü (kN)
IPE 300	İki Noktalı Yükleme	8356	53.81	42.2	240.44
SGOK_415	İki Noktalı Yükleme	19954	50.375	40.3	278.11
SGOK_330	İki Noktalı Yükleme	7911	32.2	25.76	133.16

2.4.3. Ondülin gövdeli kirişlerde gövde yapının kapasiteye etkisinin çelik şartnamesine göre kıyaslanması

Ondülin gövdeli kirişlerde kıvrımlı yapıya sahip gövde levhası kirişin taşıma kapasitesine ciddi bir katkı sağlamaktadır. Yapılan deneylerden örnek olarak alacağımız SGOK_330 tipi kirişin iki noktalı yüklem altında 133.16 kN göçme yüküne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Başlık genişliği, başlık kalınlığı, gövde yüksekliği ve gövde kalınlığı aynı geometriye sahip fakat gövdesi kıvrımsız, düz ve yatay güçlendiricilerle desteklenmemiş bir yapım kiriş için Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (2016) şartnamesine göre tasarım yapıldığında kiriş kesme kapasitesinin 49.18 kN olduğu tespit edilmiştir. Ondülin gövdeli kirişte gövdenin kıvrımlı yapısı sayesinde kiriş kapasitesinde 83.98 kN kapasite artışı sağlanmıştır. Gövdenin kıvrımlı yapısı sayesinde 2.7 kat kapasite artışı meydana gelmiştir.

2.5. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Kullanım Alanları

Ondülin gövdeli kirişler özellikle büyük açıklıklarda kesit küçültülmesi ve mimari görünümü sayesinde otopark, spor salonu, alışveriş merkezi, ofis binası gibi ara kolonların istenmediği yapılarda kullanılırlar (Şekil 2.7).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.33. a) Multi-Story Car Park, Parkhaus Wien Flughafen Airport Vienna, 2005; **b)** Tesco Supermarket, Bydgoszcz, Poland, 2001; **c)** Assembling Hangar SEW Eurodrive, Richard-Strauss-Strabe, Wien, 1999; **d)** Warehouses for theatre sceneries, A-2286 Haringsee, 2004

2.6. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Göçme Durumları

2.6.1. Yanal burkulma

Özellikle açıklıkların fazla ve yanal tutucuların olmadığı ya da yanal tutucu aralıklarının geniş olduğu durumlarda eğilme altında kiriş kapasitesinin aşılması durumunda oluşacak çekme ve basınç gerilmeleri ondülin gövdeli kirişte yanal burkulma durumu meydana getirecektir.



Şekil 2.34. İkincil eğilme (SGOK_330 İki Noktalı Yükleme Deney Fotoğrafı 2019)

2.6.2. Yerel burkulma

Ondülin gövdeli çelik kirişler son zamanlarda gövdesi berkitme ile güçlendirilmiş kirişler ve kutu kesitli kirişlerin yerine kullanılmaktadır. (Cheyrezy ve Combault 1990; Lebon 1998; Sayed-Ahmed 2001).

Ondülin gövdeye sahip bir çelik kirişin eğilmede çekme dayanımı, gövdenin neredeyse hiçbir katkısı olmadan, eğilme ve kayma davranışı arasında bir etkileşim olmadan başlıklar tarafından sağlanır. Ondülin gövdeli kirişlerde kesme kapasitesi gövdenin burkulması ve/ya da akması ile kontrol edilir. Başlıklar gövde için bir sınırlayıcı ve tutucudur. (Luo and Edlund 1994; Elgaaly et al. 1996; Johnson and Cafolla 1997a).

Ondülin gövdeli kiriş gövde levhasının göçmesi, gövdenin saf bir kayma gerilmesi durumunda tutulması için klasik çelikten meydana gelir. Ayrıca, iki kat (başlıklar) arasında herhangi bir "panelin" yerel olarak dengesizliği veya iki veya daha fazla panel üzerinde gövdenin genel dengesizliği nedeniyle gövde burkulması da oluşabilir. Bu farklı göçme durumlarının arasındaki herhangi bir etkileşim yeni bir göçme davranışını temsil eder. (Sayed-Ahmed 2001, 2005).

Farklı gövde göçme kriterlerini dikkate alan bir etkileşim denklemi önerilmiş ve sayısal olarak doğrulanmıştır. Ondülin gövdeli kirişlerin burkulma sonrası dayanımları da sayısal olarak incelenmiştir.



Şekil 2.35. Gövdede burkulma (SGOK_415 Yayılı Yükleme Deney Fotoğrafı 2019)

2.6.3. Basit eğilme durumu

Eğilme altındaki bir elemana aynı düzlemde eşit ve zıt yönlü moment kuvvetlerinin etkimesi sonucunda oluşur. Kesitin kompakt olması durumunda çekme ve basınç gerilmeleri altında tam olarak plastikleşene kadar herhangi burkulma davranışı gözlenmez. Toprac ve Cooke (1959)



Şekil 2.36. Basit eğilme (SGOK_330 İki Noktalı Yükleme Deney Fotoğrafı 2019)

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kirişlerin Optimizasyonunda Kullanılan Yöntemler

Matematiksel Programlama yöntemlerinin tasarım değişkenlerini sürekli kabul etmesinden dolayı önceden belirlenen hazır kesitlere göre boyutlandırma gerektiren mühendislik yapılarının gerçeğe uygun tasarımları için ideal sonuç oluşturamamaktaydı. Bu tekniklerin uygulanmaları ile yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü matematiksel programlama yöntemleri ile elde edilenlere göre çok daha etkin hale gelmiş, büyük yapı sistemlerine uygulanmalarını kolaylaştırmış ve hazır kesitlere göre boyutlandırma gerektiren mühendislik yapılarının gerçeğe uygun tasarımları için ideal sonuç oluşturdukları gözlenmiştir. Sürü zekası, erimiş metallerin soğutulma işlemi, harmoni arama en iyinin hayatta kalması, karınca kolonisi gibi doğadaki evrimsel prensiplerin bilgisayar ortamında simüle edilmesi esasına dayalı olarak işleyen bu bulgusal yöntemler, ayrık çözüm üretebilirler ve başlangıç noktasına bakılmaksızın global optimuma yakın çözümler yakalayabilirler. Bu teknikler, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların türevlerine ihtiyaç duymadığı gibi, deterministik kurallar yerine olasılığa dayalı arama yollarını kullanırlar.

Formülasyonları ondülin gövdeli kirişler için ayrı ayrı oluşturulmuş yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü av arama ve ateşböceği algoritması yöntemlerinin adaptasyonu ile elde edilecektir. Bu sayede aynı zamanda bu stokastik yöntemlerinin yapıya ilk uyarlamaları gerçekleştirilerek iki yöntemin minimum ağırlığının bulunması sürecinde sergilediği performanslar optimum çözüme yakınsamadaki becerileri açısından kıyaslanmıştır. Stokastik optimizasyon yöntemleri, geleneksel metotlara göre şu ayrıcalıkları ve üstünlükleri gösterirler:

Bulgusal metotlar oldukları için algoritmaları doğal olay veya oluşumların gözlenmesi ve optimizasyon ile ilişkilendirilmesi ile kurulmuştur. Örneğin, harmoni arama metodunda; bir müzik grubunu oluşturan enstrümanların akort edilerek aynı ses aralığını yakalamaları olgusu, partikül küme tekniğinde; kuşların veya balıkların yiyecek arama ve düşmanların kaçmasındaki sürü halinde hareket etmesi fenomeninden esinlenilmiştir.

Stokastik yöntemler, türev gibi arama işlemini yerel optimumda sonlandıracak matematiksel algoritmalarından kaçındıklarından, optimum çözümü yakalama güvenilirlikleri daha yüksektir.

Tasarım değişkenlerinin sürekli olması zorunluluğu yoktur; ayrık nitelikli tasarım değişkenleri ile çalıştırılabilirler. Özellikle bu husus yapı optimizasyonu açısından daha bir önem arz etmektedir. Örneğin, çelik yapıların tasarımlarında yapı elemanları belirli hazır kesitlerden seçilmelidir, yine betonarme yapı tasarımında donatı çubuğu sayısı tamsayı olmalıdır. Tüm bunlar optimum çözümün pratik uygulanabilirliği açısından vazgeçilmezdir.

Çalışmanın ilk aşamasında bir sonraki sayfada detaylı olarak belirtilen iki farklı stokastik yöntem kullanılarak, OĞK çelik kirişler için optimum tasarımlarını yapacak olan bilgisayar yazılım programları geliştirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde av arama

ve ateşböceği algoritması kullanarak ondülin gövdeli kirişlerin optimum boyutlandırılmasını içeren bilgisayar yazılımları tamamlamıştır. Optimum tasarım problemlerinin çözümü amacıyla bilgisayar programlarından faydalanılmıştır. Tekniklerin işleyişi içerisinde var olan iterasyonlar hazırlanan kodlar ile otomatik hale getirilmiştir. Windows ortamında derlenen VISUAL FORTRAN programlama dilinden faydalanılarak üretilen programlar ondülin gövdeli çelik kiriş sistemlerinin tasarım sınırlayıcıları için BS EN1993-1: 2005 (Annex-D, Eurocode 3) ve DIN 18-800 Teil-1 şartnamelerinde öngörülen tasarım kıstaslarına göre çözüm üretebilir ve optimum tasarım, çelik yapılar için şartnamelerce öngörülen narinlik oranı tahkiki, kiriş gövde burkulması, maksimum deplasman tahkiki, kesme gerilmesi tahkiki, kaynak hesabı göz önüne alınarak gerçekleştirilebilir:

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

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

- Eğilme ve eksenel gerilme tahkikleri
- Kiriş gövde burkulması tahkiki
- Narinlik oranı tahkiki
- Maksimum deplasman tahkiki
- Kesme gerilmesi tahkiki
- Kaynak hesabı

3.1.1. Av arama yöntemi

Av arama (HSA) yönteminin arkasında uzanan mantık doğada avcı olarak bilinen aslan ve kurt gibi hayvanların avlarının çevresinde kuşatma çemberi oluşturmaları ve sonrasında bu çemberi yavaşça daraltarak avlarını yakalamaları bu yöntemin olgusunu oluşturmaktadır. Her iterasyonda avcılarının pozisyonu güncellenerek amaç fonksiyonunun iyileştirilmesi hedeflenir. Bu amaçla öncelikle grup içindeki her bir avcı için bütün ilk pozisyonlar rastgele başlatma prensibiyle oluşturulur. Bu işlem için değeri 0 ile 1 arasında değişen sayılar içinden rastgele sayı seçme uygulamasından faydalanılır. Tekniğin orijinalinde değişkenler sürekli değer alabilen türde değişkenler olarak kabul edilmişlerdir. Başka bir ifadeyle boyutlandırma içinde yer alacak olan sayısal değerler, önceden belirlenmiş olan bir sayı kümesi içinden seçilmeksizin rastgele sayı seçme uygulamasından faydalanılarak elde edilen gerçek sayı değerleri ile ifade edilir. Hazır kesit tablolarından seçim yapabilmek için her profilin tablo içinde yer aldığı satır numarasının tasarım değişkeni olarak atanması gerekmektedir. Bunu yapabilmek ise ancak tamsayı değerlerinin seçimiyle mümkün olabilir. Bu çalışmada gerçek sayılardan tamsayı elde etmek üzere ikinci yöntem olan yuvarlama işlemi kullanılmıştır.

Tamsayı değişkenli optimum boyutlandırma problemi (3.1)'deki gibi tasvir edilebilir.

$$\begin{aligned} \min f(x_i), i = 1, 2, \dots, n: \\ g_j(x_i) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \\ x_i \in X, X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_q\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Burada x_i , q sayısı kadar değer içeren X setinden seçilecek olan i numaralı tamsayı değişkenini gösterirken, n tasarım değişkenlerinin sayısını ifade eder. $f(x_i)$ amaç fonksiyonu, $g_j(x_i)$ ise j nolu tasarım sınırlayıcısıdır ve m ise boyutlandırma problemi içindeki bu tasarım sınırlayıcılarının toplam sayısıdır.

Öncelikle tamsayı değerlerini içeren X kümesindeki x_i değerleri artan sayılar şeklinde sıralanır. Tasarım döngüsünün herhangi bir adımında, algoritma tarafından satır numarasının üretilmesiyle birlikte bu satır numarasına karşılık gelen gerçek tasarım değişkeni değeri set içerisinden kolaylıkla alınabilir. Prosedür altı temel adımdan oluşur.

Adım 1 Tasarım algoritması ve parametrelerinin başlatılması: Bu adımda yöntemin parametreleri belirlenir. Toplam altı adet parametre vardır. Bunlar; av gurubu boyutu (HGS), lidere doğru maksimum hareket (MML), avcı gurubu değerlendirme oranı (HGCR), rastgele hareket yarıçapı değerleri (Ramax, Ramin), yakınsama oranı parametreleri α ve β ve her bir epoktaki toplam iterasyon sayısı IE dir. Sırasıyla 90, 0.002, 0.32, 0.01, 0, 0.9, 0.02 ve 25 olarak seçilmişlerdir.

Adım 2 Av gurubunun oluşturulması: Av gurubunun oluşturulması: Guruptaki avcılar (HGS) sayısına bağlı olacak şekilde her bir grup için çelik kesit satır numarası (Ii) atamak suretiyle rastgele üretilirler.

$$I_i = INT[I_{min} + r(I_{max} - I_{min})] \quad i = 1, \dots, n \quad (3.2)$$

Adım 3 Lidere doğru hareket: Bu adımda avcılarının yeni pozisyonları (MML)dikkate alınarak üretilir.

$$I'_i = I_i + r(MML)(I_i^L - I_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (3.3)$$

Adım 4 Avcılar arasında pozisyon alma: Bu adımda avcılarının birbirleriyle ilişkileri modellenir. Lidere doğru hareketin ardından avcılar daha etkin avlanmak için pozisyonlarını değiştirirler.

$$I_i^{j'} \leftarrow \begin{cases} I_i^{j'} \in \{I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^{HGS}\} \text{ muhtemelen HGCR ile} \\ INT(I_i^{j'} = I_i^j \pm Ra) \text{ muhtemelen } (1 - HGCR) \text{ ile} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$Ra(it) = Ra_{min}(I_{max} - I_{min}) \exp \left(\frac{\ln \left(\frac{Ra_{max}}{Ra_{min}} \right) it}{itm} \right) \quad (3.5)$$

Adım 5 Av gurubunun pozisyonlarını güncellemesi: İterasyon prosesinin her adımında avcılarının lokal optimuma yakalanma ihtimalleri vardır. Bunu engellemek ve global optimuma ulaşma şansını artırmak amacıyla avcılar pozisyonlarını güncellerler.

$$I'_i = I_i^L \pm r(I_{max} - I_{min}) \propto (-\beta(EN)) \quad (3.6)$$

Adım 6 Sonuçlandırma Bu adım iterasyon döngüsünün tamamlanma adımıdır. Süreç maksimum iterasyon sayısı kadar devam ettirildikten sonra sonlandırılır.

Optimizasyon işlemi içinde değişkenler için belirlenen hazır profiller kullanılarak yapı analiz edilir ve sınırlayıcıları sağlayıp sağlamadığı incelenir. Bu durumun kontrolünü literatürde en etkin sonuçları verdiği belirlenmiş olan geri dönüş (fly-back) mekanizması üstlenir. Bu mekanizmaya göre ilk olarak bütün avcılar analiz edilir ve sınırlayıcıları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Eğer bunlardan bir veya birkaçı sınırların dışında sonuç veriyorsa bunlar atılır ve yerlerine yenileri üretilir ve yeniden inceleme yapılır. Eğer sınırlardan sapma çok büyük değilse bu durumda bu avcılar iterasyon süresince sınırları sağlayabilen yeni avcılar üretebileceği düşünülerek çözüm içinde tutulur. Bunu yapabilmek için avcılarının üretilmesi aşamasında hata payı büyük tutulur, avcılarının üretilmesi işlemi tamamlanıp iterasyonlara geçildikten sonra adım adım küçültülerek son değeri olan 0.001'e ulaştırılır ve bu değer ile iterasyona devam edilir.

3.1.2. Ateş böceği algoritması

Ateş böceği algoritması, tropikal iklim bölgelerindeki ateş böceklerinin sosyal davranışlarını baz alan bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bir ateş böceğinin ışıklarını yakıp söndürmesinin birinci amacı, diğer ateş böceklerini çekmek için bir sinyal sistemi olarak kullanmasıdır.

Bütün ateş böcekleri tek cins olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla erkek ve dişi ayrımı olmadığı gibi, bütün ateş böcekleri diğer ateş böcekleri tarafından cezbedilebilir. Ateş böceklerinin çekiciliği, parlaklıkları ile doğru orantılıdır. Ateş böceklerinin aralarındaki mesafe, parlaklığı azalttığı için cazibeyi de azaltmaktadır. Ortamda bir ateş böceğinden daha parlak ateş böceği varsa, bu ateş böceği parlak olana doğru hareket edecektir. Eğer ortamda daha parlak ateş böceği yoksa rastgele yönlerde hareket ederler. Ateş böceği algoritmasında, optimum çözümler elde etmek için verilen bir optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu, ışık şiddeti ile ilişkili olmaktadır. Geliştirilmiş olan ateş böceği optimizasyon algoritmasının işleyiş adımlarını aşağıda gösterildiği şekilde özetlemek mümkündür.

Birinci adım: Ateş böceklerinin tasarım algoritması ve parametrelerinin başlatılması: Başlangıçta belli sayıdaki ateş böcekleri uygun arama uzayında yayılmak için rastgele üretilir. Ateş böceği algoritmasında, her bir ateş böceği ilk olarak rastgele konumlara yerleştirilir. Bu başlangıç konumu denklemi 26'da verilmiştir. r değeri 0 ile 1 arasındaki sayılar içinden rastgele seçilir.

$$x_0^i = x_{min} + r * (x_{max} - x_{min}) \quad (3.7)$$

İkinci adım: Ateş böceklerinin değerlerinin belirlenmesi: Tasarım uzayında her t konum değeri için $f(x)$ amaç fonksiyonu değerleri belirlenir.

Üçüncü adım: Ateş böceğinin en iyi konumlarının güncellenmesi: i numaralı ateş böceğinin t numaralı iterasyon adımına kadar elde edilen en iyi konumu ait ve ateş böceğinin global optimum konumu agt güncellenir.

Dördüncü adım: Her bir Ateş böceğinin konumunun güncellenmesi: Bir ateş böceğinin o ana kadar elde edilen en iyi konum değeri, o parçacığın en iyi konum değeri olarak tayin edilir ve her ateş böceği için ayrı bir vektör içinde depo edilir. Belirlenen bu konum, optimizasyon sürecinin başından bu yana küme içerisindeki herhangi bir ateş böceği tarafından elde edilen en iyi konum ise bütün ateş böceklerinin en iyi pozisyon değeri olarak adlandırılır ve yine bir vektör içine kaydedilir. Ateş böceklerinin t+1 'deki konumu, denklem 27 [9] yardımıyla hesaplanır.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 * e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha * \varepsilon_i \quad (3.8)$$

Buradaki x_i^{t+1} ifadesi i. Nci ateş böceğinin t+1 nci adımdaki konumunu belirtmektedir. Ateş böceklerinin aralarındaki mesafe, parlaklığı azalttığı için cazibeyi de azaltmaktadır. Bu değer birçok uygulamada Gaussian formu kullanılarak tahmin edilebilir.

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (3.9)$$

Burada I ışık yoğunluğunu (parlaklık), I_0 başlangıç ışık yoğunluğunu ve ışık yoğunluğu katsayısını ifade etmektedir. Işık yoğunluğu r mesafesine bağlı olarak değişir. Denklem 29'da yer alan çekicilik olarak tanımlanır;

$$\beta_{i+1} = \beta_i^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (3.10)$$

r=0 durumunda çekicilik β_0 ile gösterilmektedir. İ ve j noktalarındaki her iki ateş böceğinin arasındaki 38artezyen mesafe;

$$r_{ij} = \sqrt{(x_{0j} - x_{1i})^2 + (x_{2j} - x_{2i})^2 + (x_{3j} - x_{3i})^2 + \dots + (x_{nj} - x_{ni})^2} \quad (3.11)$$

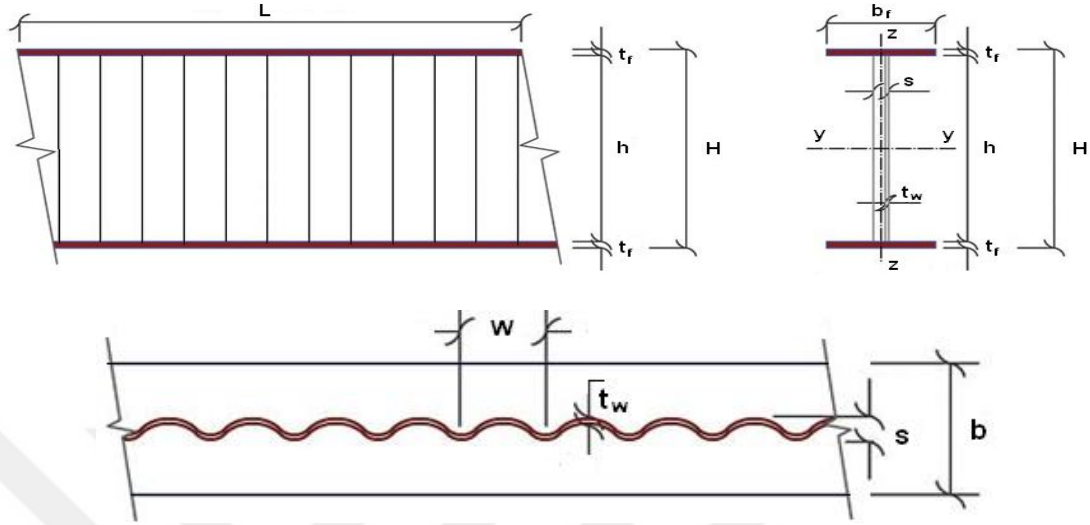
ile hesaplanırken, her bir ateş böceğinin iterasyonlar içerisinde ulaşacağı yeni konumu aşağıdaki denkleme göre belirlenir.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 * e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j - x_i) + \alpha * \varepsilon_i \quad (3.12)$$

Denklem 2.6'daki ikinci terim çekicilikle ilgilidir. İkinci terim ise rastgele sıralama yapmak için kullanılır. Burada, β 0 ve 1 arasında değişen rastgele bir sayıdır. A ise rastgele sıralama parametresi olup, ε 'un ateş böceğinin yeni konumunun belirlenmesindeki ağırlığını ifade eden bir parametredir.

3.2. Kirişlerin Optimizasyon Probleminin Matematiksel Modeli

3.2.1. Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin optimum dizaynı



Şekil 3.1. Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin ölçülendirilmesi

Geometri ve notasyonları Şekil 1’de detaylı olarak gösterilen ondülin gövdeli kirişlerin optimum boyutlandırılması probleminde değişkenler aşağıdaki gibi alınır:

$$\text{Tasarım değişkenleri kümesi: } \{I\} = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\} \quad (3.13)$$

Tanımlanan değişken kümesinde, I_1 çelik alt ve üst başlık plakasının genişliğinin, I_2 çelik başlık plakasının kalınlığının, I_3 çelik gövdenin kalınlığının, I_4 gövdenin sinüs eğrisi şeklinde dalga boyunun ve I_5 ise gövde derinliğinin sıra numarasını tanımlar. Amaç, yapı ağırlığını minimize etmektir. Çelik sinüs eğrisi fonksiyonlu ondülin gövdeli kirişin ağırlığı W_{SOB} olarak gösterilirse, amaç fonksiyonu denklem (2) gibi olacaktır.

$$\text{Amaç fonksiyonu: } \min W_{SOB} = \rho_s * ((2 * b_f * t_f * L) + (h * t_w * L_{düz})) \quad (3.14)$$

Burada, ρ_s çeliğin yoğunluğunu, b_f başlığın genişliğini, t_f başlığın kalınlığını, L kiriş açıklığını, h dalgalı kiriş gövde boyunu, t_w dalgalı gövdenin kalınlığını ve $L_{düz}$ ise dalgalı levhanın düzleştirilmiş boyunu ifade eder. Bu kirişlerin optimum tasarımında sağlanması gereken geometrik değişken ve sınırlayıcılar aşağıdaki eşitliklerde gösterilmiştir. Geometrik sınırlayıcılar gövde yüksekliğine h , gövde kalınlığına t_w , gövde dalga boyuna s , gövde dalgaları arası mesafeye w , başlık genişliğine b_f ve başlık kalınlığına t_f bağlı olarak aşağıdaki eşitlikleri (Eş. 3-6) sağlayacak şekilde ifade edilmiştir.

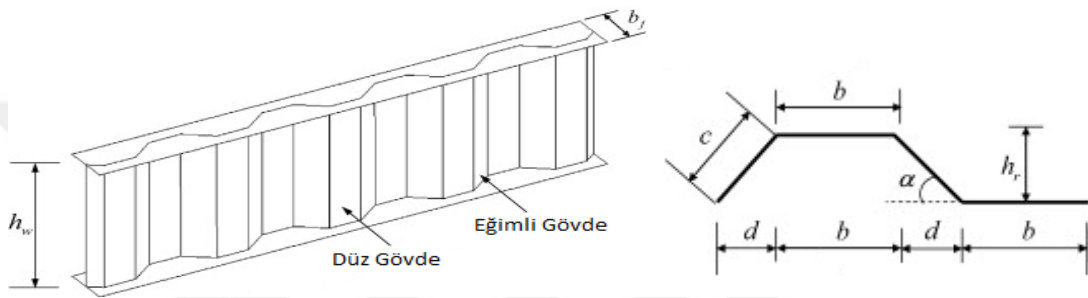
$$330\text{mm} \leq h \leq 1500\text{mm} \quad (3.15)$$

$$1,5\text{mm} \leq t_w \leq 3,0\text{mm} \quad (3.16)$$

$$120\text{mm} \leq b_f \leq 450\text{mm} \quad (3.17)$$

$$6\text{mm} \leq t_f \leq 30\text{mm} \quad (3.18)$$

3.2.2. Trapezoidal gövdeli ondülin kirişlerin optimum dizaynı



Şekil 3.2. Trapezoidal gövdeli ondülin kirişlerin ölçülendirilmesi

Geometri ve notasyonları Şekil 1’de detaylı olarak gösterilen minimum ağırlıklı çelik sinüs eğrisi fonksiyonlu ondülin gövdeli kirişlerin optimum boyutlandırılması probleminde değişkenler aşağıdaki gibi alınır:

$$\text{Tasarım değişkenleri kümesi: } \{I\} = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6\}^T \quad (3.19)$$

Tanımlanan değişken kümesinde, I_1 çelik alt ve üst başlık plakasının genişliğinin, I_2 çelik başlık plakasının kalınlığının, I_3 çelik gövdenin kalınlığının, I_4 trapez gövdenin yüksekliğini, I_5 ise gövde derinliğinin ve I_6 sıra numarasını tanımlar. Yapı elemanları, fabrika ortamında yapma kiriş olarak üretilecektir. Amaç, yapı ağırlığını minimize etmektedir. Çelik sinüs eğrisi fonksiyonlu ondülin gövdeli kirişin ağırlığı W_{SOB} olarak gösterilirse, amaç fonksiyonu denklem (2) gibi olacaktır.

$$\text{Amaç fonksiyonu: } \min W_{SOB} = \rho_s ((2 \times b_f \times t_f \times L) + (h \times t_w \times L_{düz})) \quad (3.20)$$

Burada, ρ_s çeliğin yoğunluğunu, b_f başlığın genişliğini, t_f başlığın kalınlığını, L kiriş açıklığını, h trapez kiriş gövde boyunu, t_w trapez gövdenin kalınlığını ve $L_{düz}$ ise trapez levhanın düzleştirilmiş boyunu ifade eder. Bu kirişlerin optimum tasarımında sağlanması gereken geometrik değişken ve sınırlayıcılar aşağıdaki eşitliklerde gösterilmiştir.

Geometrik sınırlayıcılar gövde yüksekliğine (h_w), gövde kalınlığına (t_w), gövde dalga boyuna (h_r), gövde trapezler arası mesafeye ($2b+2d$), başlık genişliğine (b_f) ve başlık kalınlığına (t_f) bağlı olarak aşağıdaki eşitlikleri (Eş. 3-6) sağlayacak şekilde ifade edilmiştir.

3.3. Hesap Yöntemleri

Ondulin Gövdeli Profillerle yapılmış bir sistemin hesabında da tıpkı herhangi başka bir çelik sistem hesabındaki gibi yük kabulleri istenen şartnameye göre yapılabilir. Standard olarak yapılan tasarımlarda yük kabulleri TS 498 ve Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmelik'te belirtilmiş ilgili değerlere göre yapılır. İstenildiği takdirde herhangi bir uluslararası şartnamede belirtilen yükler de alınabildiği gibi işverenin vereceği yük değerleri de sisteme girilebilir.

Sinusoidal profil yapısından dolayı gövde, profil boyunca oluşan normal gerilmeleri iletememektedir. Yani; Statik olarak, ondülin gövdeli kirişler eğilme momentleri ve normal kuvvetlerin sadece başlıklar tarafından iletildiği kafes kirişlere benzemektedir. Kafes kirişlerde kesme kuvvetleri yalnızca kafes kirişin diagonal ve dikey elemanlarıyla iletilirken, burada öndülin gövde ile iletilir.

Bu statik modelin temelinde, boyutlandırma ve testler, E-P(E-E) metoduna göre DAST-Ri.015 ya da DIN 18 800 standartlarına göre yapılmaktadır. Buna bağlı olarak yük taşıma kapasitesi, iç kuvvetlerin seviyesi ve bağımsız kesit bileşenlerinin (başlık ve gövdenin) kesit dayanımlarına bakılarak ideal olarak hesaplanır.

Boyutlandırma ve tasarım Türk Şartnamelerindeki “Emniyet Gerilmesi Yöntemi”ne ya da EUROCODE 3’ deki “Taşıma Gücü Yöntemi”ne göre yapılabilir. Bununla beraber kafes kirişler, açık gövdeli kolonlar ve enine eğilmeli orthotropic plakalarla ilgili şartları içeren herhangi bir milli standartta da dayandırılabilir.

Türk Şartnamelerine göre yapılan “Emniyet Gerilmesi” hesap yöntemine göre kesitte oluşacak maksimum gerilme esas yüklemeler (EY) durumunda ve S235JRG2 malzeme için $0,66 * 24,0 \text{ kN/cm}^2 = 15,8 \text{ kN/cm}^2$ olmalıdır. Standartta belirtildiği gibi deprem, rüzgar gibi koşullarda oluşacak maksimum emniyet gerilmesi ilgili katsayılarla arttırılabilir.

EUROCODE’a göre yapılan tahkiklerde ise yükler ilgili parametrelerle çarpılıp (Ölü yükler için 1.35 ve Hareketli Yükler için 1.50 vs..) oluşacak gerilmenin çeliğin akma sınırının bir faktöre (γ_m) bölümünden küçük olması aranır.

3.4. Davranış Sınırlayıcıları

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

3.4.1 Sinüzoidal gövde için hesap adımları

Dalgalı gövde plakaların rijitlikleri için;

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

Dalgalı gövdenin enine burkulması için;

$$\tau_{EG} = \frac{162}{5 \times t_w \times h^2} \sqrt{(D_x \times D_y^3)} \quad (3.22)$$

Dalgalı gövdenin narınlık parametresi için;

$$\lambda_{GN} = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3} \times \tau_{EG}}} \quad (3.23)$$

Dalgalı gövdenin burkulma katsayısı için;

$$K_B = \frac{1}{(\lambda_{GN})^{3/2}} \quad (3.24)$$

eşitlikleri göz önüne alınır. Tasarım için yukarıdaki parametreler dikkate alınırsa zaman dalgalı gövdenin enine yük taşıma kapasitesi için aşağıdaki ana ifade yazılabilir.

$$V_{TK-MAX} = \frac{K_B \times f_y \times h \times t_w}{\sqrt{3}} \quad (3.25)$$

Dalgalı gövde için, 3.25 eşitsizliğindeki sınırlayıcı; yük etkisiyle oluşacak (P_v) kiriş kesitinin maksimum enine yük taşıma kapasitesini V_{TK-MAX} aşmamasını sağlar.

$$V_{TK-MAX} - P_v \leq 0 \quad (3.26)$$

Gövde kısmının dalgalı levhasının kalınlığı kirişin kesme yük taşıma kapasitesine göre belirlenir. Yük altında oluşacak kesme kuvveti (V_D) kesme yük taşıma kapasitesini V_{RD} aşmamalıdır.

$$V_D = \gamma_F \times V \leq V_{RD} \quad (3.27)$$

Çelik sinüs eğrisi fonksiyonlu ondülin gövdeli kirişlerin normal kuvvet altında başlık bölgelerinde oluşacak taşıma kapasitelerini hesaplamak amacıyla çekme ve basınç gerilmeleri ayrı bir şekilde dikkate alınır. Başlıkların izin verilen çekme gerilmesi;

$$\sigma_{ALLOW} = \frac{N_{T-MAX}}{b_f \times t_f} \quad (3.28)$$

Basınç gerilmesi için başlığın burkulma riski de dikkate alınarak yük etkisi altında başlıkta oluşacak lokal burkulma ile kiriş ekseninde oluşacak enine burkulma ayrı ayrı hesaplanır.

Yerel burkulma etkisinde elastik limit gerilmesi;

$$\sigma_{EL} = \frac{4000}{(b_f \times t_f)^2} \quad (3.29)$$

Burada gövdenin elastik uzama etkisini hesaba katabilmek için, başlık genişliği dalgalı gövde yüksekliğinin yarısı kadar azaltılıp plaka şeridin genişliği (b) hesaplanır. Bu değer eşitlik 3.29'da belirtilen koşullarda ise;

$$\left. \begin{aligned} f_y &= 240 \text{ N/mm}^2 & \text{için } b &\geq 12.9 \times t_f \\ f_y &= 355 \text{ N/mm}^2 & \text{için } b &\geq 10.5 \times t_f \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

Sonuç itibariyle başlıklardaki normal kuvvet eşitlik 3.31'deki gibi alınır.

$$N_{NORMAL} = \sigma_{EL} \times b_f \times t_f \quad (3.31)$$

Alt ve üst başlıkların kritik boyutları belirlenirken normal kuvvet yük taşıma kapasitesi dikkate alınır. Burada, A başlıkların kesit alanını, z ise başlıkların ağırlık merkezleri arası mesafeyi ifade eder.

$$N_G = N_{NORMAL} \times \frac{A_G}{A} \pm \frac{M}{z} \quad (3.32)$$

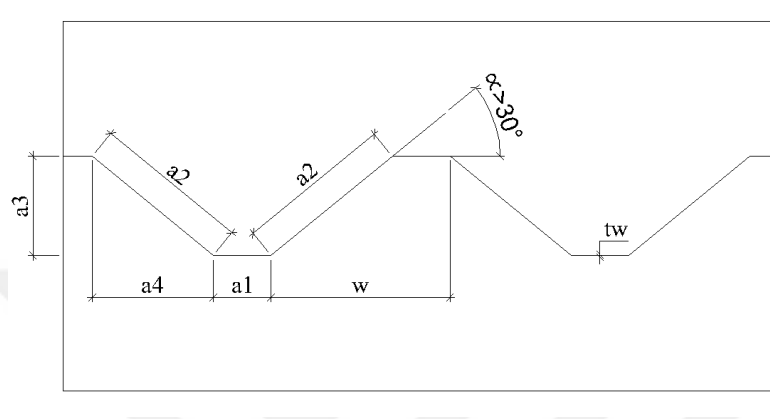
Başlıklarda meydana gelebilecek yanal burkulma;

$$\tau_{EG} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \sqrt{E \times f_y} \times \frac{b_f^2 \times t_f}{k_c \times c} \quad (3.33)$$

Burada, k_c basınç kuvvet faktörünü, c yanal destekler arası mesafeyi ifade eder. Basınç gerilmesi durumunda başlığın yük taşıma kapasitesi yukarıda gösterilen eşitliklerin arasından minimum olanına göre hesaplanır.

3.4.1 Trapeziodal gövde için hesap adımları

Trapeziodal gövdenin geometrik gösterimi;



Şekil 3.3. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişlerin ölçülendirilmesi

Moment kapasitesinin belirlenmesi;

Moment kapasitesinin belirlenmesinde formülden çıkan minimum değer seçilir, burada üç farklı değer hesaplanır. Bunlardan ilki başlıktaki çekme gerilmesini, ikincisi ve üçüncüsü ise başlıktaki basınç gerilmelerini verir.

$$M_{y,Rd} = \min \left\{ \frac{b_2 t_2 f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right); \frac{b_1 t_1 f_{yf,r}}{\gamma_{M0}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right); \frac{b_1 t_1 \chi f_{yf}}{\gamma_{M1}} \left(h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right) \right\} \quad (3.34)$$

Burada başlıklarda oluşan azaltılmış moment kuvveti $f_{yf,r}$ 3.35 bağıntısı ile hesaplanır,

$$f_{yf,r} = f_{yf} f_T \quad (3.35)$$

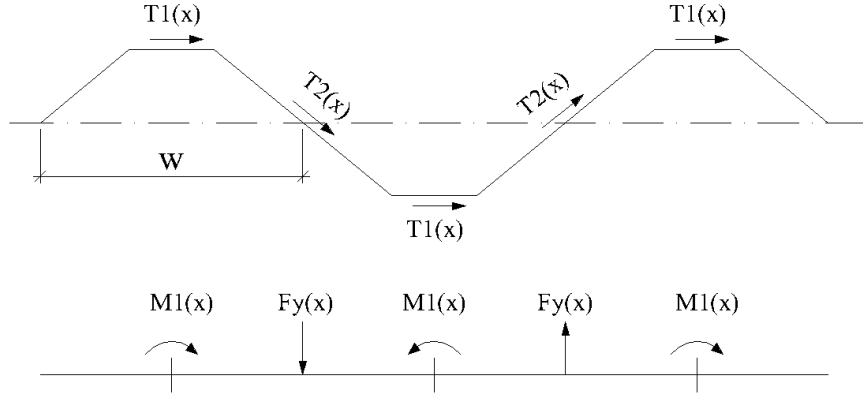
3.35 bağıntısında başlıklarda oluşan moment için azaltma katsayısı f_T , 3.36 bağıntısı ile hesaplanır,

$$f_T = 1 - 0,4 \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{\frac{f_{yf}}{\gamma_{M0}}}} \quad (3.36)$$

3.36 bağıntısındaki $\sigma_x(M_z)$ başlıklardaki enine moment kuvvetlerinden dolayı oluşan gerilme, χ ise EN 1993-1-1 6.3'e göre düzlem dışı burkulma için azaltma faktörü,

Enine moment M_z , başlıklardaki kesme akışından kaynaklanır, Sinüzoidal gövde için $f_r = 1$ alınır.

Başlıkta oluşan kayma akış kuvvetlerinin gösterimi;



Şekil 3.4. Trapeziodal gövdeli ondülin kirişte başlıkta oluşan kayma akış kuvvetlerinin gösterimi

Bir elemanın plaka narinliği;

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}} \quad (3.37)$$

Burada λ_p bir elemanın plaka narinliği $\sigma_{com,Ed}$ ise maksimum basınç dizayn gerilmesi.

Burkulma faktörü, (b=Yanal desteklenmemiş en geniş uzunluk)

$$k_\sigma = 0,43 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (3.38)$$

$$k_\sigma = 0,60 \quad (3.39)$$

$$a = a_1 + 2a_4 \quad (3.40)$$

Bağıntı 3.38 ile 3.39 hesaplanır ve küçük değer seçilir.

Kesme dayanımının belirlenmesi;

$$V_{bw,Rd} = X_c \frac{f_{yw}}{\gamma_{M1}\sqrt{3}} h_w t_w \quad (3.41)$$

Lokal burkulma için azaltma faktörü;

$$X_{c,l} = \frac{1,15}{0,9+\lambda_{c,l}} \leq 1,0 \quad (3.42)$$

Lokal narinlik parametresi;

$$\lambda_{c,l} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,l}\sqrt{3}}} \quad (3.43)$$

Lokal burkulma için kritik kesme kuvveti;

$$\tau_{cr,l} = 4,83E \left[\frac{t_w}{a_{max}} \right]^2 \quad (3.44)$$

Bağıntı 3.44 için a_{max} için a_1 ve a_2' den büyük olan seçilir.

Global burkulma için azaltma faktörü;

$$X_{c,g} = \frac{1,5}{0,5+\lambda_{c,g}^2} \quad (3.45)$$

Global narinlik parametresi;

$$\lambda_{c,g} = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr,g}\sqrt{3}}} \quad (3.46)$$

Lokal burkulma için kritik kesme kuvveti;

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{D_x D_z^3} \quad (3.47)$$

X yönü plaka rijitliği;

$$D_x = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \frac{w}{s} \quad (3.48)$$

Z yönü plaka rijitliği;

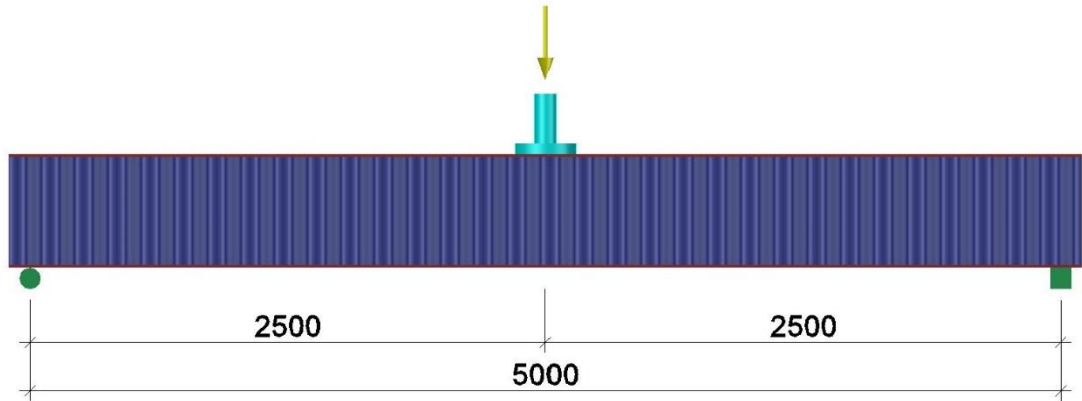
$$D_z = \frac{EI_z}{w} \quad (3.49)$$

Burada I_z gövdedeki w uzunluğu için atalet momenti.

3.5. Tasarım Örneği

Şekil 3.3’de gösterilen 5m açıklıklı ondülin gövdeli kiriş, kendi ağırlığının yanı sıra sırasıyla tam orta noktasından tekil noktasal yüke maruz bırakılmıştır. Tekil yük altında kiriş için izin verilebilir deplasman 17 mm ile sınırlandırılmıştır. Elastisite Modülü 205kN/mm² ve çelik kiriş St-37 sınıfındadır. Kirişin boyutlandırılmasında farklı av arama ve ateşböceği yöntemlerinin parametreleri optimum sonuç için test edilmiştir.

Bu tezin içeriğindeki optimizasyon çalışmasında Doç. Dr. Ferhat ERDAL’ın yürütücüsü olduğu 213M656 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenen Arş. Gör. Osman TUNCA’nın doktora tezinde çalışılan Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin optimizasyonu baz alınmıştır.



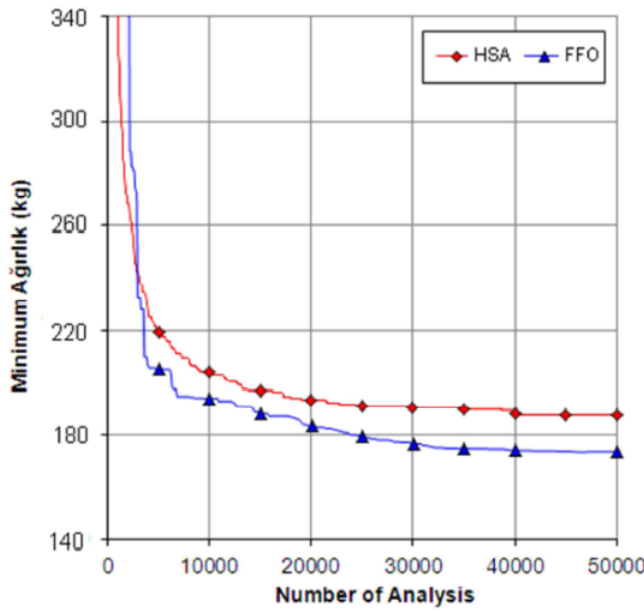
Şekil 3.5. 5 metre Açıklıklı Çelik Ondülin Gövdeli Olarak Düşünülen Kiriş

Optimum boyutlandırma probleminde ondülin gövde yüksekliği, gövde dalga boyu, dalga yüksekliği, başlık kalınlığı ve başlık genişliği tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Tasarım sınırlayıcıları olarak deplasman kısıtlayıcısı, kiriş profilin esneklik kapasitesi, kiriş kesme kapasitesi, narinlik ve kaynak hesabı alınmıştır. Ateş böceği algoritması (FFO) ve av arama yöntemi (HSA) algoritması parametreleri kullanılarak optimum boyutlandırması yapılan ondülin gövdeli kirişin sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Optimizasyon Tekniklerinin Parametreleri

Yöntem	Parametre değerleri					
HSA	HGS=90 par=0.45	MML=0.002 $\alpha=0.9$	HGCR=0.9 $\beta=0.02$	RaMAX=0.01 IE=25	RaMIN=0 Ncyc=10000	
FFO	$\mu=40$	$\beta_0=0.25$	$\beta=1$	$\alpha=0.01$	$\gamma=1$	Nite=10000

Her iki yöntem için maksimum iterasyon sayısı 10000 olarak alınmıştır. Her iki optimizasyon tekniğiyle elde edilen sonuçların minimum ağırlık- zaman grafiği Şekil 3.4’de verilmiştir.

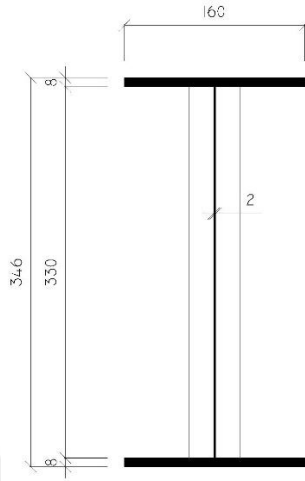
**Şekil 3.6.** OGK_330 kirişi için tasarım geçmişi grafiği

Tasarım geçmişi grafiği incelendiği zaman Av arama tekniğinin (HSA) daha hızlı bir şekilde optimum sonuca yakınsamaya başladığını fakat ateş böceği algoritması tekniği (FFO) ile elde edilen ondülin gövdeli kiriş optimum tasarımın 176.33 kg ile daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Av arama tekniğinin de optimum sonuca güvenilir bir yakınsama ile iyi bir performansı göstermesine rağmen av arama tekniğinden % 7.4 daha ağır bir tasarım ağırlığı bulmuştur.

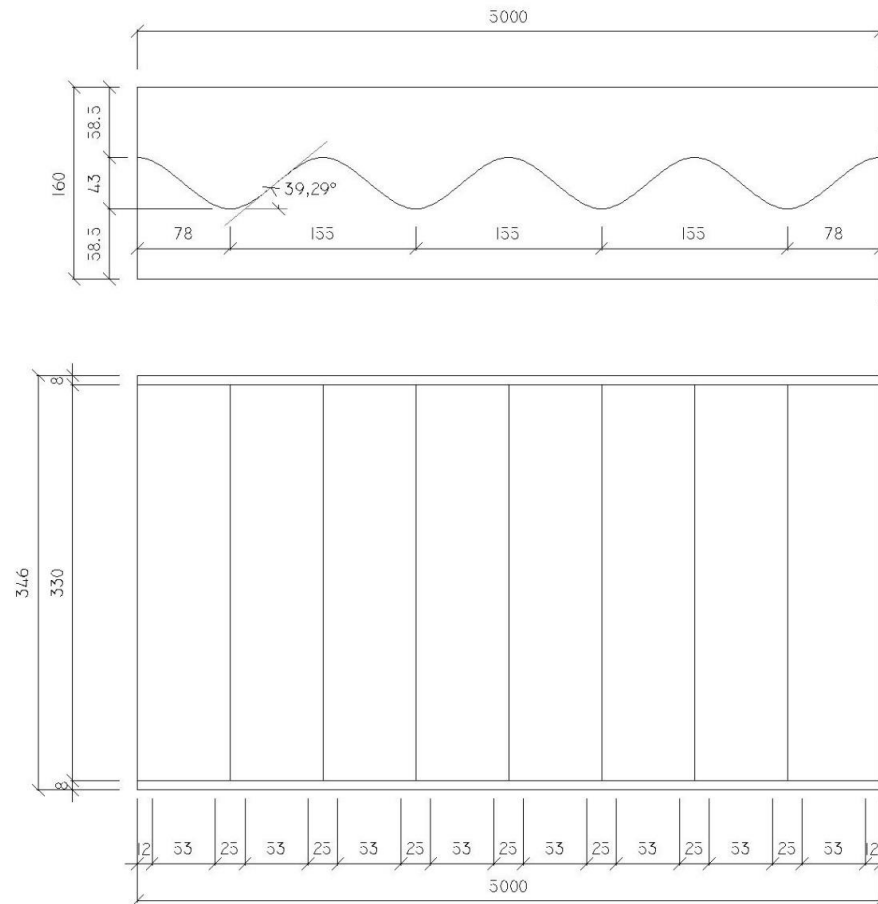
Çizelge 3.2. 5-metre Açıklıklı Ondülin Gövdeli Kirişin Optimum Boyutları

Optimum kesit tasarımı	Gövde Kalınlığı (mm)	Gövde Yüksekliği i (mm)	Başlık Kalınlığı (mm)	Dalga Yüksekliği i (mm)	Dalga Boyu (mm)	Minimum Ağırlık (kg)
OGK-330	5	330	8	43	155	176.33

Ondülin gövdeli kirişin tekil yük altında optimum geometrik özellikleri Şekil 3.5.'de gösterilmiştir.

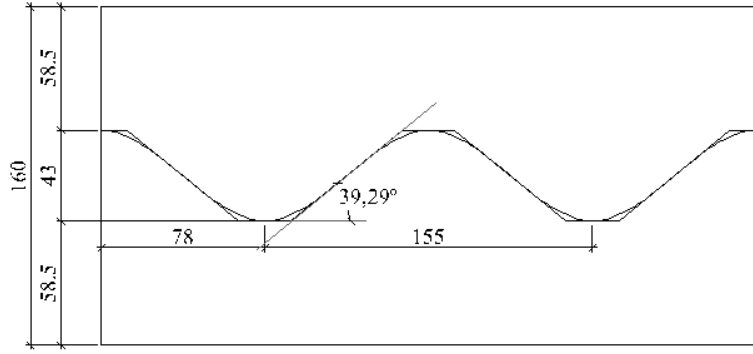


Şekil 3.7. OGK_330 kesit gösterimi

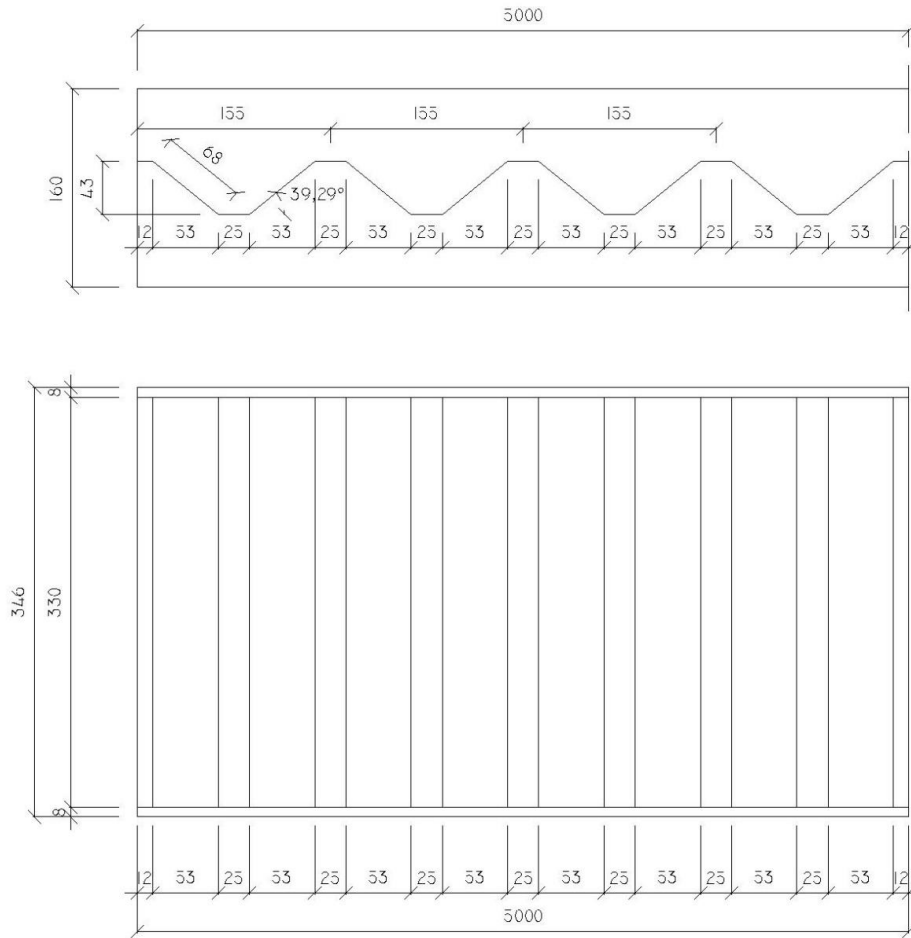


Şekil 3.8. Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş 330 (SGOK_330) boykesit detayı

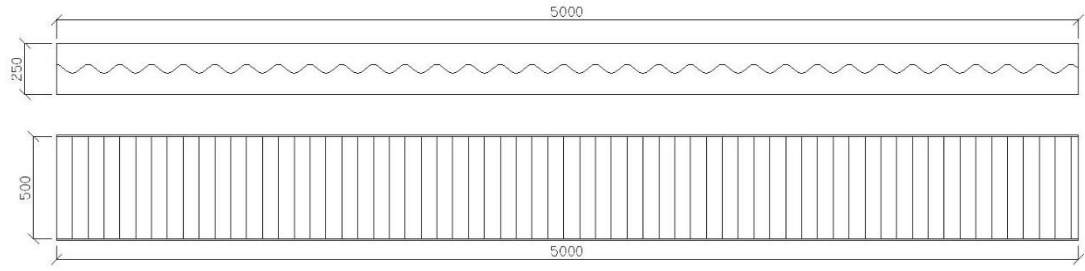
Trapeziodal geometrik formun belirlenmesinde Sinüzoidal gövde geometrik formu baz alınmıştır. Bunun sebebi ise Sinüzoidal gövde formu ile trapeziodal gövde formunun dalga yüksekliği, dalga boyu ve eğim açısı olarak aynı ölçülere sahip olması ile yapılacak gövde kıyaslamasında davranışın daha doğru olması sağlanmıştır. Şekil 3.7’de



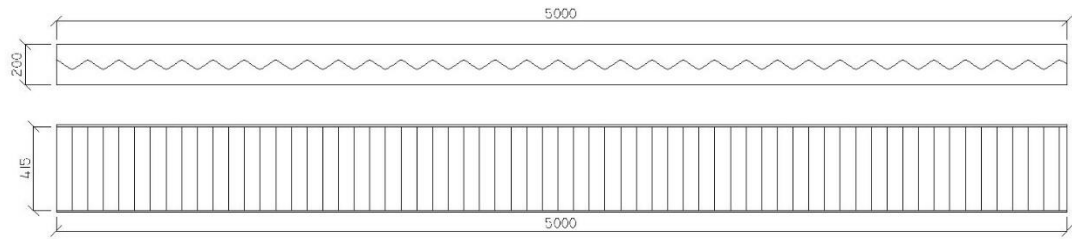
Şekil 3.9. Sinüzoidal gövde ile trapeziodal gövde geometrisinin üst üste oturtulması



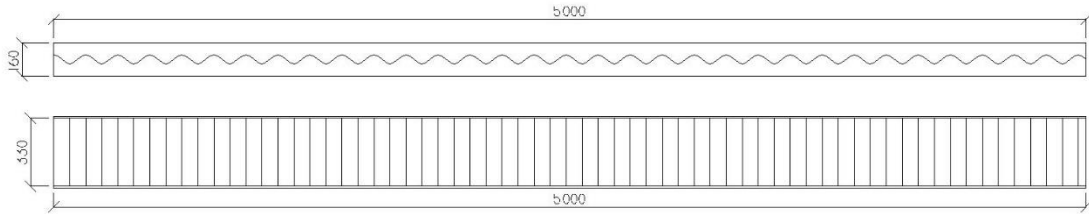
Şekil 3.10. Trapeziodal gövdeli ondülin kiriş 330 (TGOK_330) boykesit detayı



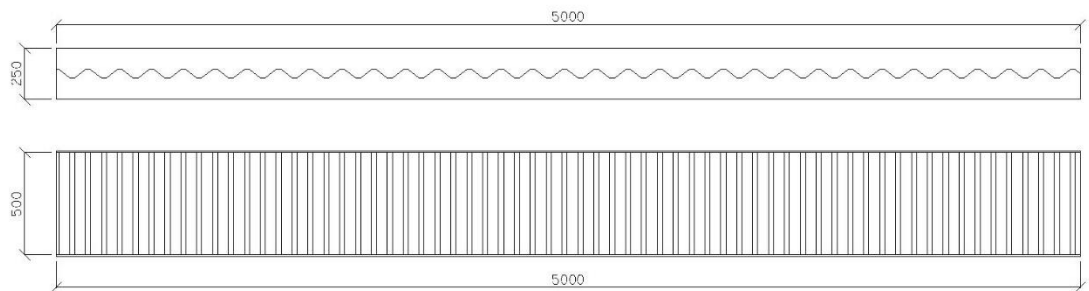
Şekil 3.11. Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş 500 (SGOK_500) gösterimi



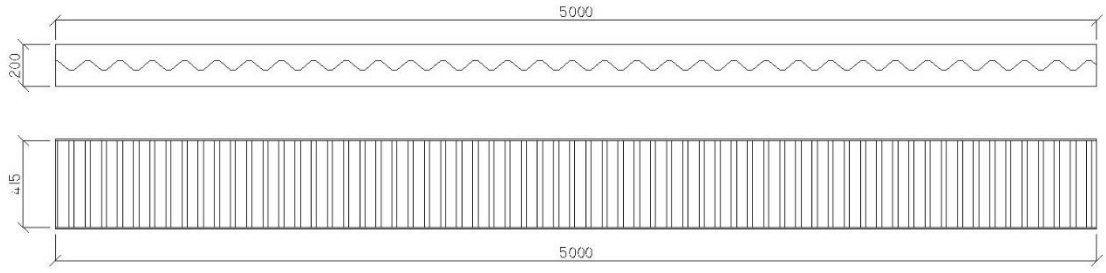
Şekil 3.12. Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş 415 (SGOK_415) gösterimi



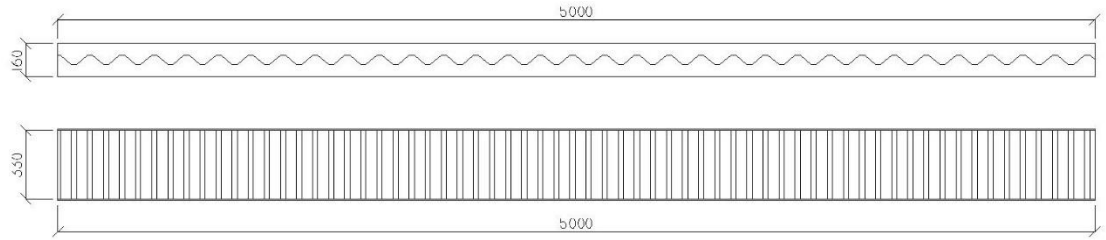
Şekil 3.13. Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş 330 (SGOK_330) gösterimi



Şekil 3.14. Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş 500 (TGOK_500) gösterimi



Şekil 3.15. Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş 415 (TGOK_415) gösterimi



Şekil 3.16. Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş 415 (TGOK_415) gösterimi

3.6. Kirişlerin Deney Öncesi Hazırlıkları

3.6.1. Ondülin gövdeli kirişleri elde edilmesi

Malzeme özellikleri aynı ince gövde levhası ile alt ve üst başlıkların kesilmesi, gövdenin optimize edilmiş geometrisine göre soğuk şekillendirilerek bükülmesi ve gövde ile başlıkların kaynaklanarak oluşturulması ile ondülin gövdeli kirişler oluşturulur (Şekil 3.14-3.15).



(a)



(b)

Şekil 3.17. a) Kesimleri yapılmış kiriş gövde levhaları; **b)** Gövde levhalarının bükümlerinin yapıldığı kalıp



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.18. a) Gövdelerin levhalarının bükülmesi; **b)** Bükümden sonra kaynaklanmaya hazır gövde levhaları; **c)** Gövde levhalarının ve başlıkların birleştirilmesi; **d)** Gövde levhası ile başlıkların kaynaklanması; **e)** Kaynakları tamamlanmış bir SGOK; **f)** Kumlama ve boya işleminden sonra teste hazır SGOK

3.6.2. Kirişlerin test edilmesi

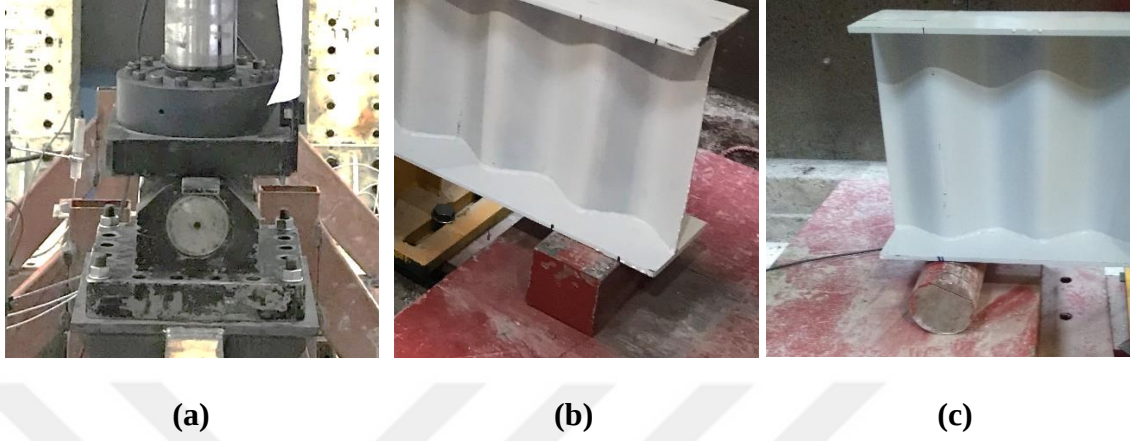
Ondülin gövdeli kirişler (OGK), genellikle ara mesnet gerektirmeyen büyük açıklıkları geçmek için kullanıldıklarından dolayı kiriş uzunlukları 5 metre seçilmiş ve her kiriş tipi için iki tekrar yapılmıştır. Bu amaçla stokastik yöntemler kullanılarak optimum boyutlandırılan Sinüzoidal ve trapezoidal gövde formlu üretilen, Çizelge 3.3.'te listelenen 24 adet ondülin gövdeli kiriş üretilmiştir. Deneylerin yapıldığı yükleme çerçevesi eğilme deneylerinin yapılmasına olanak sağlayabilecek kapasiteye sahiptir. Bu sistemde, üretilen ondülin gövdeli kirişlerin sırasıyla yayılı, iki noktalı yüklemeler altında yük kapasiteleri ve davranışları incelenmiştir.

Yapılan deneylerde OGK_330'lerin tamamı Karaman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği yapı labrotuvarında, OGK_415 ve OGK_500'lerin tamamı Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Labratuvarında yapılmıştır.

Çizelge 3.3. Kirişlerin adlandırılması ve uygulanan yükleme tipleri

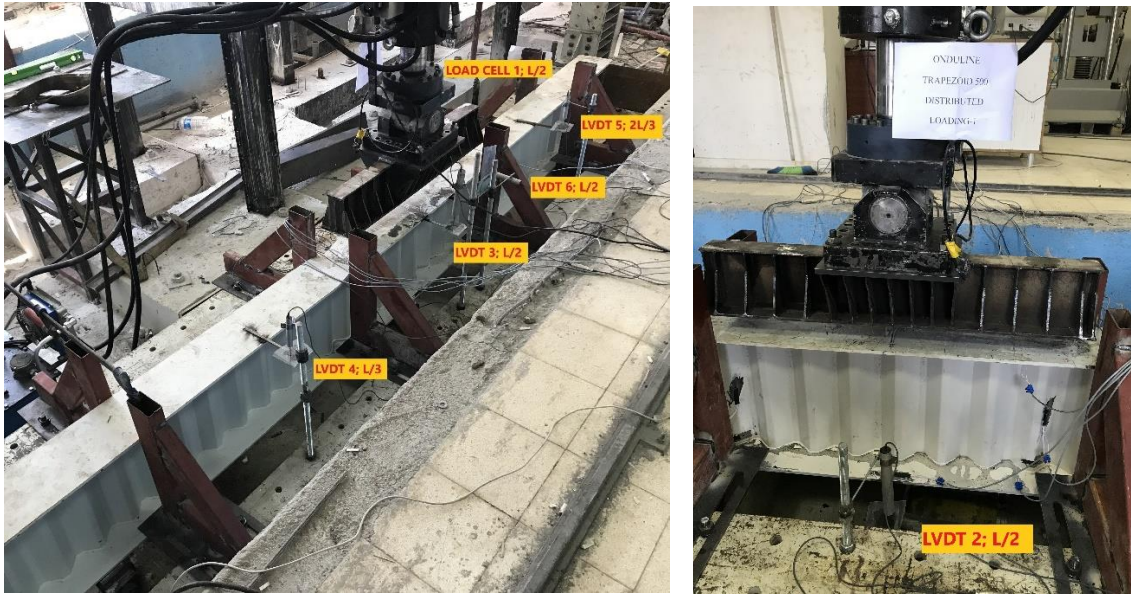
Test	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Test Sayısı
SGOK_500	Yayılı	Sinüzoidal	2
SGOK_415	Yayılı	Sinüzoidal	2
SGOK_330	Yayılı	Sinüzoidal	2
SGOK_500	İki Noktalı	Sinüzoidal	2
SGOK_415	İki Noktalı	Sinüzoidal	2
SGOK_330	İki Noktalı	Sinüzoidal	2
TGOK_500	Yayılı	Trapezoidal	2
TGOK_415	Yayılı	Trapezoidal	2
TGOK_330	Yayılı	Trapezoidal	2
TGOK_500	İki Noktalı	Trapezoidal	2
TGOK_415	İki Noktalı	Trapezoidal	2
TGOK_330	İki Noktalı	Trapezoidal	2

Kirişe etki edecek yükün daha hassas değerlerle okunması amacıyla hidrolik pistonla kalibrasyonu yapılmış 1000 kN kapasiteli yük hücresi monte edilmiştir (Şekil 3.15). Kirişler, bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnetlerin üzerine eksantrik bir yükleme olmamasına dikkat edilerek yerleştirilmiştir (Şekil 3.16).



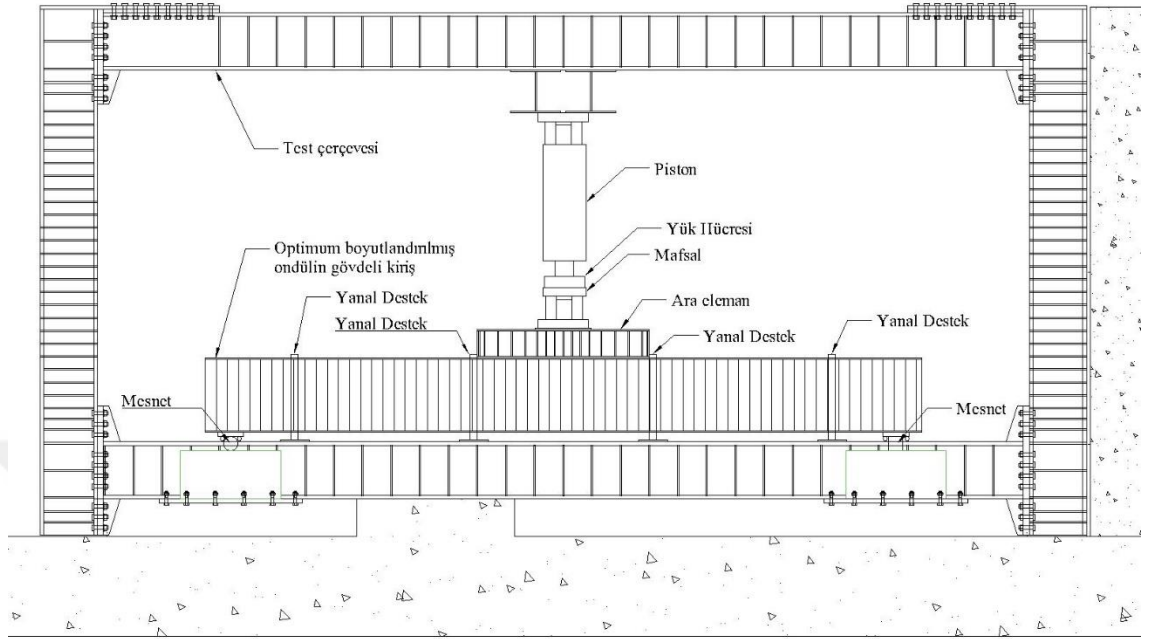
Şekil 3.19. a) Yük hücresi; b) Sabit mesnet sistemi; c) Hareketli mesnet sistemi

Yüklemeler sonucunda kirişlerde oluşacak deplasmanları ölçmek için deplasman ölçerler (doğrusal değişken diferansiyel transformatörler-LVDT) 5000 mm uzunluğundaki kirişin üst başlığına düşey ölçüm yapmak için $L/4$, $L/3$ ve $L/2$ mesafelerine konumlandırılmıştır, alt başlığında düşey ölçüm yapabilmek için $L/2$ mesafesine bir deplasman ölçer konumlandırılmıştır, yanal deplasmanları ölçebilmek için ise $L/2$ mesafesine üst başlık kenarına yatay olarak bir deplasman ölçer konumlandırılmıştır. Deplasman ölçerlerin yükleme çerçevesindeki konumları Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



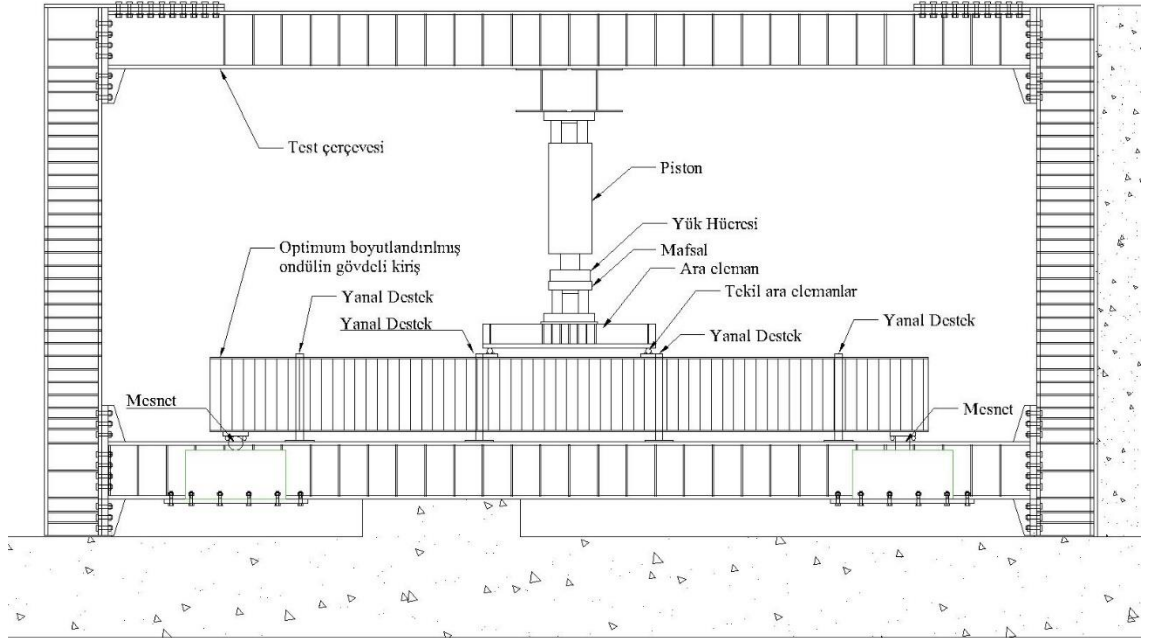
Şekil 3.20. Loadcell (Yük Hücresi) ve LVDT (Deplasman ölçer) konumları ile numaraları

Deneyleri yapılan ondülin gövdeli kirişlerde yayılı yükleme altında kullanılan test düzeneği şekil 3.18’de gösterilmiştir.

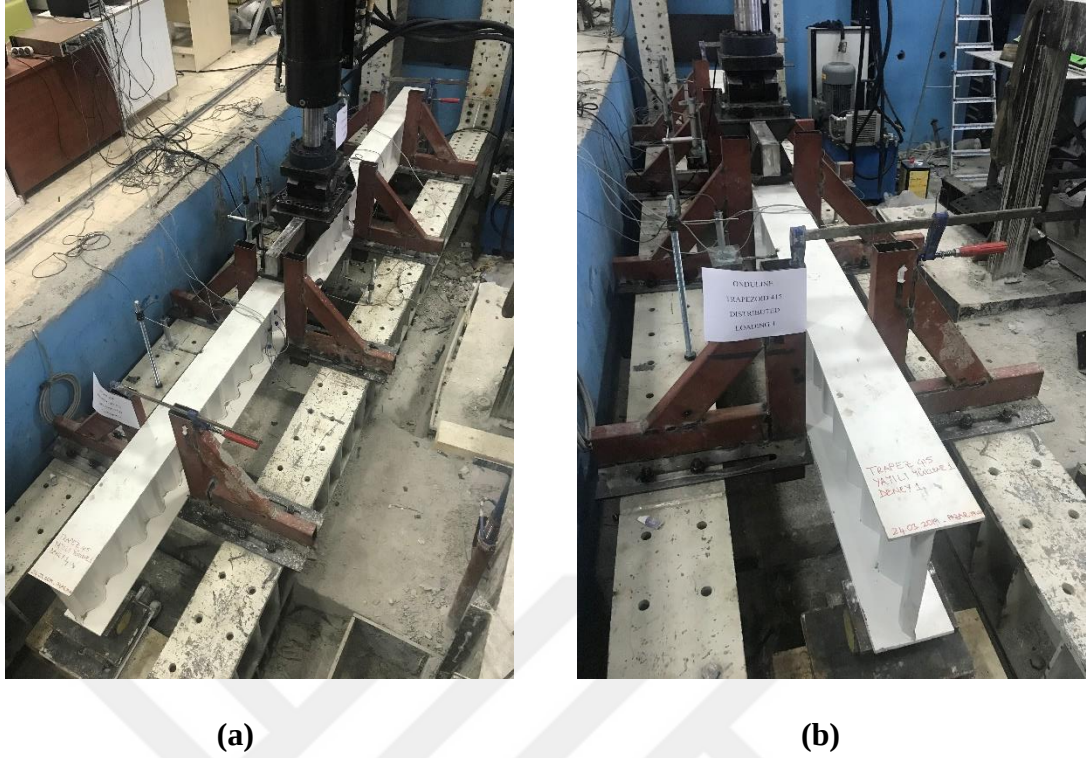


Şekil 3.21. Yayılı yükleme test düzeneği

Deneyleri yapılan ondülin gövdeli kirişlerde iki noktalı yükleme altında kullanılan test düzeneği şekil 3.19’da gösterilmiştir.



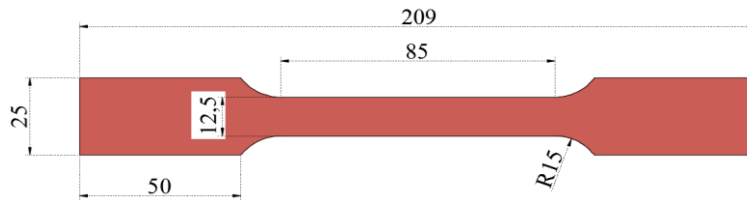
Şekil 3.22. İki noktalı yükleme test düzeneği



Şekil 3.23. (a) Tekil yükleme test düzeneği sağ taraftan görünüş; **(b)** Tekil yükleme test düzeneği sol taraftan görünüş

3.7. Kirişlerin Mukavemet Özelliklerinin Belirlenmesi

DeneySEL verilerden elde edilen sonuçlar ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının kıyaslanması amacıyla analizde kullanılmak üzere malzeme mukavemet özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla başlıklardan ve gövde levhalarından olmak üzere her kalınlıkta elemandan 4'er adet olmak üzere toplamda 24 adet kupon alınmıştır. Boyutları *American Society for Testing and Materials (ASTM)* yönetmeliğine göre belirlenen (Şekil 3.21) numuneler levhalardan CNC (Bilgisayar Nümerik Kontrolü) ile Şekil 3.22'de gösterildiği gibi alınmış ve çekme testi yapılmıştır (Şekil 3.23-3.24). Tüm kupon testleri tarafından Karamanoğlu Mehmetbey üniversitesinde yapılmıştır.



Şekil 3.24. Farklı kalınlıktaki her levhadan alınan numunelerin boyutları



Şekil 3.25. Ondülin gövdeli kirişlerden alınan numune örnekleri

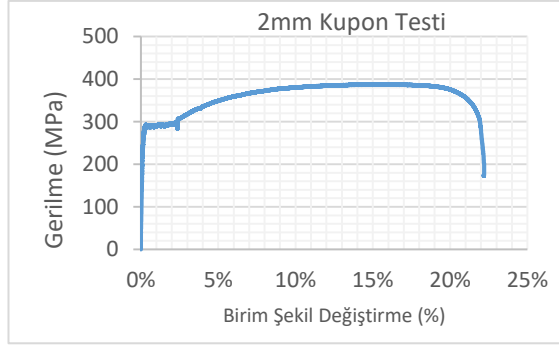


Şekil 3.26. Karamanoğlu Mehmetbey üniversitesi çekme test cihazı

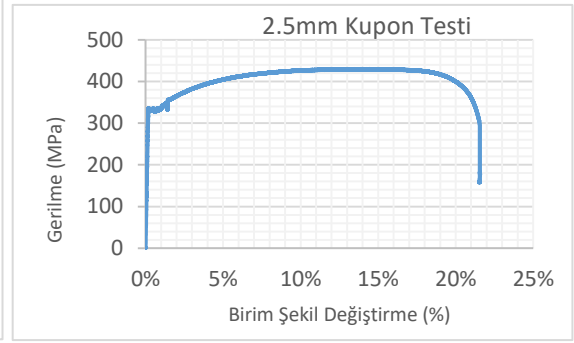


Şekil 3.27. Çekme testi uygulanmış kuponlar numuneleri

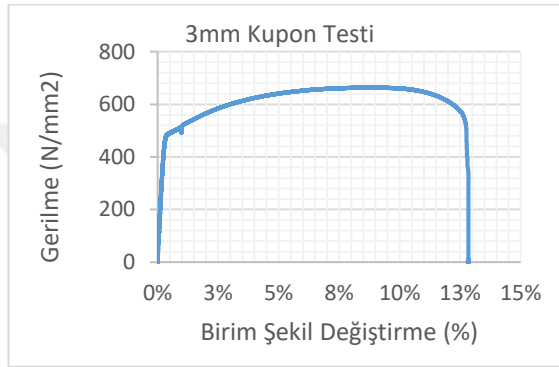
Yapılan çekme testleri sonucunda 2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm levha saclar için ortalama akma gerilmeleri sırasıyla 300 MPa, 325 MPa, 450 MPa, 400 MPa, 375 MPa ve 350 MPa olarak belirlenmiştir. Elastisite modülü ortalama $1,9 \times 10^5$ MPa, (Çizelge 3.4). Şekil 3.25’de çekme testleri neticesinde elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri verilmiştir.



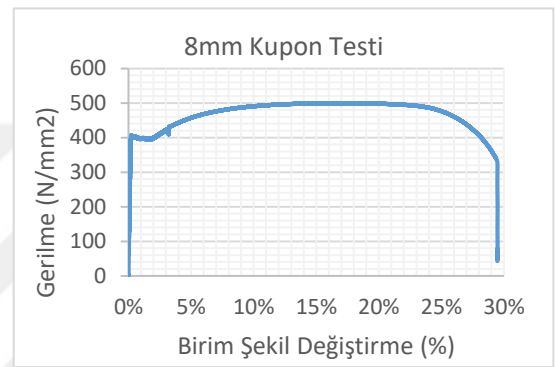
(a)



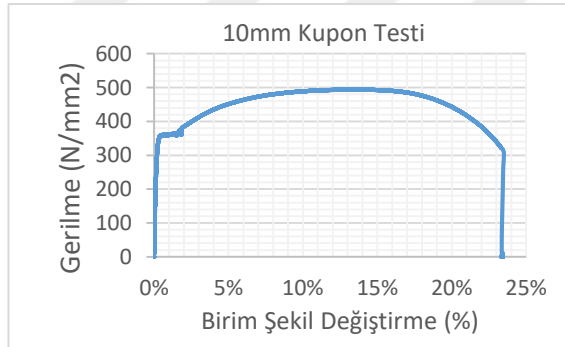
(b)



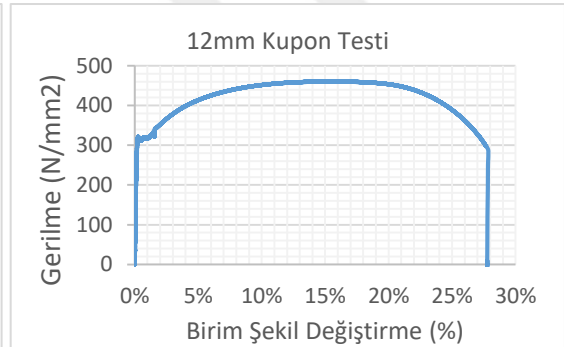
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.28. (a) 2 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; **(b)** 2.5 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; **(c)** 3 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; **(d)** 8 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; **(e)** 10 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği; **(f)** 12 mm levha için kupon gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

Çizelge 3.4. Levhaların mukavemet özellikleri

Kupon	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
2 mm	300	1.9×10^5
2.5 mm	325	1.9×10^5
3 mm	450	1.9×10^5
8 mm	400	1.9×10^5
10 mm	375	1.9×10^5
12 mm	350	1.9×10^5

3.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi

Ondülin gövdeli kirişlerin deneysel kısımda bulunan yük taşıma kapasitelerinin kıyaslanması amacıyla ondülin gövdeli kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi Abaqus/CAE 6.14-1 ile yapılmıştır (Şekil 3.27). Deneysel bölümde yükleme çerçevesinde testleri yapılan her farklı kiriş tipi ve yükleme tipi için bulunan göçme yükleri Abaqus/CAE 6.14-1 programında lineer olmayan analizi yapılacak şekilde simülasyonu ile kiriş üzerinde oluşacak deplasmanların ve eşdeğer gerilmelerin yanı sıra kesme ve normal gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu tez kapsamında yapılan sonlu eleman analizleri aşağıda adım adım açıklanmıştır.

3.8.1. Abaqus/cae 6.14-1 sonlu eleman programında eleman tipleri

Ondülin gövdeli kirişlerin analizinde deney sırasında da kullanılan yanal tutucular sayesinde olabilecek yanal deplasmanlar önlenmiştir. Deney sonuçları da gösteriyor ki; yanal deplasmanlar ihmal edilebilecek boyutlardadır ve kirişler hiçbir şekilde kalıcı yanal deformasyona maruz kalmamıştır. (Sadece SGOK_330 deney elemanında bir kalıcı yanal deformasyon gözlemlenmiştir, bunun sebebi ise, kullanılan ara elemanın deney sırasında eksenden kaçarak yüklemenin bir eksantrisite oluşturmasıydı).

Abaqus/CAE 6.14-1 sonlu elemanlar analiz programında analizlerinin yapılabilmesi için birçok eleman tipi bulunmaktadır.

Katı elemanlar da iyi bir eğilme davranışı için tercih edilebilecek eleman tipleri ve açıklamaları;

İkinci mertebeden izoparametrik elemanlar (Second-order isoparametric elements); Bu elemanlar ikinci dereceden yer değiştirme alanlarını çoğaltabilir, böylece herhangi bir kayma gerginliği olmadan saf bir bükülme tepkisi modelleme imkânı verir. Sadece Abaqus / Standard'ta mevcuttur.

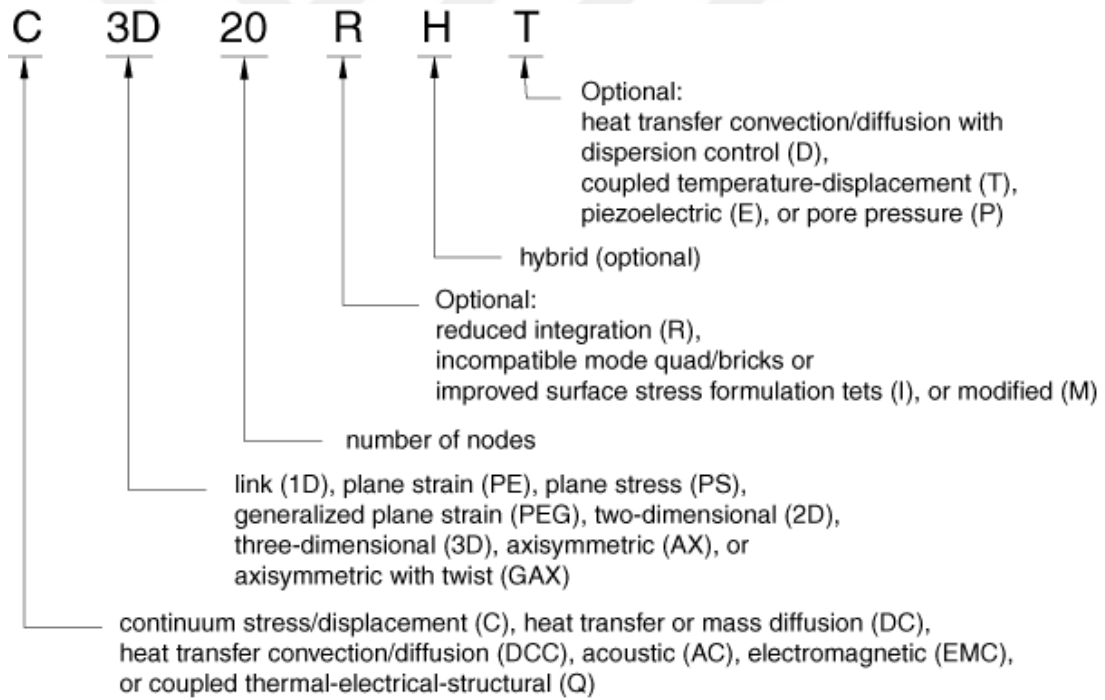
Uyumsuz mod elemanları (Incompatible mode elements); Doğrusal izoparametrik elemanlara uyumsuz modların eklenmesi, makaslama kilidini ortadan kaldırır ve bu elemanların mükemmel bükülme özelliklerine sahip olmasını sağlar.

Azaltılmış entegrasyon doğrusal izoparametrik elemanlar (Reduced-integration linear isoparametric elements); Eleman zorlanma enerjisinin değerlendirilmesinde azaltılmış entegrasyon kayma kilitleme fenomenini ortadan

kaldırır. Bu öğeler hem Abaqus / Standard hem de Abaqus / Explicit'te mevcuttur. Genel olarak, bükülme tepkisini doğru bir şekilde modellemek için kalınlık boyunca çoklu azaltılmış entegrasyon elemanlarına ihtiyaç duyulur. Bununla birlikte, Abaqus / Standard ve Abaqus / Explicit'teki gelişmiş kum saati kontrol yaklaşımı, kaba bir ağda bile iyi bükülme davranışı sağlayabilir. Gelişmiş kum saati kontrolü kullanılarak azaltılmış entegrasyon elemanları ile elde edilen doğrusal elastik malzemeler için yer değiştirme çözeltileri, her ikisi de aynı tür gerilme formülasyonuna dayandığından uyumsuz mod elemanları ile elde edilenlerle yakından eşleşir.

Devamlı kabuk elemanları (Continuum shell elements); Bu elemanlar kabuk elemanlarına benzer davranır ve bu nedenle bükme davranışının hakim olduğu ince yapıların modellenmesinde etkili bir şekilde kullanılabilir. (Simulia Abaqus 6.14 Benchmark Guide; 2.3.5 Performance of continuum and shell elements for linear analysis of bending problems, 2014)

Abaqus'te eleman tiplerinin isimlendirme düzeni; Katı elemanların adlandırma kuralları, eleman boyutuna bağlıdır. Abaqus'te bir boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve eksenel simetrik katı elemanlar Şekil 3.26'ya göre sıralanır.



Şekil 3.26. Abaqus'te eleman tiplerinin isimlendirme düzeni (Simulia Abaqus 6.14 Benchmark Guide; 28.1.1 Solid (continuum) elements; 2014)

3.8.2. Ağ tipinin ve eleman tipinin belirlenmesi

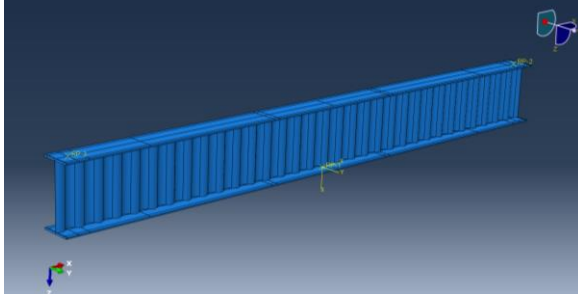
Basit eğilme altında en iyi davranışı gösterecek olan C3D8I eleman tipi seçilmiştir. (Simulia Abaqus 6.14 Benchmark Guide; 2.3.5 Performance of continuum and shell elements for linear analysis of bending problems, 2014). Fakat diğer elemanların davranışları da bu tez kapsamında incelenmiştir Çizelge 3.5'te görülen eleman tiplerine

göre 6 farklı SGOK_500 eleman için analiz yapılmış ve deneysel sonuç ile kıyaslaması yapılarak en fazla yakınsamanın hangi eleman tipi ve mesh tipine karşılık geldiği incelenmiştir. Tüm analizler 15mm mesh gözeneği olacak şekilde yapılmıştır.

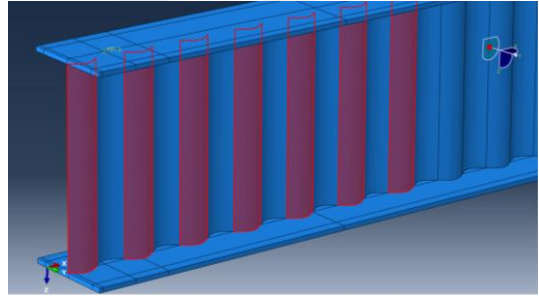
Çizelge 3.5. Eleman ile mesh tiplerine karşılık gelen düğüm ve eleman sayıları

Ağ Tipi (Mesh Type)	Eleman Tipi (Element Type)	İkinci Mertebe Etkisi (Second- order)	Ağ Boyutu (Mesh Size)	Düğüm Sayısı (Node)	Eleman Sayısı (Element)
Hex	C3D8I	Açık	15 mm	49300	23523
Hex	C3D8R	Açık	15 mm	49300	23523
Hex	C3D8I	Kapalı	15 mm	49300	23523
Hex-Dominant	C3D8I	Açık	15 mm	49300	23523
Terrahedron	C3D10	Açık	15 mm	245250	127640
Sweep	C3D8I	Açık	15 mm	49300	23523

Çizelge 3.5’te görüldüğü üzere Tetrahedron dışındaki tüm mesh tiplerine karşılık gelen düğüm sayısı ve eleman sayısı aynı çıkmıştır. Bunun sebebi ise Şekil 3.27’de görüldüğü gibi kiriş gövde levhasındaki her bir dalganın tamamen eşit ve simetrik bir şekilde parçalara ayrılmasıdır. Gövde levhası düzgün ve iyi mesh yapılabilir şekilde parçalandığı için mesh boyutları da aynı çıkmıştır.

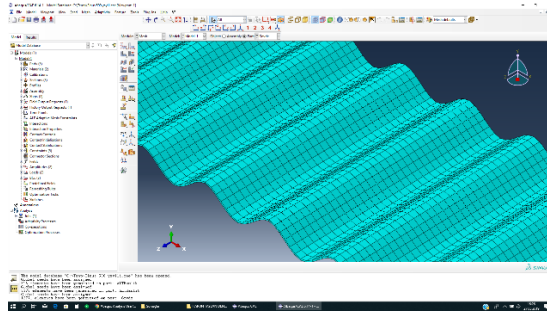


(a)

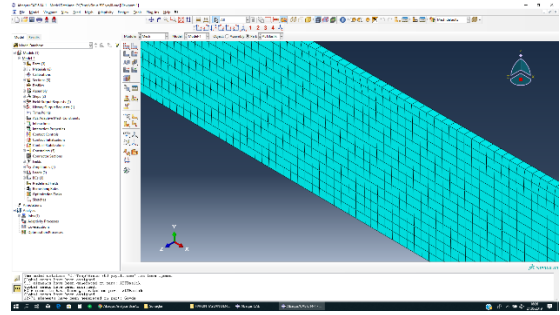


(b)

Şekil 3.29. (a) SGOK_500 elemanının katı modelinin oluşturulması; (b) SGOK_500 elemanının gövde gövdesinin parçalara ayrıldığının gösterimi

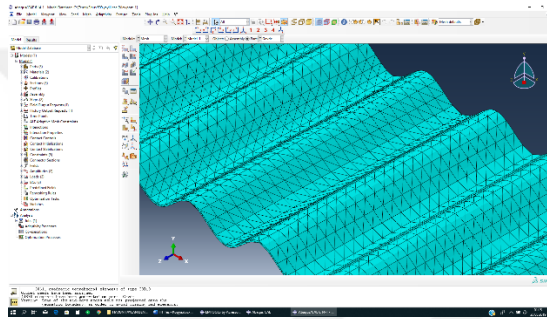


(a)

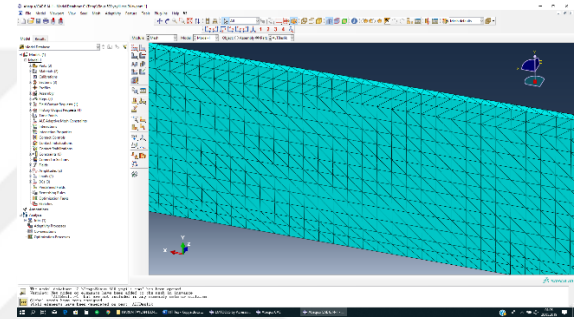


(b)

Şekil 3.30. (a) C3D8I eleman tipinde Hex mesh yapılmış gövde levhası; (b) C3D8I eleman tipinde Hex mesh yapılmış başlık

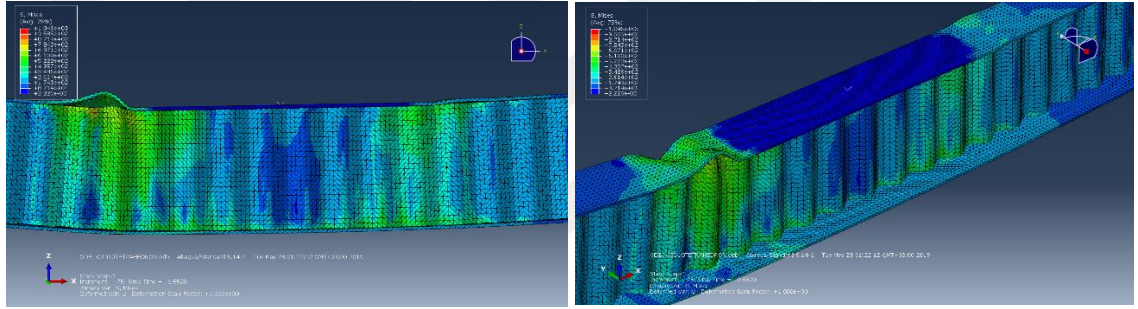
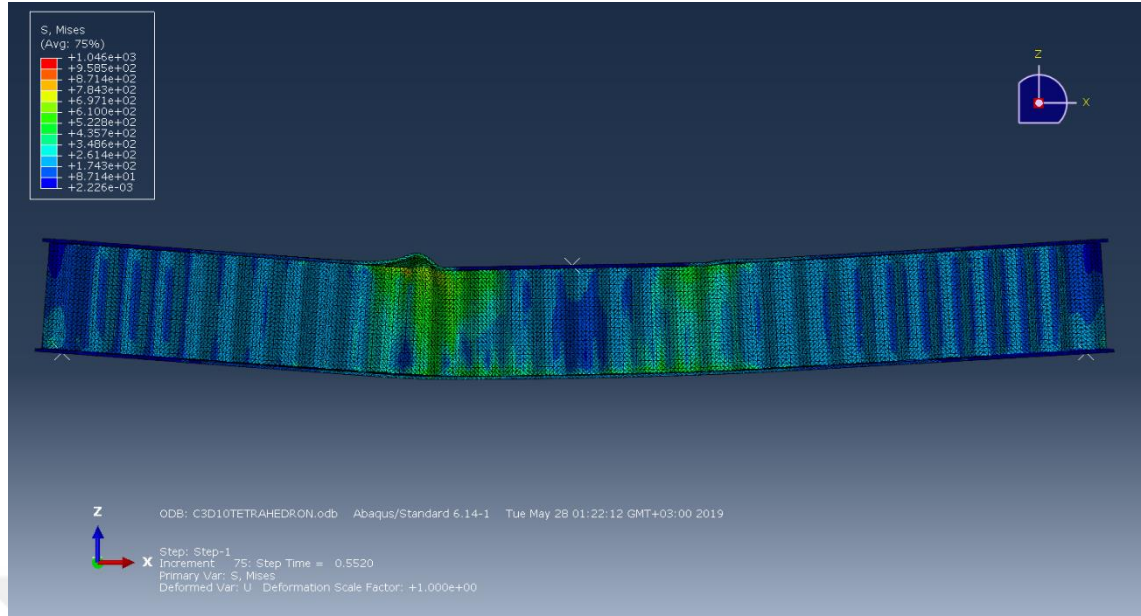


(a)

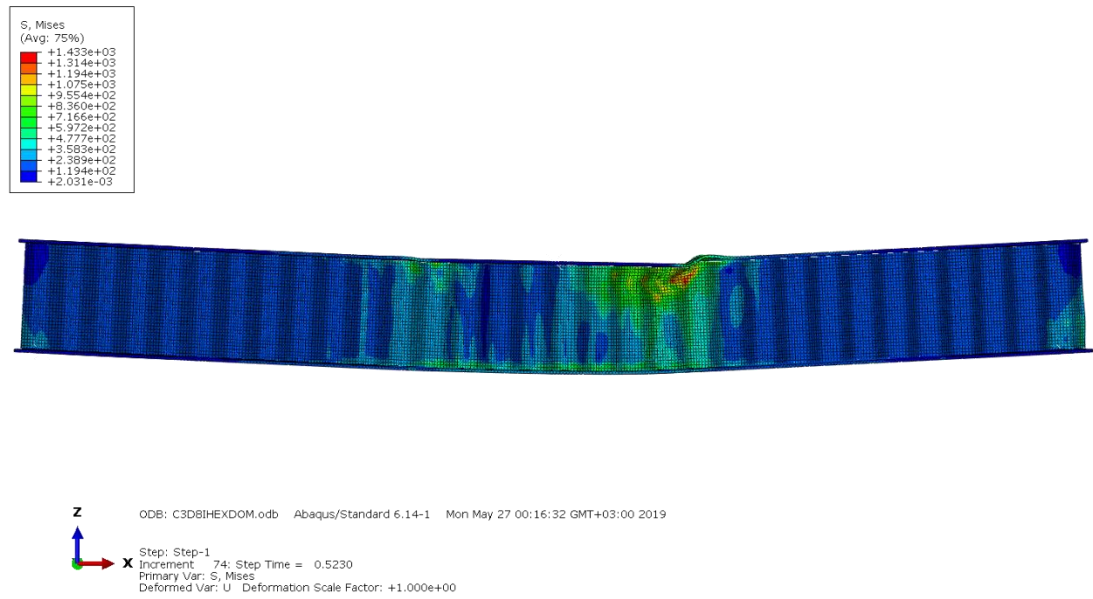


(b)

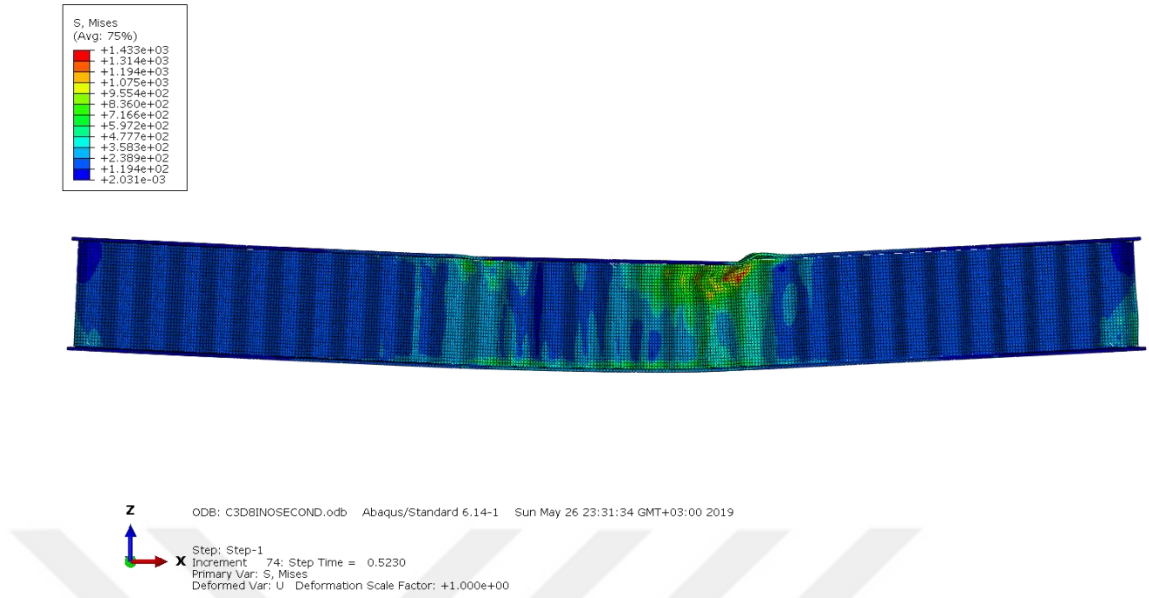
Şekil 3.31. (a) C3D10 eleman tipinde Tetrahedron mesh yapılmış gövde levhası; (b) C3D10 eleman tipinde Tetrahedron mesh yapılmış başlık



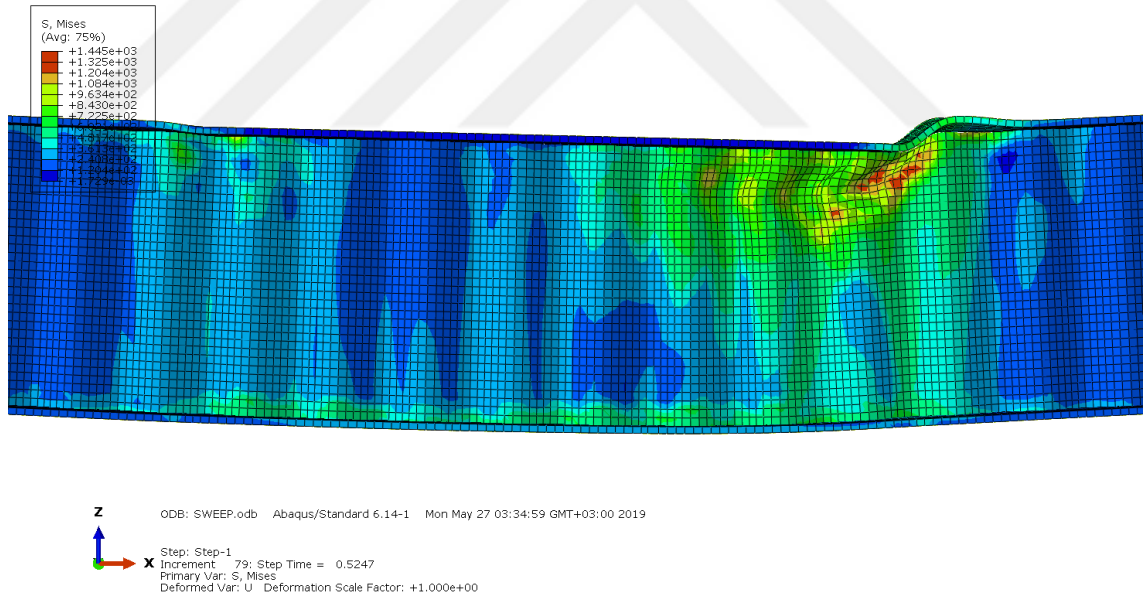
Şekil 3.32. C3D10 eleman tipinde Tetrahedron mesh SEA deformasyon sonucu



Şekil 3.33. C3D8I eleman tipinde Hex-Dominant mesh SEA deformasyon sonucu



Şekil 3.34. C3D8I eleman tipinde Hex-Dominant mesh SEA deformasyon sonucu (ikinci mertebe etkisi kapalı)



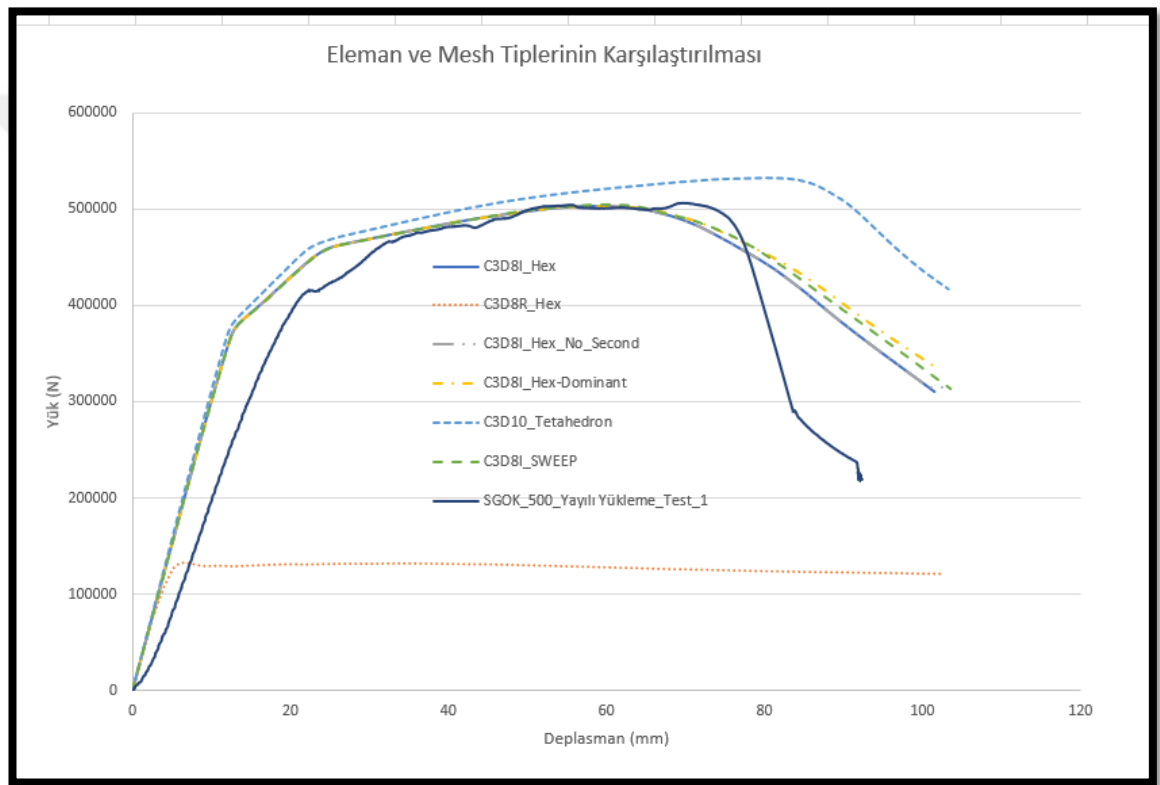
Şekil 3.35. C3D8I eleman tipinde Sweep mesh SEA deformasyon sonucu

SGOK_500 elemanı üzerinde farklı eleman tiplerine ve farklı mesh tiplerine göre yapılan analiz sonuçlarında SGOK_500 için deneyi yapılan elemanın sonuçları kapasite, sehim ve deformasyon açılarından kıyaslanmıştır. Karşılaştırmalı grafikler Şekil 3.33'de verilmiştir.

C3D10 eleman tipinde Tetrahedron mesh SEA deformasyon sonucu incelendiğinde deneysel sonucun deformasyonu (Şekil 4.2) ile tutarsız olduğu ve kapasitesinin de olması gerekenden daha fazla olduğu (Şekik 3.33) gözlemlenmiştir. Deformasyona bakıldığında başlıklar deformasyona uğramış olsa da gövdenin hiçbir şekilde ezilmediği görülmüştür. Dolayısıyla C3D10 eleman tipi Tetrahedron mesh uygulanmayacaktır.

C3D8R eleman tipinde ise kapasite olması gerekenden çok daha düşük çıkmıştır (Şekil 3.34). Dolayısıyla C3D8R eleman tipi de kullanılmayacaktır.

Sonuç olarak Abaqus 6.14'ünde önerdiği üzere basit eğilme altında en iyi davranışı gösteren eleman C3D8I olarak seçilmiş ve Hex mesh tipi uygulanarak bu tez kapsamında bundan sonraki analizlerde bu eleman ve mesh tipi kullanılmıştır.



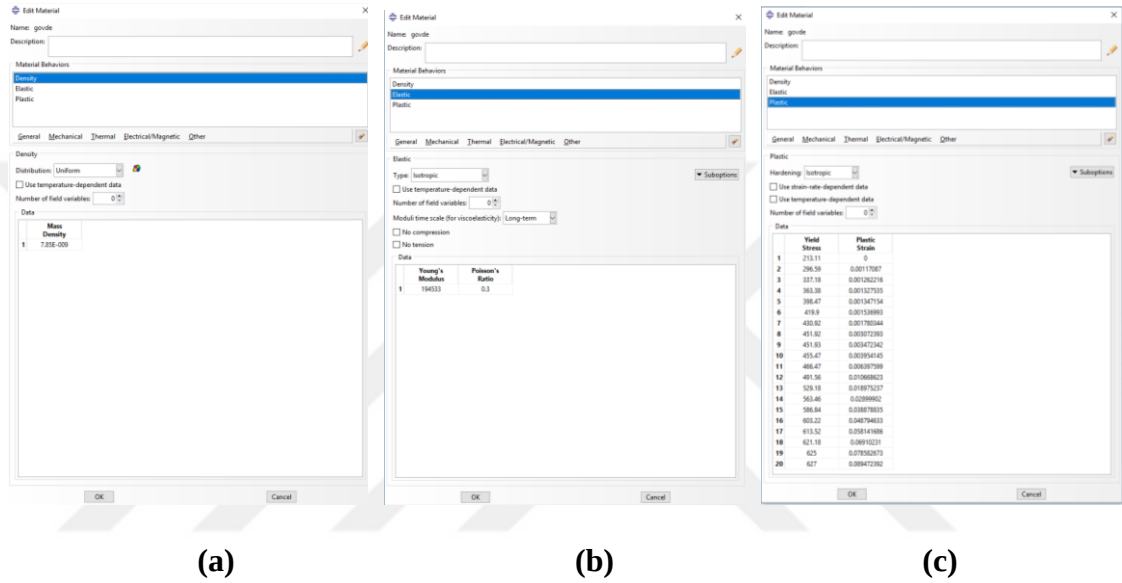
Şekil 3.36. Eleman ve Mesh Tiplerinin Karşılaştırılması

3.8.3. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Tüm kirişlerin akma gerilmeleri için Çizelge 3.5'te gösterilen değerler girilmiştir. Her kiriş için başlık ve gövdesine ayrı ayrı akma değerleri girilmiştir. Elastisite modülleri ise yine Çizelge 3.6'da gösterildiği gibi girilmiştir. Poisson oranı ise 0,3 olarak programa girilmiştir (Çizelge 3.6). Programda malzeme tipi olarak lineer olmayan malzeme seçilmiş olup girilen malzeme değerleri Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir.

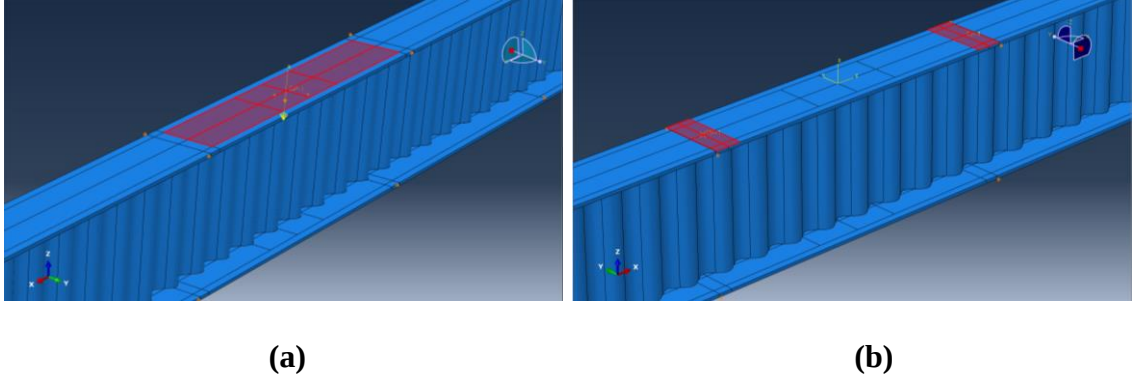
Çizelge 3.6. Levhaların mukavemet özellikleri

SEA	Akma Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
2 mm	300	1.9×10^5	0.3
2.5 mm	325	1.9×10^5	0.3
3 mm	450	1.9×10^5	0.3
8 mm	400	1.9×10^5	0.3
10 mm	375	1.9×10^5	0.3
12 mm	350	1.9×10^5	0.3

**Şekil 3.37.** (a) Malzeme yoğunluğunun girilmesi; (b) Elastisite modülü ve Possion oranının girilmesi; (c) Akma mukavemeti-Platik birim şekil değiştirme

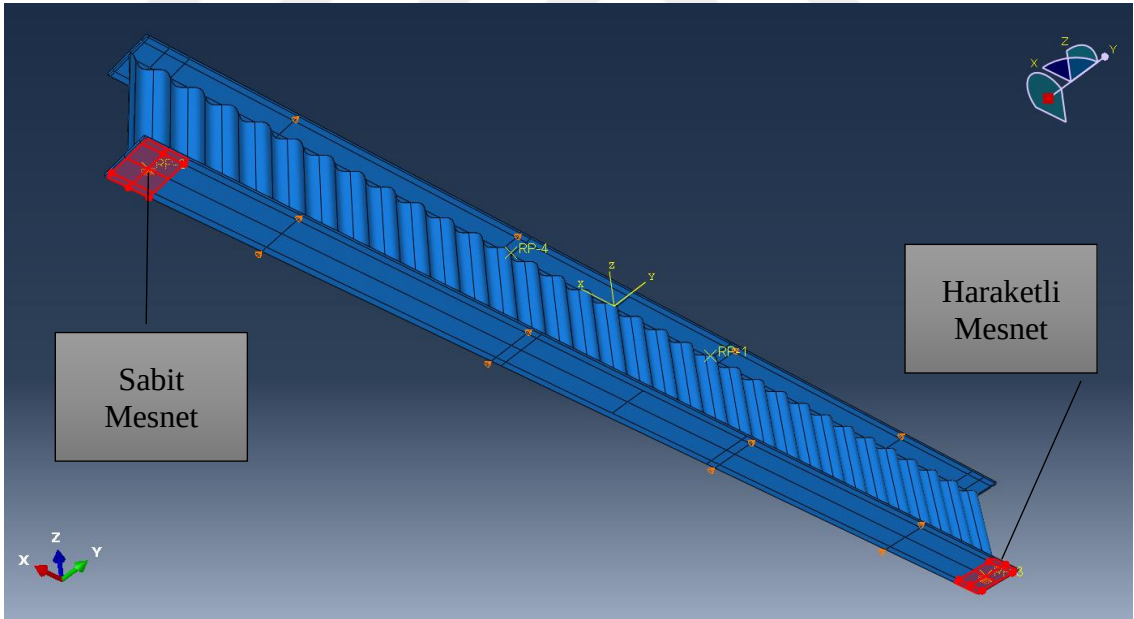
3.8.4. Sınır şartları (mesnetler ve yükler)

Programda kiriş üzerine yükleme yapılırken deneysel çalışmada yükün etki ettirildiği alan baz alınarak modelde de aynı şekilde tanımlanmıştır. Şekil 3.35'te yayılı yükleme ve iki noktadan yükleme altında deneysel çalışma ve model görselleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca kirişin yük altında gerçek davranışına yakın sonuçların elde edilmesi amacıyla yükleme adım adım uygulanmıştır (Şekil 3.36). Yapılan deneylerde kirişlerde gözlemlenen maksimum göçme yükü 566.28 kN olarak ölçülmüştür. Bu bilgiden hareketle sonlu elemanlar analizinde 1000 kN yük, 0.01 artım ile her artımda 10 kN olarak girilmiştir. Yapılan deneylerde yükün etki ettiği alanın altında bir deformasyon gözlemlenmemiştir, deformasyonlar genel olarak tekil veya yayılı yükleme alanlarının hemen bitiminde gözlemlenmiştir, bu sebeple yükün etki ettiği alan ise rijit diyafram olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.38. (a) SGOK_500 yayılı yükleme durumu; (b) SGOK_500 iki noktalı yükleme durumu

Mesnet tanımlamaları sabit mesnet ve hareketli mesnet olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.37). Mesnetler ilk yayılı yükleme deneyi olan SGOK_330_Test_1’de 100 mm genişliğinde kare sabit mesnet, 100 mm çapında silindirik bir hareketli mesnet kullanılmıştır. Yapılan deneyde istenmeyen bir göçme durumu olan silindirik mesnet bölgesinden göçme meydana gelmiştir (Şekil 4.10). Bu göçme tipi istenmediği için kare ve silindirik mesnetlerin üzerlerine 180 mm genişliğinde ve 30 mm kalınlığında plakalar konularak mesnet ile kiriş alt başlığı arasındaki temas yüzeyi artırılmıştır. Daha sonra yapılan deneylerde ise mesnetlerden göçme gözlemlenmemiştir.



Şekil 3.39. SGOK_500 Mesnet tanımlamalar

4. BULGULAR

4.1. Sinüzoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Testleri (yayılı yükleme)

Sinusoidal gövdeli ondülin kiriş (SGOK), yayılı yükleme altında yük taşıma kapasitelerinin ve göçme modlarının tespit edilmesi amacıyla SGOK_500 kirişi için 2 (iki) adet SGOK_415 kirişi için 2 (iki) adet ve SGOK_330 kirişi için 2 (iki) adet eğilme testleri yapılmıştır. (Çizelge 4.1).

DeneySEL verilerin kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup kirişlerin yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması, yük taşıma kapasiteleri, göçme modları ve verilmiştir.

Çizelge 4.1. SGOK (Sinüzoidal gövdeli ondülin kiriş) test sayıları

Test	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Test Sayısı
SGOK_500	Yayılı	Sinüzoidal	2
SGOK_415	Yayılı	Sinüzoidal	2
SGOK_330	Yayılı	Sinüzoidal	2

Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 1000 kN kapasiteye sahip yük hücresi 500 cm açıklıklı kirişin tam ortasından ara elemana etki etmektedir. Ara eleman ise 120cm uzunluğunda kirişin üst başlığına yükü yayarak iletmektedir.

Sinusoidal gövdeli ondülin kirişlerin yayılı yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.1’de ve bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Bölüm 3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sinusoidal gövdeli ondülin kiriş testi; yayılı yükleme durumu

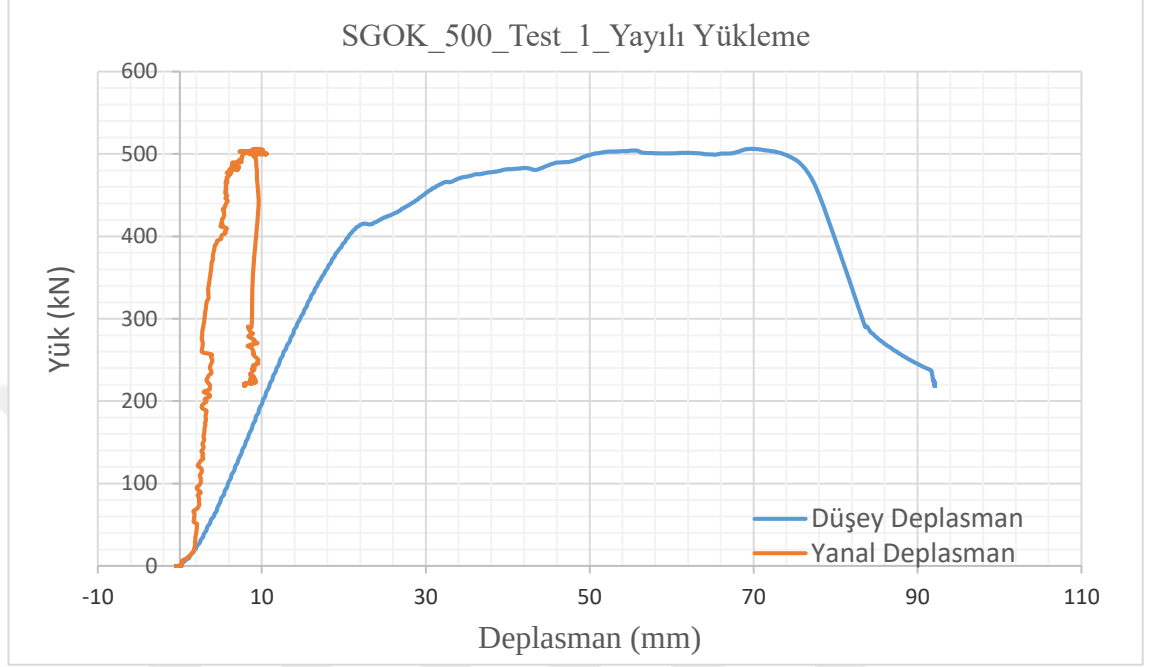
4.1.1. SGOK_500 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3'te detaylı olarak verilen SGOK yayılı yük altında test edilmiştir. SGOK_500 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 506.19 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.2, Şekil 4.3).



Şekil 4.2. SGOK_500 Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları

SGOK_500_Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.3'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yükleme 500 kN'u aştıktan sonra ara elemanın bittiği kısımda hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.3. SGOK_500_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

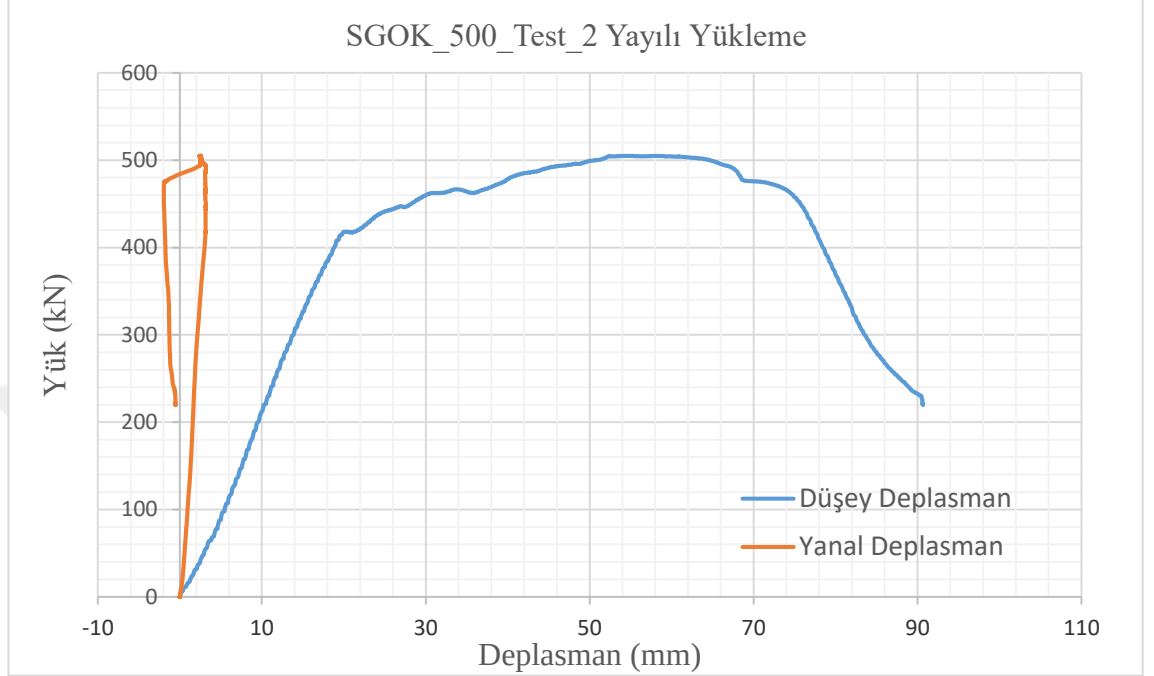
4.1.2. SGOK_500 Test_2

Geometrik özellikleri bölüm 3'te detaylı olarak verilen SGOK yayılı yük altında test edilmiştir. SGOK_500 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 504.60 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.4, Şekil 4.5).



Şekil 4.4. SGOK_500 Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumları

SGOK_500 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.5'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yükleme 500 kN'u aştıktan sonra ara elemanın bittiği kısımda hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.5. SGOK_500_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

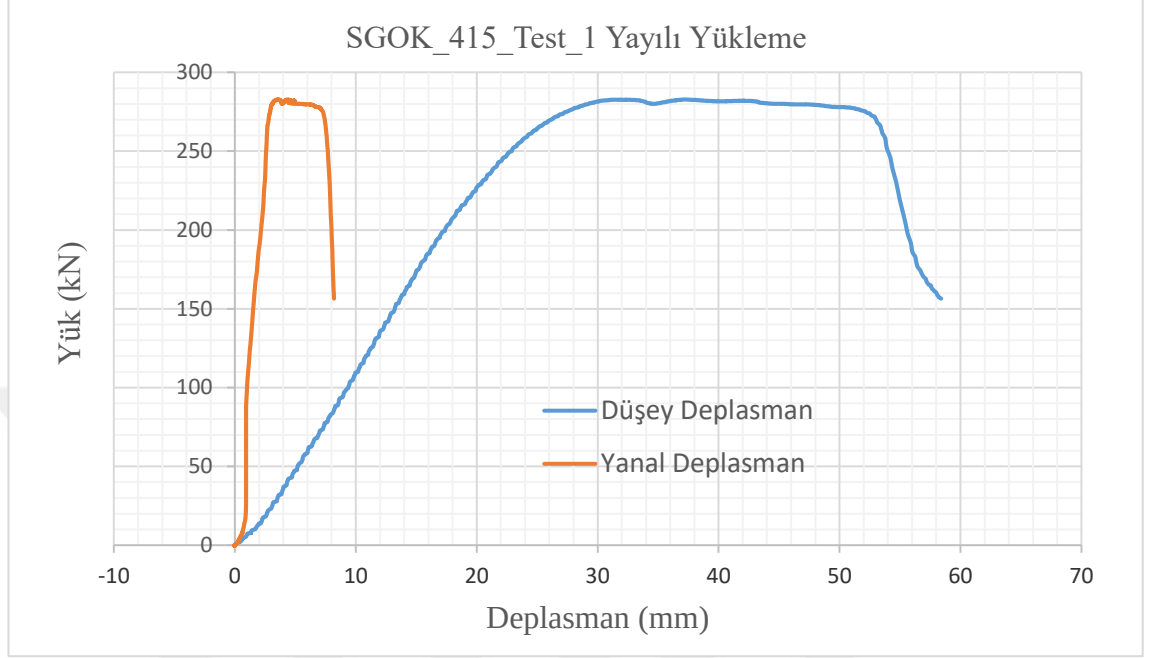
4.1.3. SGOK_415 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3'te detaylı olarak verilen SGOK yayılı yük altında test edilmiştir. SGOK_415 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 282.65 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.6, Şekil 4.7).



Şekil 4.6. SGOK_415 Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları

SGOK_415 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.7’te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yükleme 282 kN’u aştıktan sonra ara elemanın bittiği kısımda hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.7. SGOK_415_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

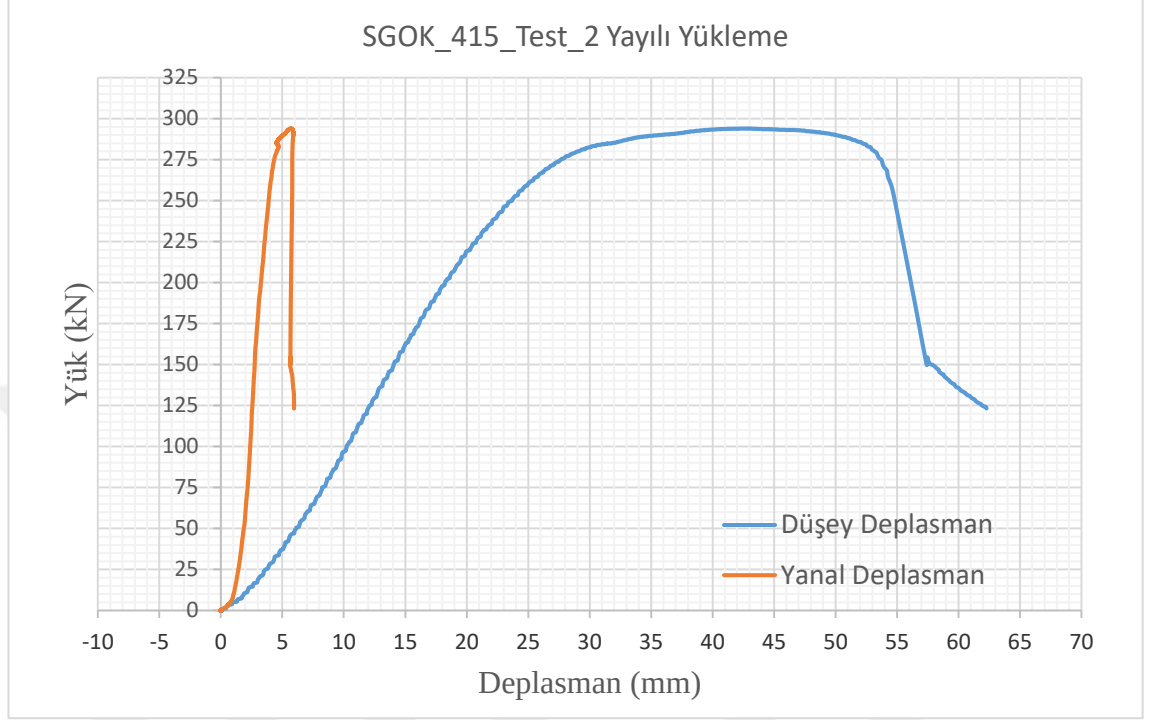
4.1.4. SGOK_415 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3'te detaylı olarak verilen SGOK yayılı yük altında test edilmiştir. SGOK_415 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 293.93 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.8, Şekil 4.9).



Şekil 4.8. SGOK_415 Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumları

SGOK_415 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.9'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yükleme 293 kN'u aştıktan sonra ara elemanın bittiği kısımda hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.9. SGOK_415_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

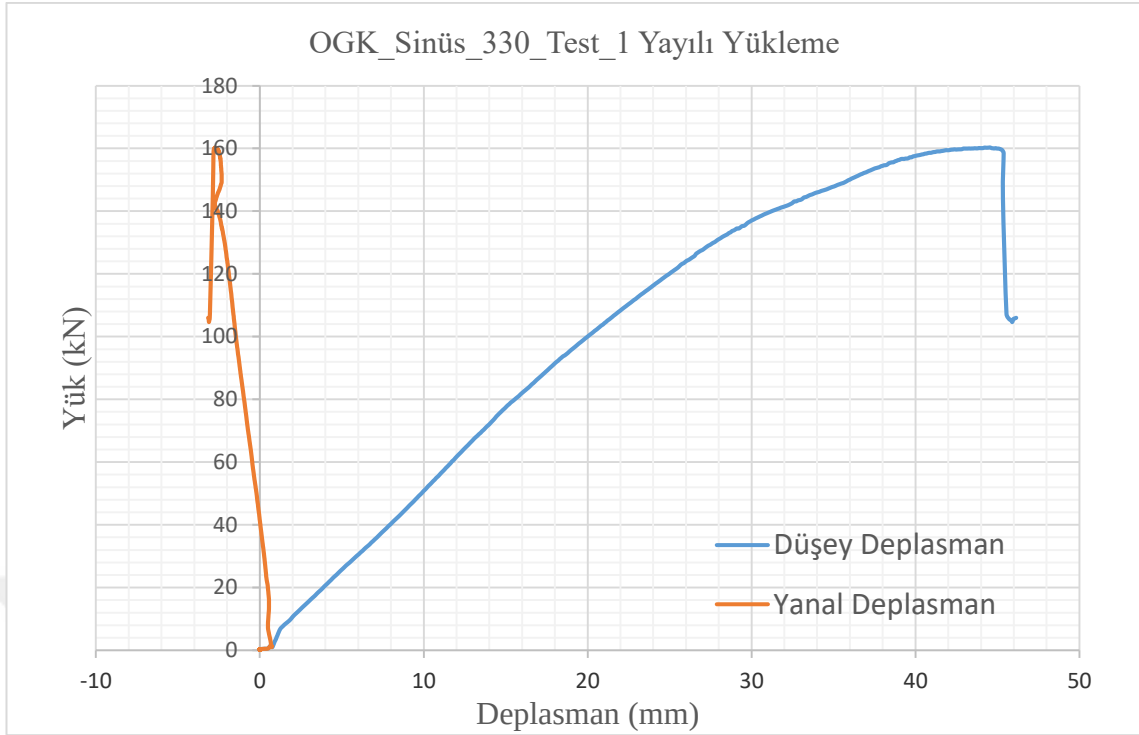
4.1.5. SGOK_330 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3'te detaylı olarak verilen SGOK yayılı yük altında test edilmiştir. SGOK_330 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 160.09 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.10, Şekil 4.11).



Şekil 4.10. SGOK_330 Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları

SGOK_330 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.11'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yükleme 160 kN'u aştıktan sonra hareketli mesnet ile başlıkın temas yüzeyi sadece çizgisel olarak temas ettiği ve yükün o çizgi üzerinde yığıldığından dolayı başlık ile gövde de ciddi deformasyon gözlenmiştir. Bu deney yayılı yükleme altında yapılan ilk deneydi, mesnet bölgesinde gözlemlenen bu ezilme istenmediğinden dolayı daha sonra yapılan tüm deneylerde Bölüm 3'te çizimlerde de görülebileceği gibi mesnet ile başlık arasına 18 cm genişliğinde ve 25 cm boyunda bir plaka yerleştirilmiştir. Bu plakalar yerleştirildikten sonra mesnet bölgesinden göçme bir daha gözlenmemiştir. Bu plaka sadece mesnetin üzerine konularak mesnet tipinin değişmemesine dikkat edilmiştir.



Şekil 4.11. SGOK_330_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

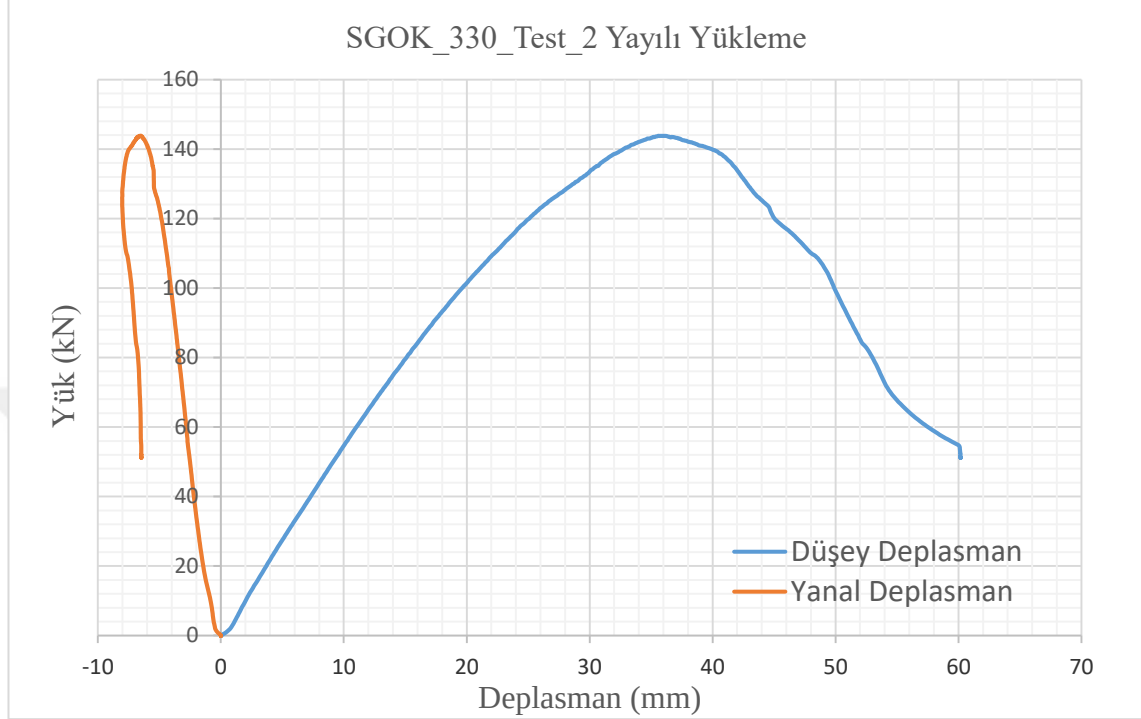
4.1.6. SGOK_330 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3'te detaylı olarak verilen SGOK yayılı yük altında test edilmiştir. SGOK_330 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 142.12 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.12, Şekil 4.13).



Şekil 4.12. SGOK_330 Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumları

SGOK_330 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.13'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yükleme 142.12 kN'u aşıktan sonra ara elemanın bittiği kısımda hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.13. SGOK_330_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

4.2. Sinüzoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Testleri (iki noktalı yükleme)

Sinusoidal gövdeli ondülin kiriş (SGOK), iki noktalı yükleme altında yük taşıma kapasitelerinin ve göçme modlarının tespit edilmesi amacıyla SGOK_500 kirişi için 2 (iki) adet SGOK_415 kirişi için 2 (iki) adet ve SGOK_330 kirişi için 2 (iki) adet eğilme testleri yapılmıştır. (Çizelge 4.2).

DeneySEL verilerin kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup kirişlerin yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması, yük taşıma kapasiteleri, göçme modları ve verilmiştir.

Çizelge 4.2. SGOK (Ondülin gövdeli Sinüzoidal kiriş) test sayıları

Test	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Test Sayısı
SGOK_500	İki Noktalı	Sinüzoidal	2
SGOK_415	İki Noktalı	Sinüzoidal	2
SGOK_330	İki Noktalı	Sinüzoidal	2

Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 1000 kN kapasiteye sahip yük hücresi 500 cm açıklıklı kirişin tam ortasından ara elemana etki etmektedir. Burada 120 cm uzunluğundaki ara eleman ile test kirişi arasına 110 cm aks ile birer adet 3 cm çapında mil konularak iki noktalı tekil yükleme uygulanmıştır.

Sinusoidal gövdeli ondülin kirişlerin iki noktalı yükleme altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.14.'de ve bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Bölüm 3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Sinusoidal gövdeli ondülin kiriş testi; yayılı yükleme durumu

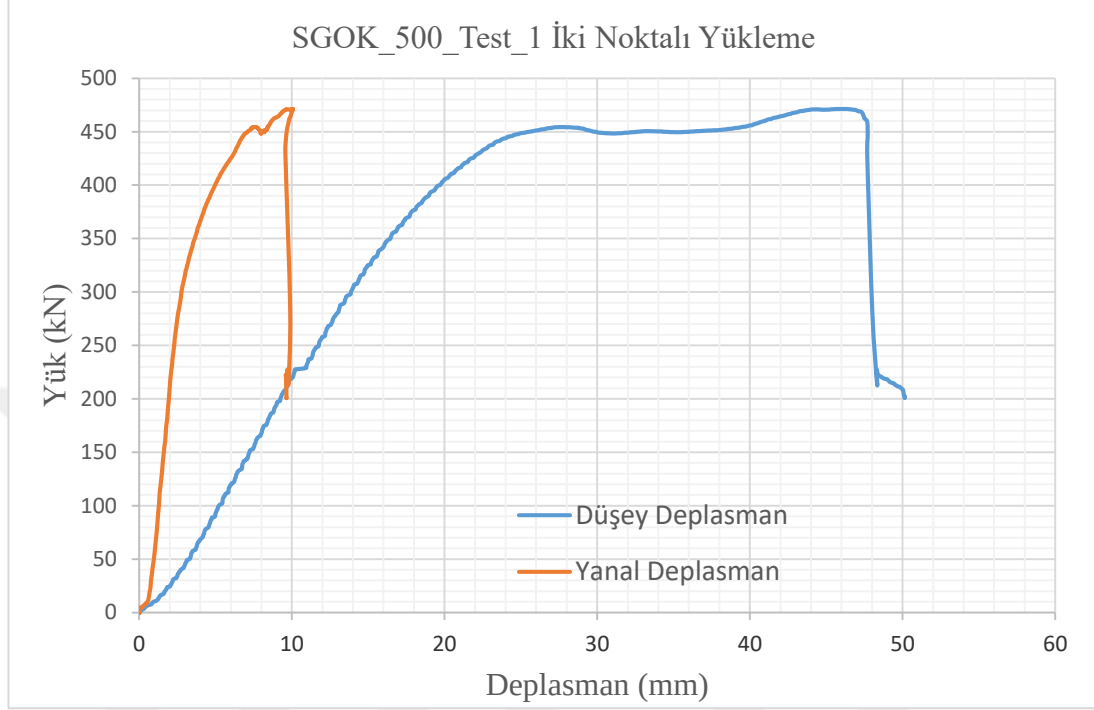
4.2.1. SGOK_500 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen SGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. SGOK_500 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 471.12 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.15, Şekil 4.16).



Şekil 4.15. SGOK_500 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

SGOK_500 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.16’da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 471 kN’u aştıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.16. SGOK_500_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

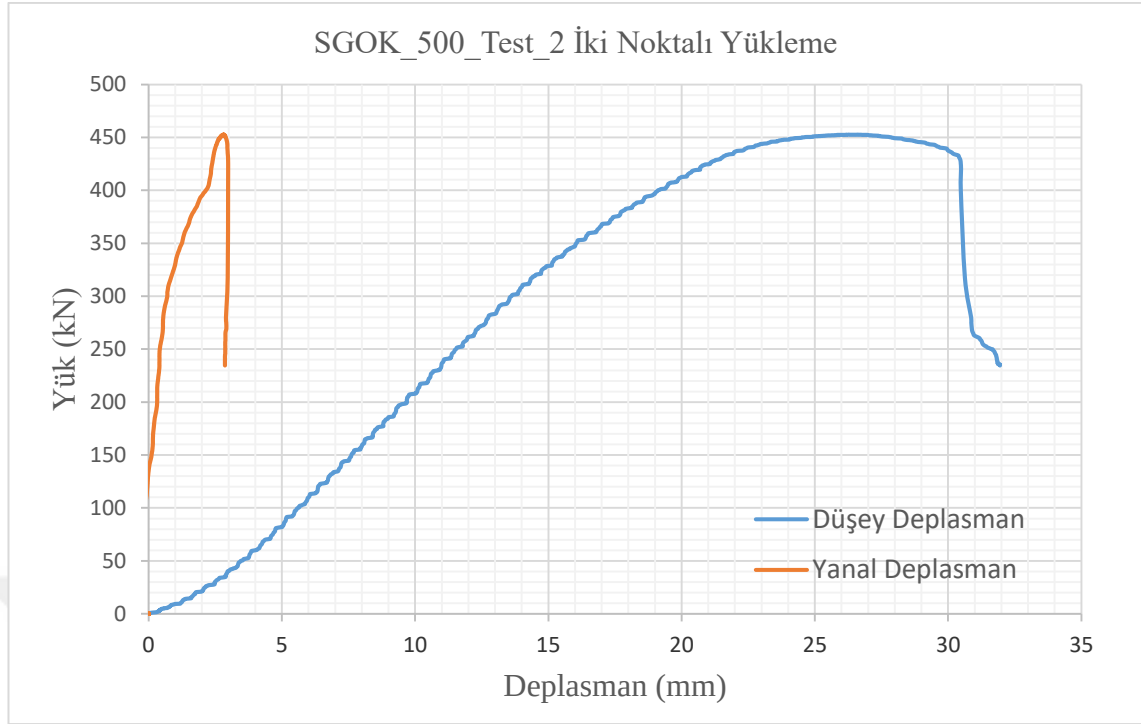
4.2.2. SGOK_500 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen SGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. SGOK_500 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 452.49 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.17, Şekil 4.18).



Şekil 4.17. SGOK_500 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

SGOK_500 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.18’te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 452 kN’u aştıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.18. SGOK_500_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

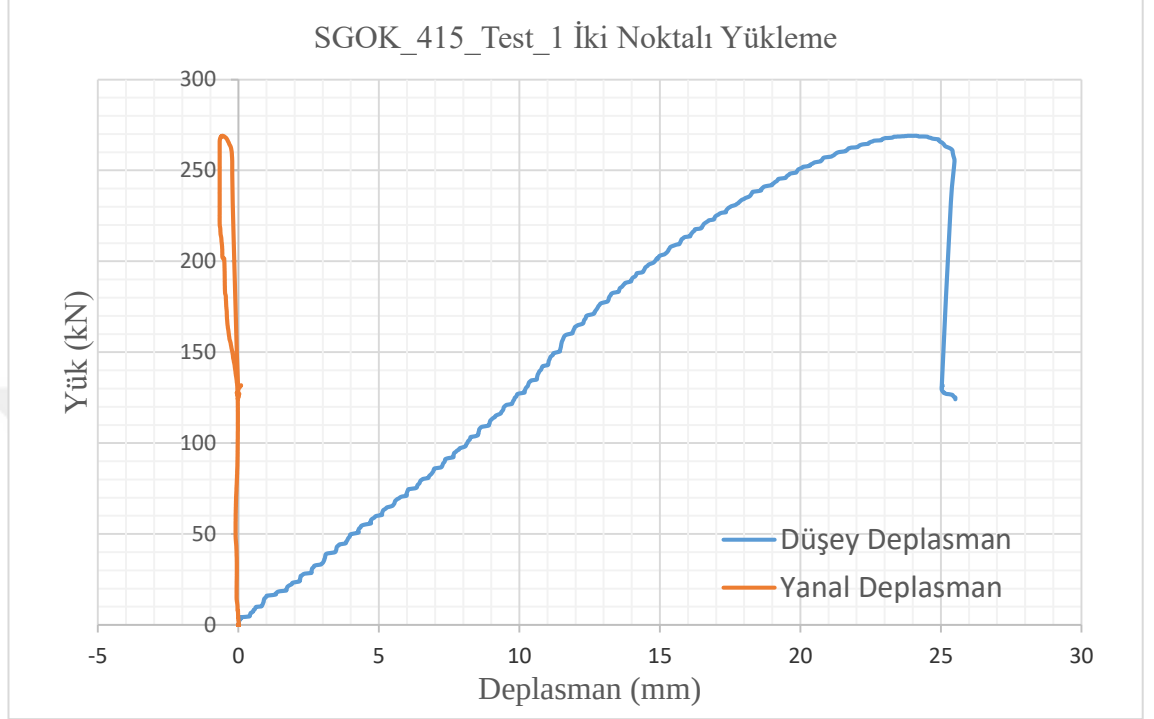
4.2.3. SGOK_415 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen SGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. SGOK_415 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 268.92 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.19, Şekil 4.20).



Şekil 4.19. SGOK_415 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

SGOK_415 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.20’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 268 kN’u aştıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.20. SGOK_415_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

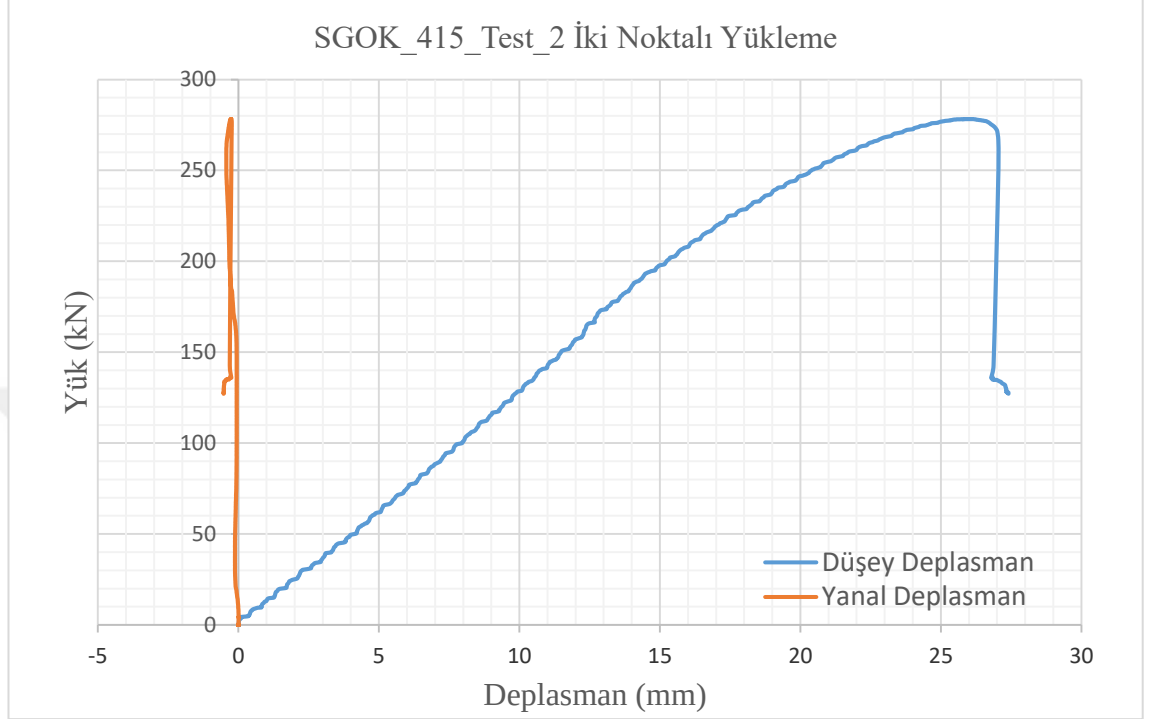
4.2.4. SGOK_415 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen SGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. SGOK_415 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 278.24 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.21, Şekil 4.22).



Şekil 4.21. SGOK_415 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

SGOK_415 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.22’te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 278 kN’u aşıttan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.22. SGOK_415_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

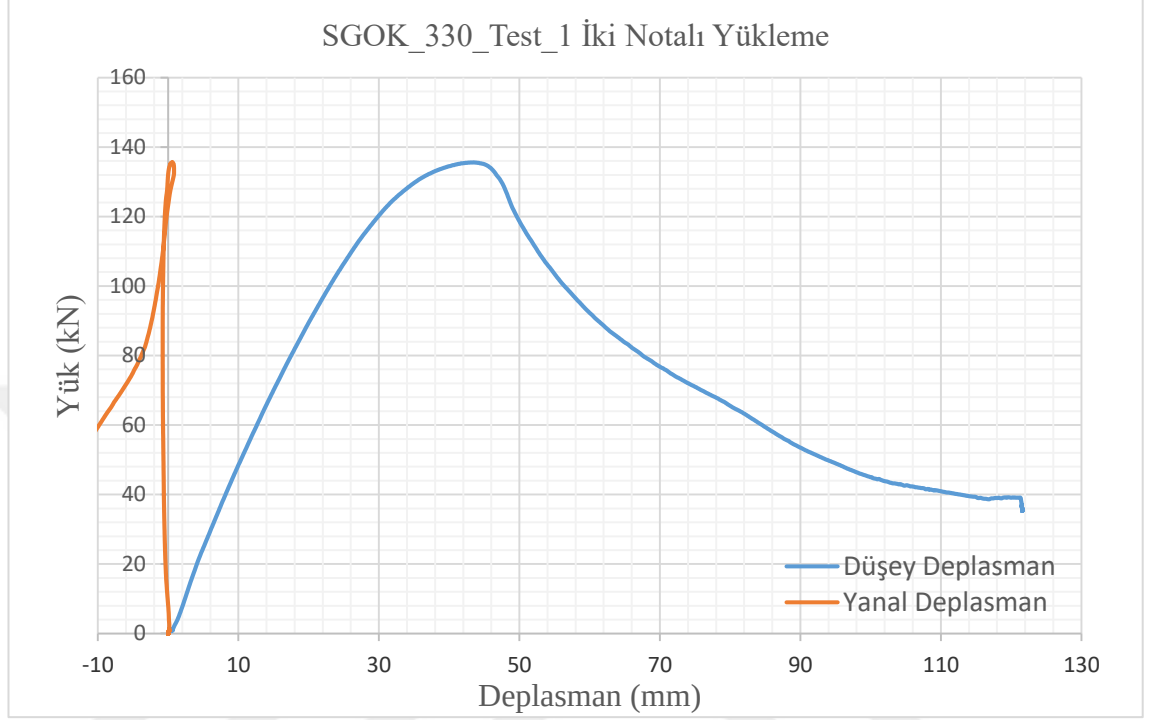
4.2.5. SGOK_330 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen SGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. SGOK_330 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 135.34 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.23, Şekil 4.24).



Şekil 4.23. SGOK_330 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

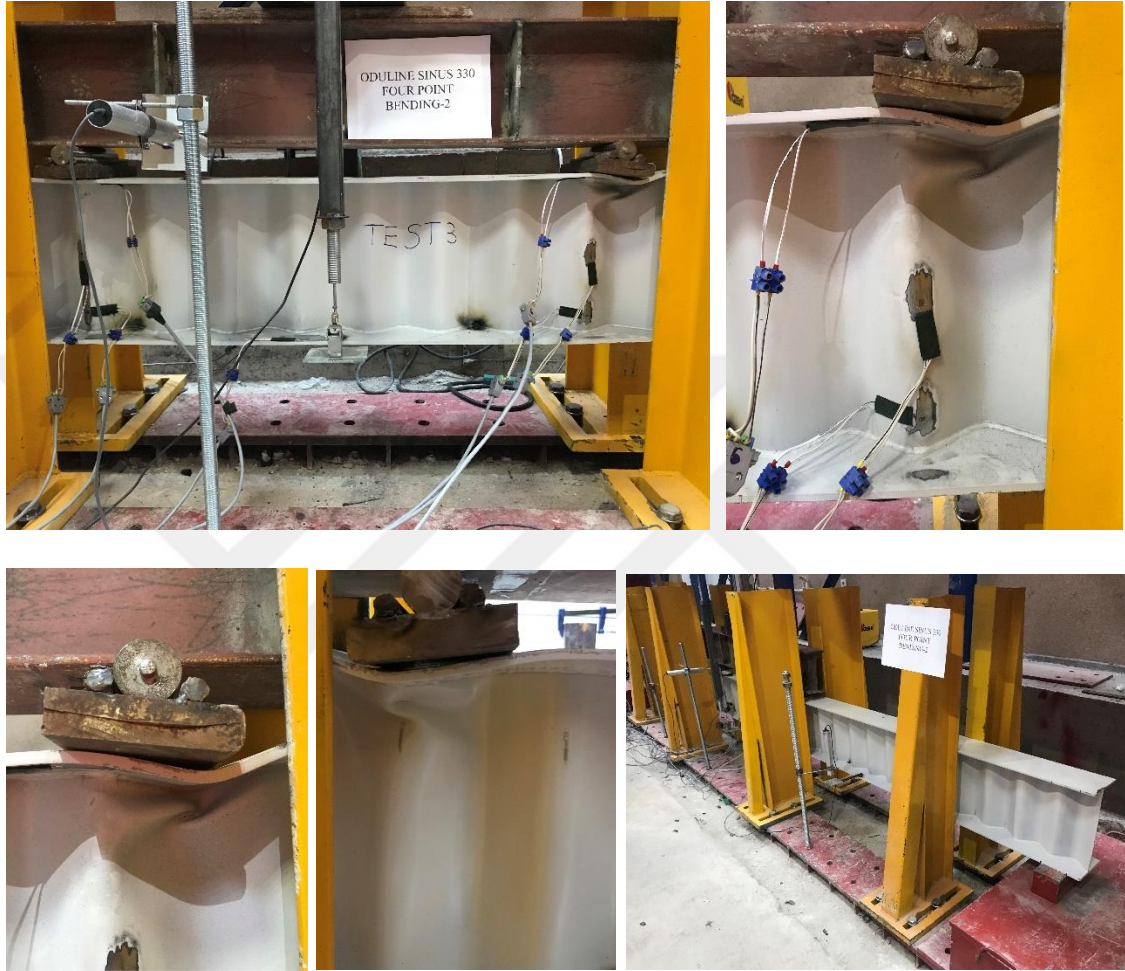
SGOK_330 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.24'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 135 kN'u aştıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.24. SGOK_330_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

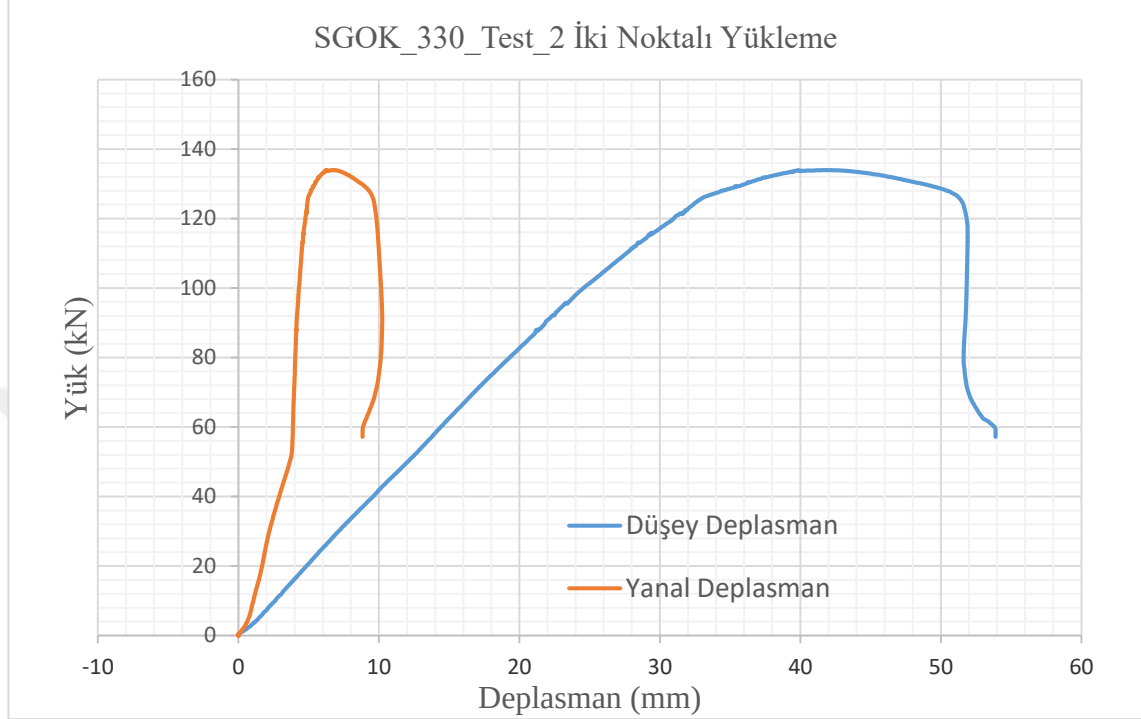
4.2.6. SGOK_330 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen SGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. SGOK_330 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 133.86 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.25, Şekil 4.26).



Şekil 4.25. SGOK_330 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

SGOK_500 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.26’te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 133 kN’u aştıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.26. SGOK_330_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

4.3. Ondülin Gövdeli Trapezoidal Kirişlerin Testleri (yayılı yükleme)

Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş (TGOK), yayılı yükleme altında yük taşıma kapasitelerinin ve göçme modlarının tespit edilmesi amacıyla TGOK_500 kirişi için 2 (iki) adet TGOK_415 kirişi için 2 (iki) adet ve TGOK_330 kirişi için 2 (iki) adet eğilme testleri yapılmıştır. (Çizelge 4.3).

DeneySEL verilerin kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup kirişlerin yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması, yük taşıma kapasiteleri, göçme modları ve verilmiştir.

Çizelge 4.3. TGOK (Trapezoidal Gövdeli Ondülin Kiriş) test sayıları

Test	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Test Sayısı
OGTK_500	Yayılı	Trapezoidal	2
OGTK_415	Yayılı	Trapezoidal	2
OGTK_330	Yayılı	Trapezoidal	2

Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 1000 kN kapasiteye sahip yük hücresi 500 cm açıklıklı kirişin tam ortasından ara elemana etki etmektedir. Ara eleman ise 120cm uzunluğunda kirişin üst başlığına yükü yayarak iletmektedir.

Trapezoidal gövdeli ondülin kirişlerin yayılı yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.27’de ve bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Bölüm 3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş testi; yayılı yükleme durumu

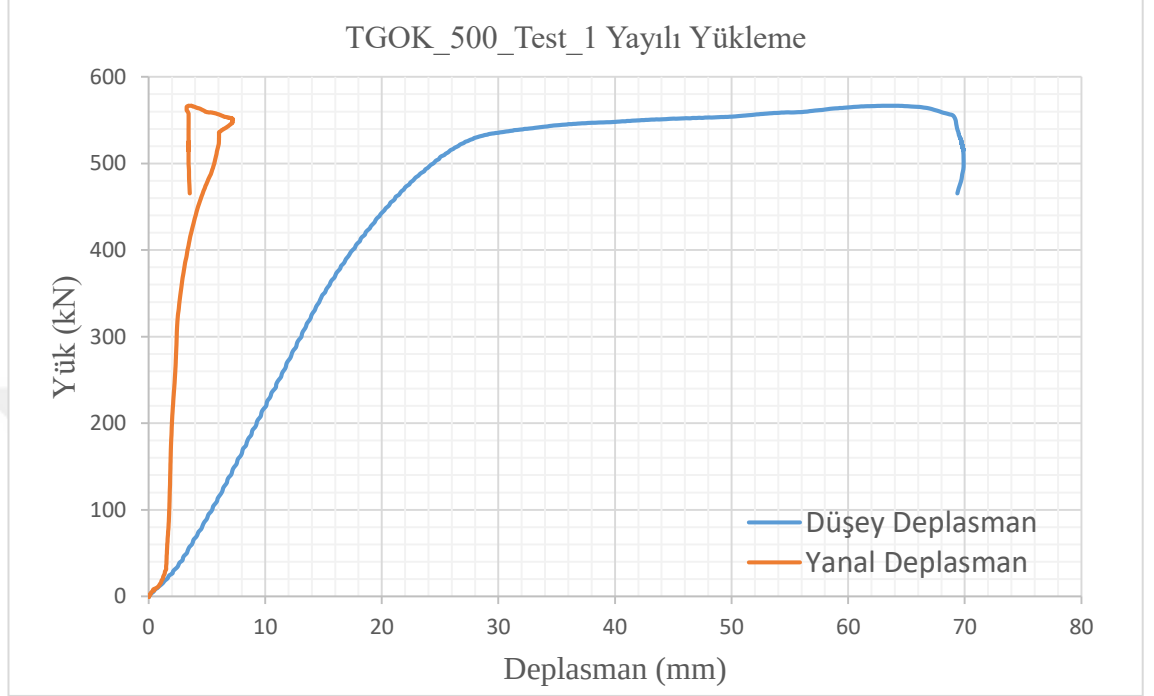
4.3.1. TGOK_500 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK yayılı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_500 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 566.28 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.28, Şekil 4.29).



Şekil 4.28. TGOK_500 Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları

TGOK_500 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.29’da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme 566 kN’u aştıktan sonra ara elemanın bittiği bölgede başlıkta deformasyonlar gözlenmiş fakat gövde de önemli ölçüde bir deformasyon olmamıştır.



Şekil 4.29. TGOK_500_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

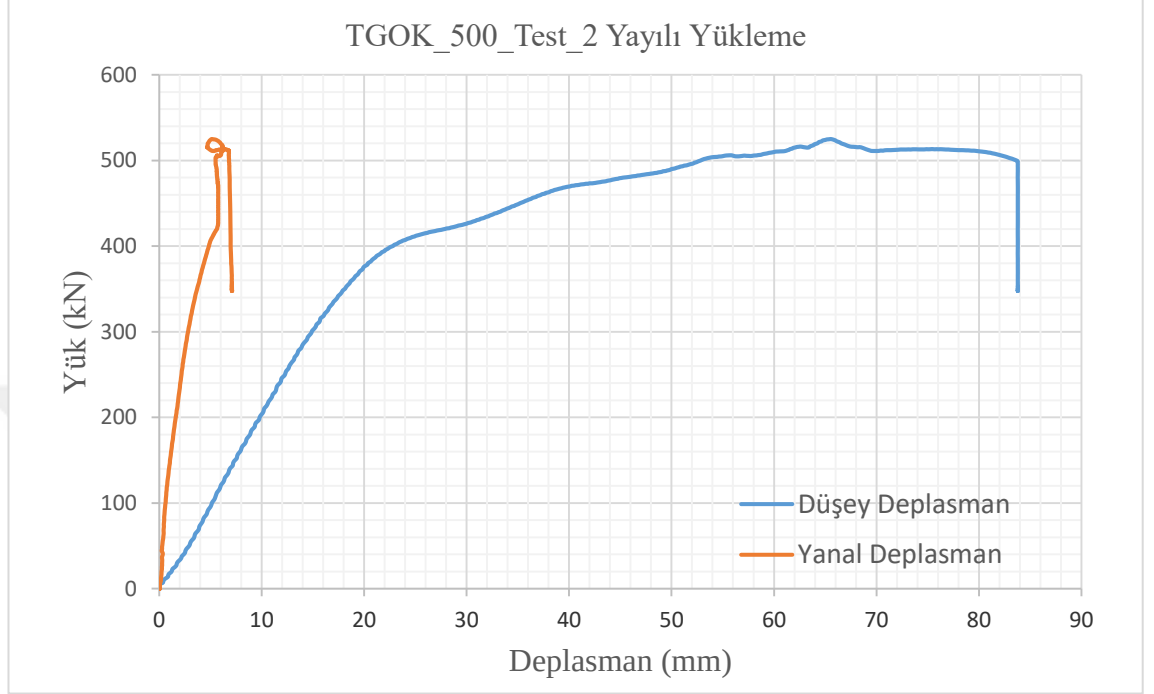
4.3.2. TGOK_500 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK yayılı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_500 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 512.81 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.30, Şekil 4.31).



Şekil 4.30. TGOK_500 Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumları

TGOK_500 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.31’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme 512 kN’u aştıktan sonra ara elemanın bittiği bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyonlar gözlenmiştir.



Şekil 4.31. TGOK_500_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

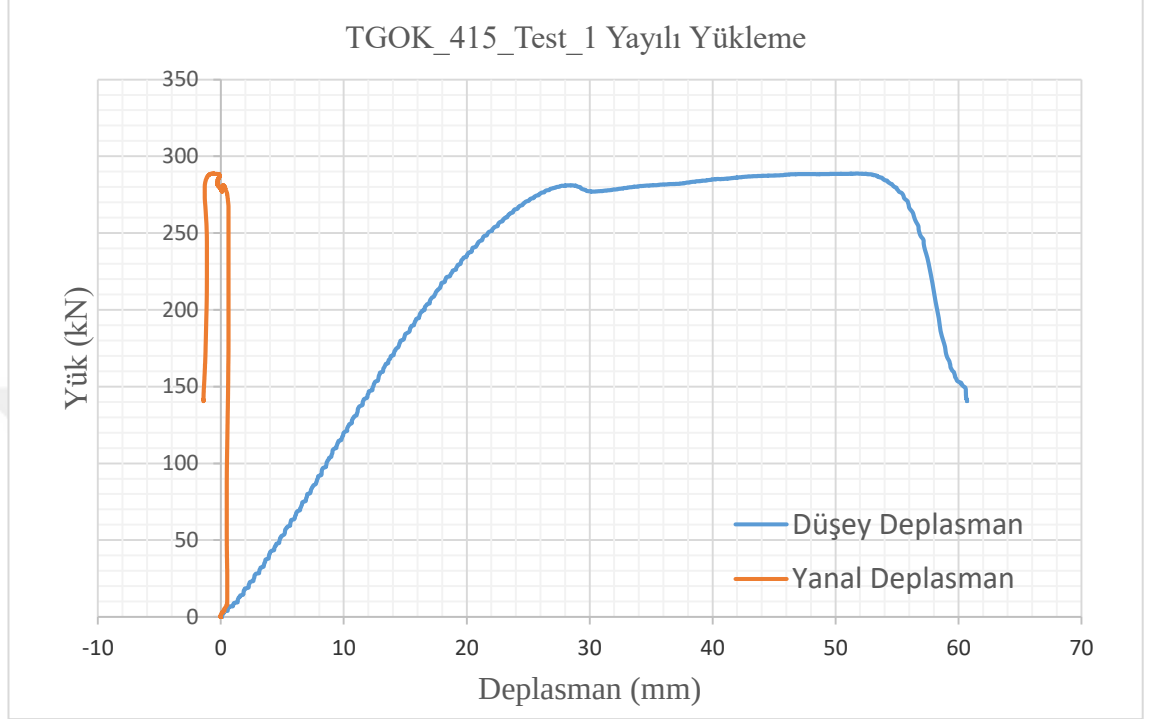
4.3.3. TGOK_415 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK yayılı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_415 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 287.92 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.32, Şekil 4.33).



Şekil 4.32. TGOK_415 Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları

TGOK_415 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.33’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme 287 kN’u aştıktan sonra ara elemanın bittiği bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyonlar gözlenmiştir.



Şekil 4.33. TGOK_415_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

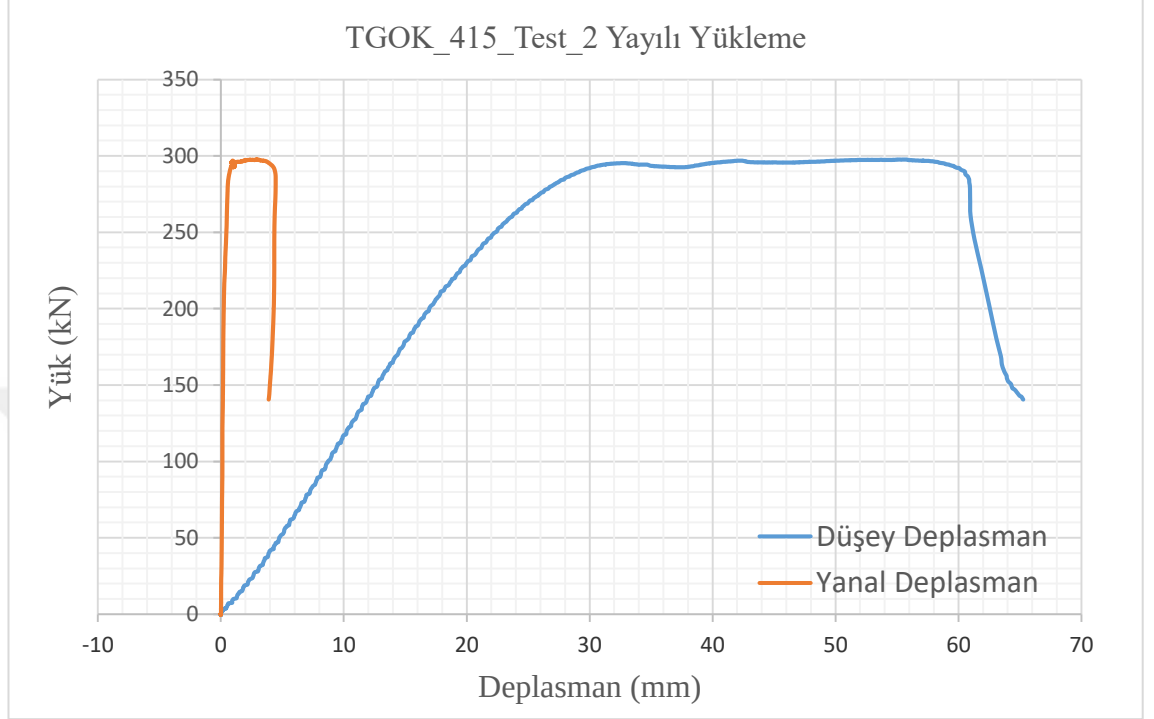
4.3.4. TGOK_415 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK yayılı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_415 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 297.36 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.34, Şekil 4.35).



Şekil 4.34. TGOK_415 Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumları

TGOK_415 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.35'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme 297 kN'u aştıktan sonra ara elemanın bittiği bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyonlar gözlenmiştir.



Şekil 4.35. TGOK_415_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

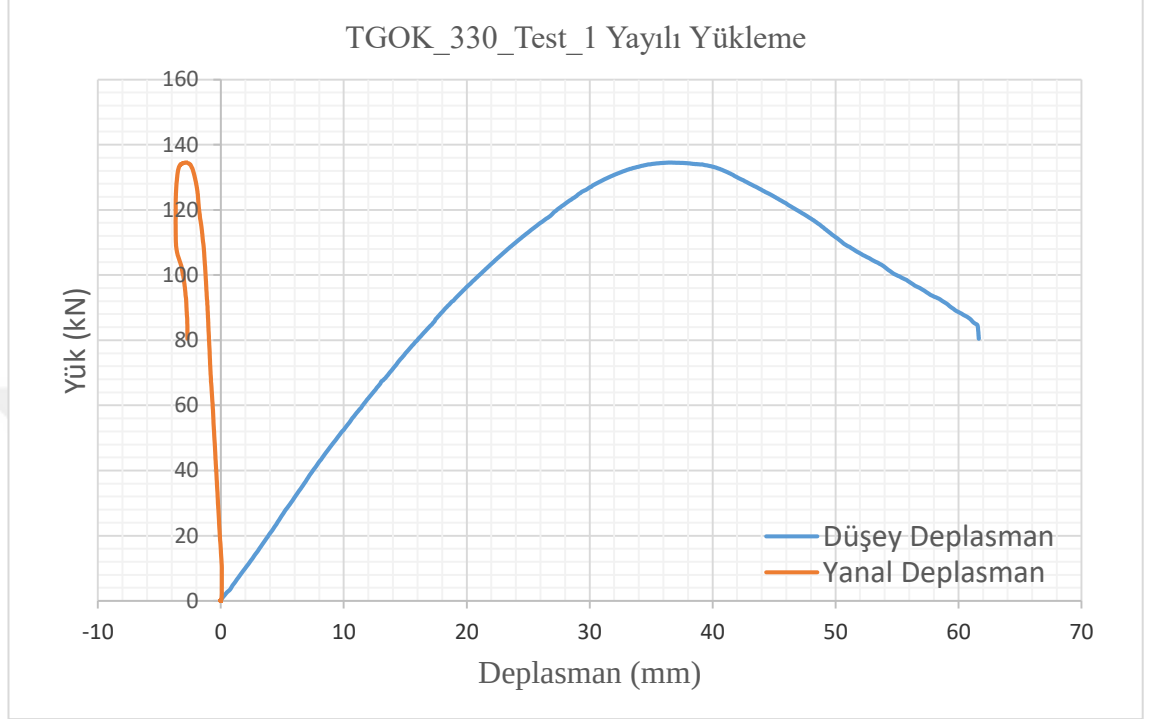
4.3.5. TGOK_330 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK yayılı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_330 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 134.44 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.36, Şekil 4.37).



Şekil 4.36. TGOK_330 Test_1; yayılı yükleme altında göçme durumları

TGOK_330 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.37’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme 134 kN’u aştıktan sonra ara elemanın bittiği bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyonlar gözlenmiştir.



Şekil 4.37. TGOK_330_Test_1; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

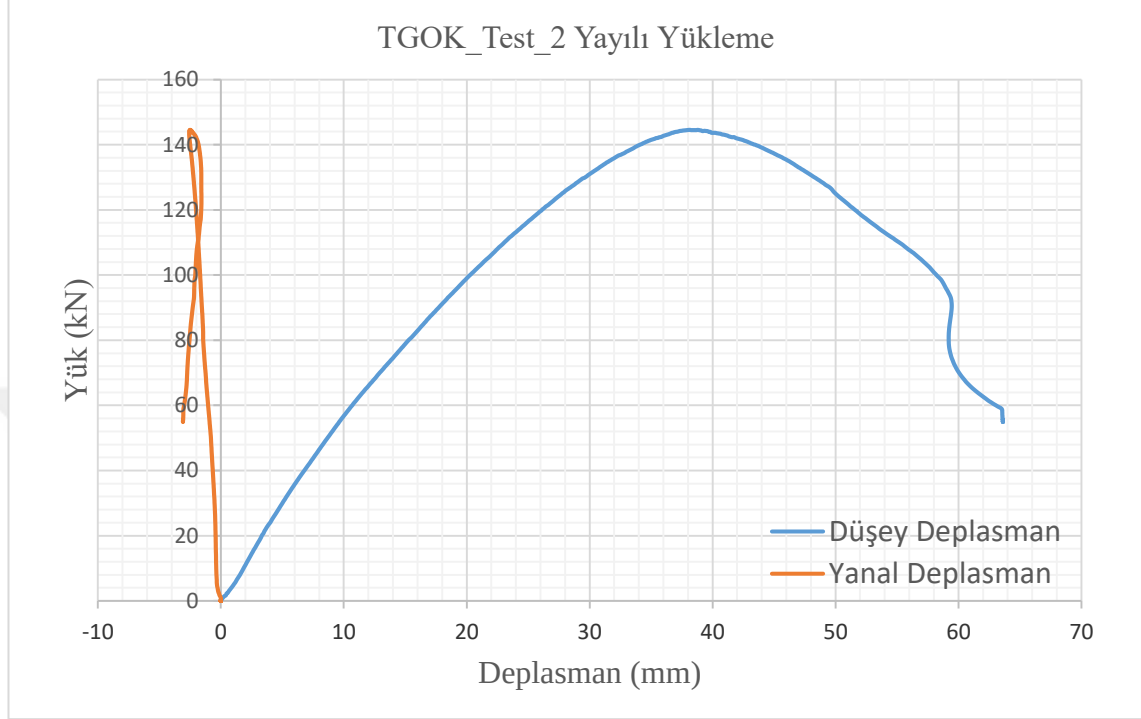
4.3.6. TGOK_330 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK yayılı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_330 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 144.51 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.38, Şekil 4.39).



Şekil 4.38. TGOK_330 Test_2; yayılı yükleme altında göçme durumları

TGOK_330 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.39’da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yayılı yükleme 144 kN’u aştıktan sonra ara elemanın bittiği bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyonlar gözlenmiştir.



Şekil 4.39. TGOK_330_Test_2; yayılı yükleme altında yük-deplasman grafiği

4.4. Trapezoidal Gövdeli Ondülin Kirişlerin Testleri (iki noktalı yükleme)

Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş (TGOK), iki noktalı yükleme altında yük taşıma kapasitelerinin ve göçme modlarının tespit edilmesi amacıyla TGOK_500 kirişi için 2 adet TGOK_415 kirişi için 2 (iki) adet ve TGOK_330 kirişi için 2 (iki) adet eğilme testleri yapılmıştır. (Çizelge 4.4).

DeneySEL verilerin kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup kirişlerin yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması, yük taşıma kapasiteleri, göçme modları ve verilmiştir.

Çizelge 4.4. TGOK (Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş) test sayıları

Test	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Test Sayısı
TGOK_500	İki Noktalı	Trapezoidal	2
TGOK_415	İki Noktalı	Trapezoidal	2
TGOK_330	İki Noktalı	Trapezoidal	2

Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 1000 kN kapasiteye sahip yük hücresi 500 cm açıklıklı kirişin tam ortasından ara elemana etki etmektedir. Burada 120 cm uzunluğundaki ara eleman ile test kirişi arasına 110 cm aks ile birer adet 3 cm çapında mil konularak iki noktalı tekil yükleme uygulanmıştır.

Trapezoidal gövdeli ondülin kirişlerin iki noktalı yükleme altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.40.'da ve bu kirişin geometrik ölçüleri ve detayları Bölüm 3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Trapezoidal gövdeli ondülin kiriş testi; yayılı yükleme durumu

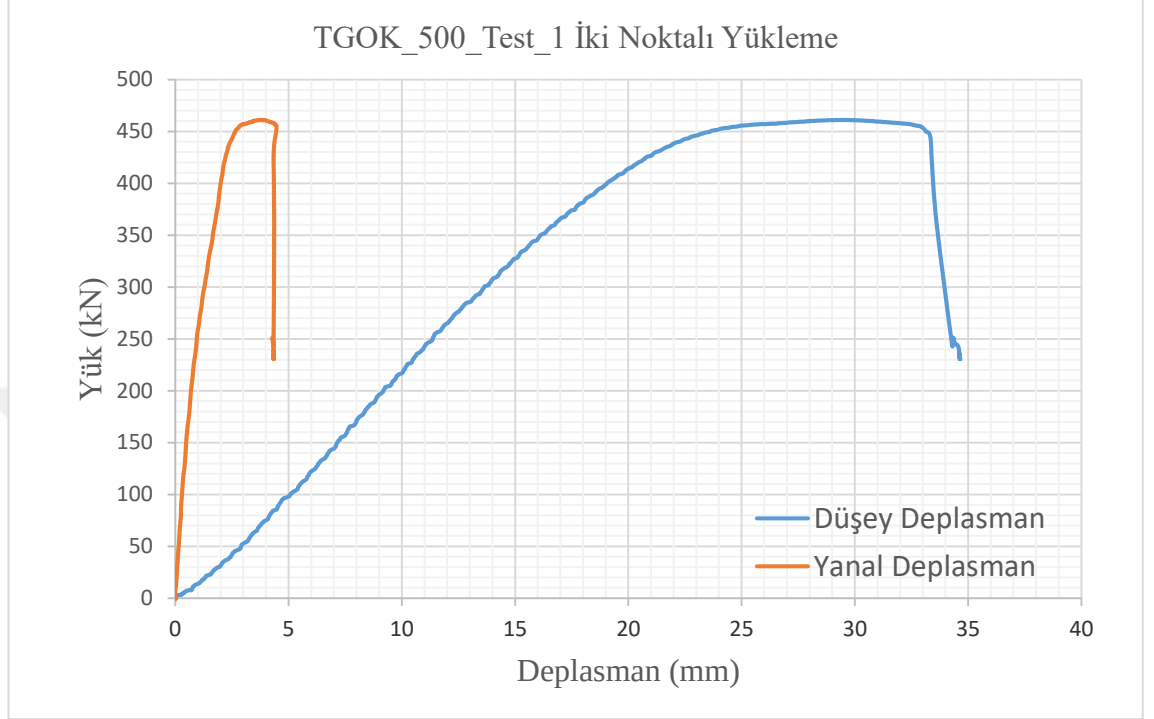
4.4.1. TGOK_500 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_500 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 460.95 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.41, Şekil 4.42).



Şekil 4.41. TGOK_500 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

TGOK_500 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.42’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 460 kN’u aşıttıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.42. TGOK_500_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

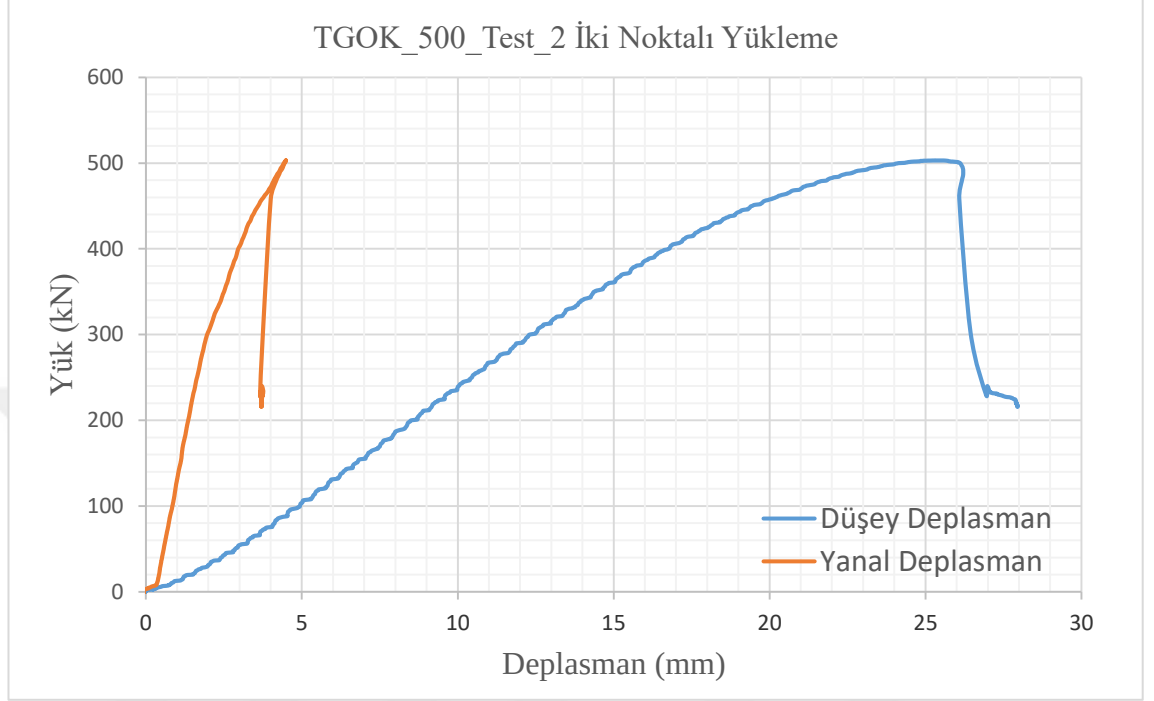
4.4.2. TGOK_500 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_500 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 503.01 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.43, Şekil 4.44).



Şekil 4.43. TGOK_500 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

TGOK_500 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.44'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 503 kN'u aştıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.44. TGOK_500_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

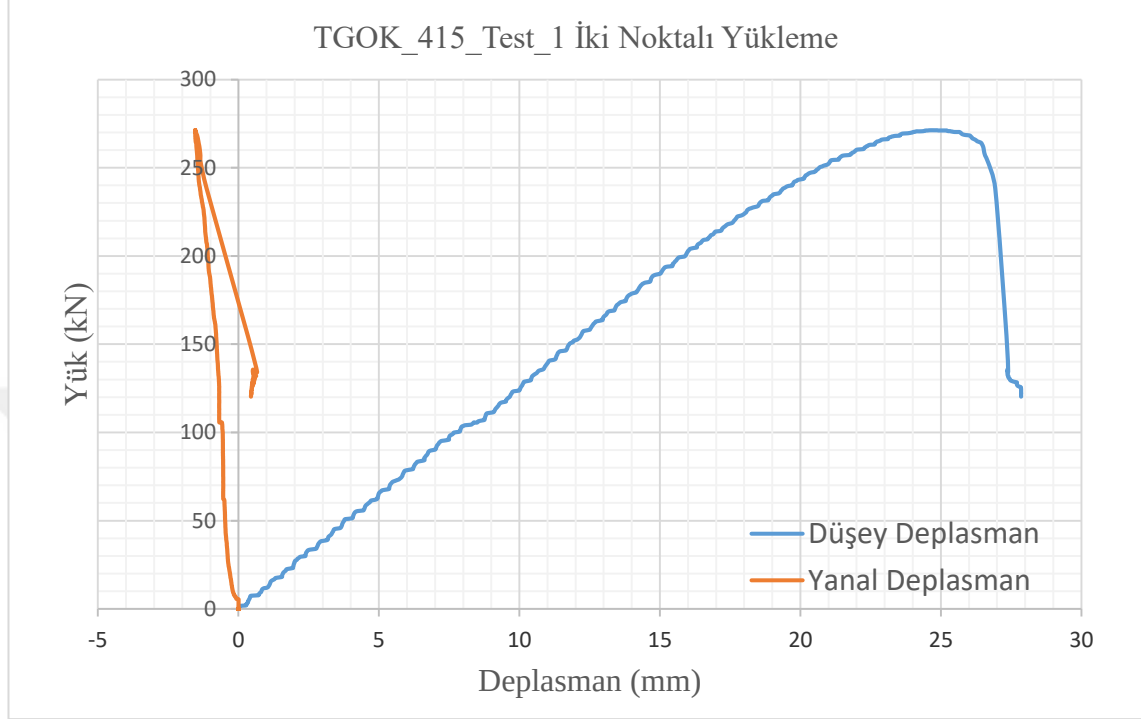
4.4.3. TGOK_415 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3'te detaylı olarak verilen TGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_415 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 270.88 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.45, Şekil 4.46).



Şekil 4.45. TGOK_415 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

TGOK_415 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.46’da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 270 kN’u aşıttan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.46. TGOK_415_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

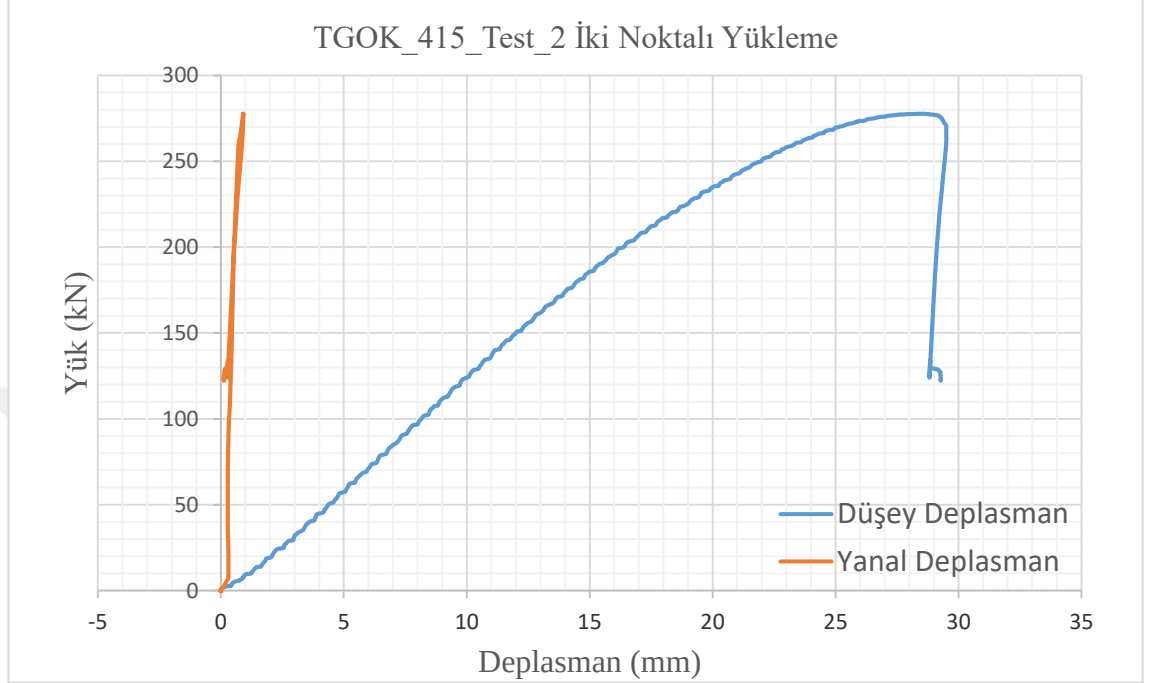
4.4.4. TGOK_415 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_415 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 277.62 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.47, Şekil 4.48).



Şekil 4.47. TGOK_415 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

TGOK_415 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.48’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 277 kN’u aştıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



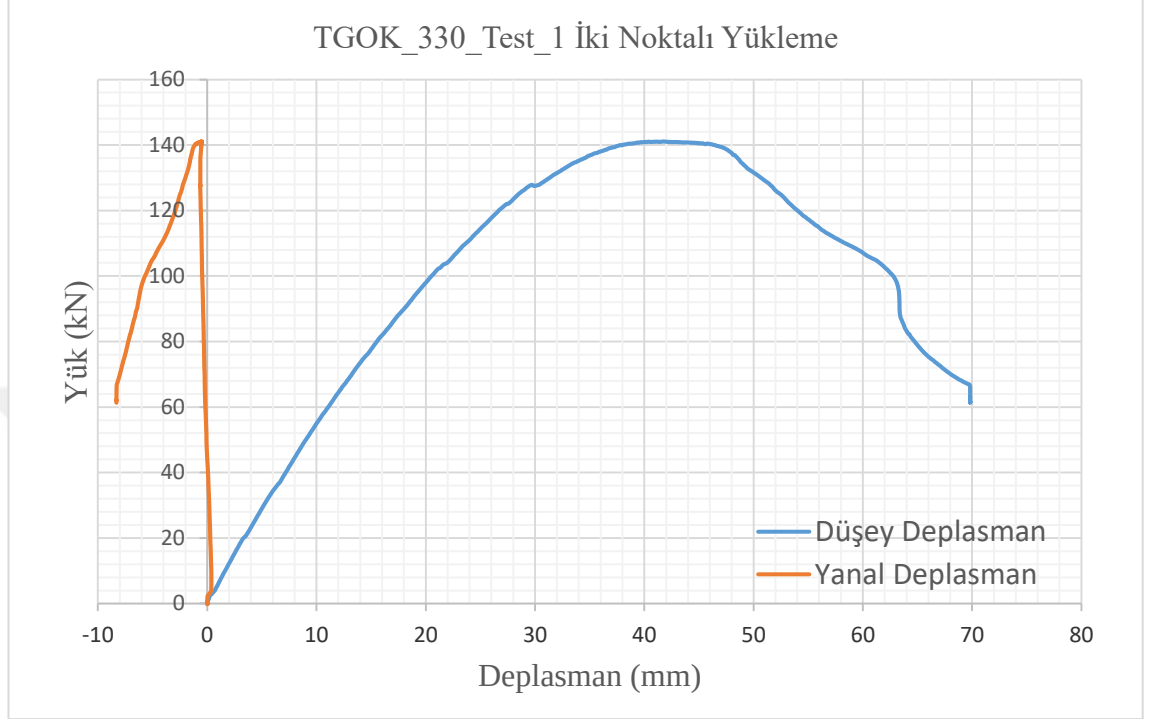
4.4.5. TGOK_330 Test 1

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_330 Test_1 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 140.97 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.49, Şekil 4.50).



Şekil 4.49. TGOK_330 Test_1; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

TGOK_330 Test_1 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.50’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 140 kN’u aşıttıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.50. TGOK_330_Test_1; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

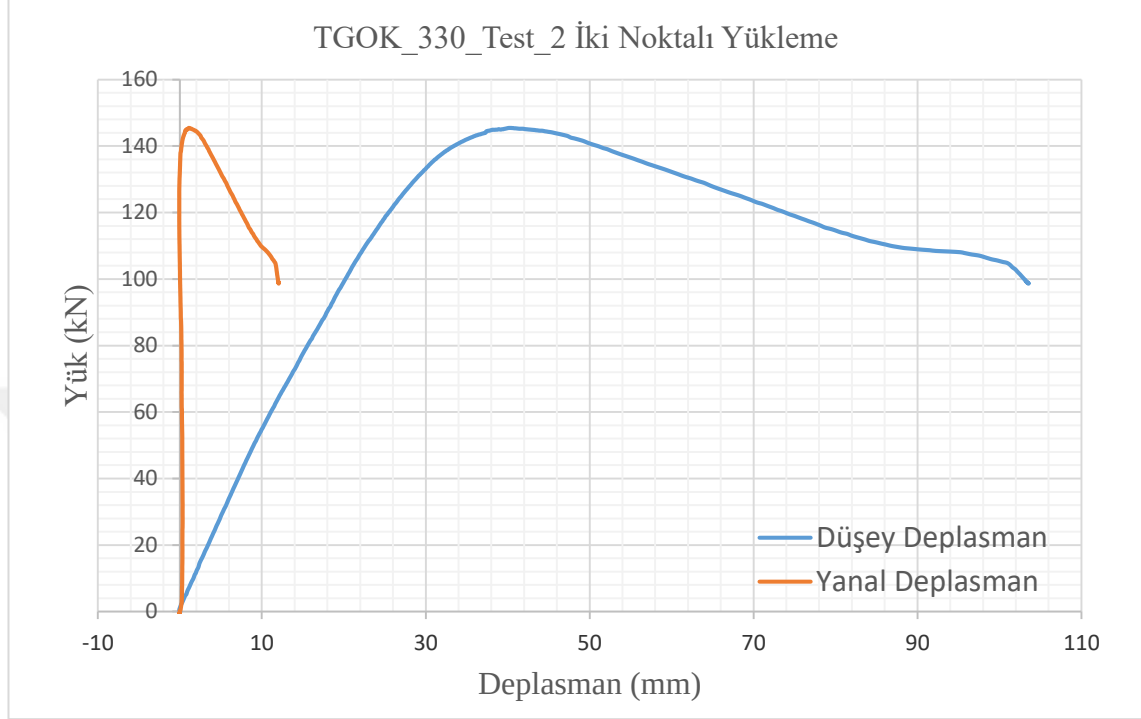
4.4.6. TGOK_330 Test 2

Geometrik özellikleri bölüm 3’te detaylı olarak verilen TGOK iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. TGOK_330 Test_2 sonucunda kirişinin yük taşıma kapasitesi 145.23 kN olarak ölçülmüştür. (Şekil 4.51, Şekil 4.52).



Şekil 4.51. TGOK_330 Test_2; iki noktalı yükleme altında göçme durumları

TGOK_330 Test_2 sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanal deplasman Şekil 4.52’te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktalı yükleme 145 kN’u aştıktan sonra noktasal yükleme yapılan bölgede hem başlıkta hem de gövde de önemli deformasyon görülmüştür.



Şekil 4.52. TGOK_330_Test_2; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

4.5. IPE 300 Profilinin İki Noktalı Yükleme Altında Test Edilmesi

Trapezoidal ve Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin standart bir IPE 300 profili ile hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizleri yapılarak karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.53’te IPE 300 elemanının deney sonrası deformasyon sonucunda basit eğilme altındaki global deformasyonu ve lokal deformasyonu gözlenmektedir.



Şekil 4.53. IPE 300 deney elemanının deformasyon sonucu

Şekil 4.54'te IPE 300 profili için yanal burkulma ve başlıkta yerel burkulma gözlemlenmektedir.

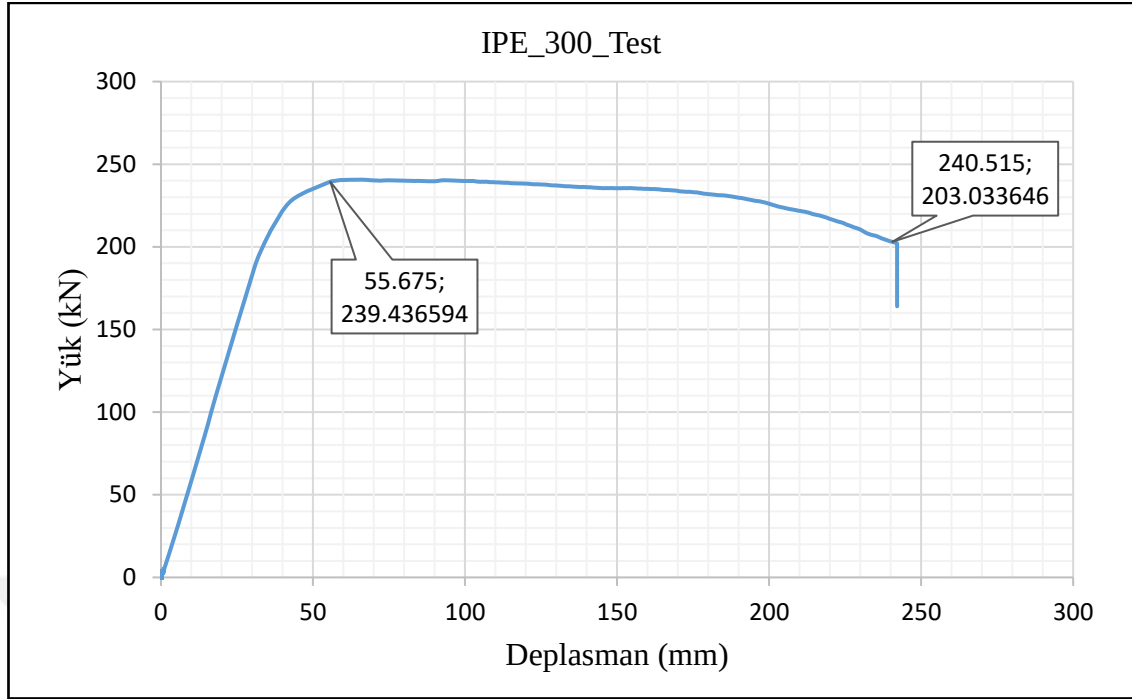


Şekil 4.54. IPE 300 deney elemanının deformasyon sonucu

İki noktalı yükleme altında IPE 300 profilinin yük-deplasman grafiği (Şekil 4.55). Bölüm 2.3'te de detaylı olarak bahsedilen ondülin gövdeli kirişler ile standart IPE 300 profilinin deney sonuçlarının Çizelge 4.5'de karşılaştırması yapılmış ve ağırlık kazancı ile taşıma kapasitesindeki artış gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. IPE 300, SGOK_415 ve SGOK_330 profillerinin deneysel karşılaştırma sonuçları (NAP-3668 deneysel elemanlarından alınan sonuçlar)

Kiriş Tipi	Yükleme Tipi	I_x (cm ⁴)	A (mm ²)	Ağırlık (kg/m)	Göçme Yüğü (kN)
IPE 300	İki Noktalı Yükleme	8356	53.81	42.2	240.44
SGOK_415	İki Noktalı Yükleme	19954	50.375	40.3	278.11
SGOK_330	İki Noktalı Yükleme	7911	32.2	25.76	133.16



Şekil 4.55. IPE 300; iki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafiği

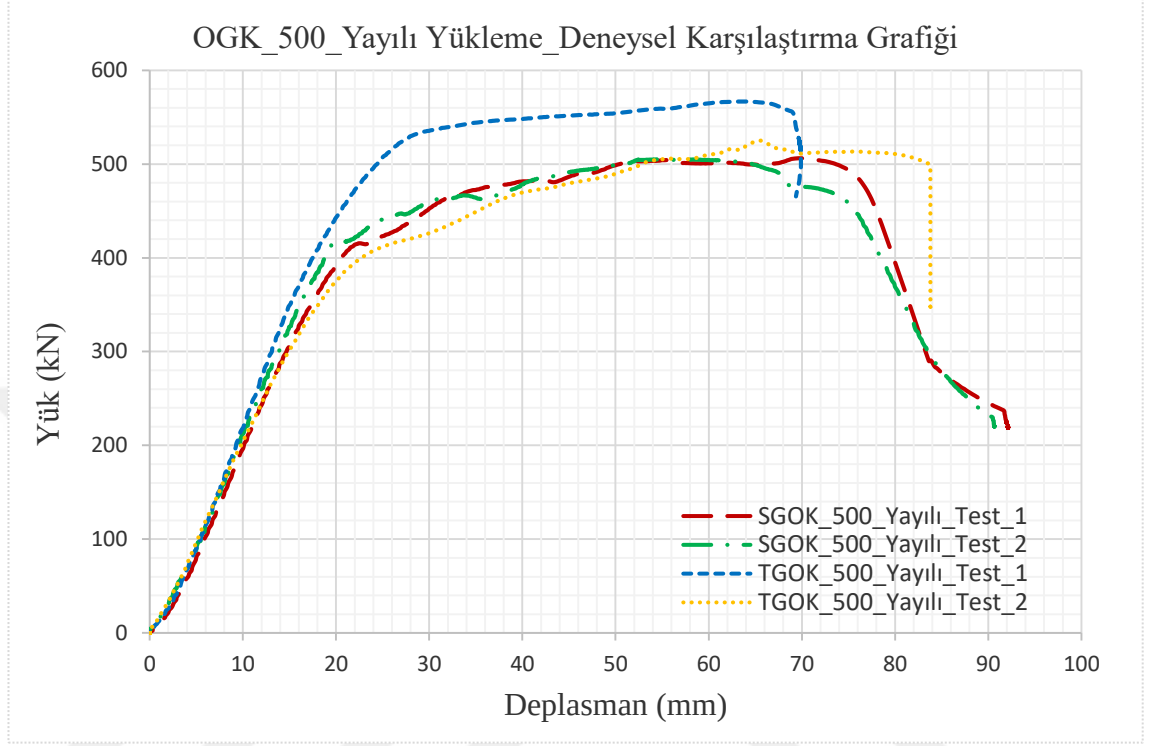
4.6. OGK_500 Yayılı Yükleme Karşılaştırılması

Trapezoidal ve Sinüzoidal gövdeli ondulin kirişlerin 2 adet trapezoidal ve 2 adet Sinüzoidal olarak deneyleri yapılmıştır. OGK_500 için yayılı yükleme altında yapılan 4 adet test sonuçlarının yük-deplasman karşılaştırılması Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Grafikteki maksimum dayanımlar ise Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Yayılı yükleme altında TGOK_500_Test_1 elemanın kapasitesinin diğer test elemanlarından daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi araştırılmış ve deney sonrası TGOK_500 Test_1 ve Test_2 elemanlarından ayrı ayrı tekrar 4'er kupon alınmış, çekme testi yapılmış ve kapasitesi yüksek olan kirişten alınan kupon değerlerinden elde edilen akma mukavemetlerinin de daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sonlu elemanlar yöntemi ile de ispatlanabilmesi için bu iki eleman için ayrı ayrı kupon değerleri ile SEA analizleri yapılmış ve bu SEA analizlerinin grafikleri de Bölüm 4'te gösterilmiştir.

Sehim açısından incelendiğinde Sinüzoidal gövdeli kirişler ile trapezoidal gövdeli kirişler arasında aynı akma kapasitelerinde sahip olan SGOK_500_Test_1, Test_2 ve TGOK_500_Test_2 incelendiğinde trapezoidal gövdeli kirişin daha fazla deplasman yaptığı, Sinüzoidal gövdeli kirişlerin deplasmanlarının yakın olduğu gözlemlenmiştir. Burada TGOK_500_Test_1'de deplasmanın diğerlerinden daha düşük olmasının sebebi ise deney sonrasında araştırma için tekrardan yapılan kupon testlerinde 12mm başlık levhasından alınan kupon çekme test sonucundan elde edilen akma mukavemetinin, 3mm olan gövde akma mukavemetinden daha düşük olması sebebi ile diğerlerine oranla başlıktan ziyade gövdede daha kısa sürede daha fazla gerilme oluşması ve ani göçme olan düşüşün daha düşük deplasman değerinde meydana gelmesidir.

Şekil 4.56'da OGK_500 üzerinde yayılı yükleme altında yapılan 4 adet test sonucunda yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Yayılı yükleme altında önce kiriş başlığı akmaya başlamış, nihai yüke ulaştıktan sonra gövdede göçme meydana gelerek taşıma kapasitesinde ani azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.56. OGK_500 yayılı yükleme altında yük-deplasman grafikleri

Çizelge 4.6. OGK_500 kirişlerin yayılı yükleme altında test sonuçları

Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Davranışı	Ortalama Dayanım (kN)
TGOK_500 Test_1	Yayılı	Trapezoidal	566.28	Başlıkta yerel burkulma	539.55
TGOK_500 Test_2	Yayılı	Trapezoidal	512.81	Başlıkta yerel burkulma	
SGOK_500 Test_1	Yayılı	Sinüzoidal	506.19	Başlıkta yerel burkulma	505.40
SGOK_500 Test_2	Yayılı	Sinüzoidal	504.60	Başlıkta yerel burkulma	
OGK_500 Kirişlerin Yayılı Yükleme Durumunda Ortalama Dayanımı					522.48

4.7. OGK_500 İki Noktalı Yükleme Karşılaştırılması

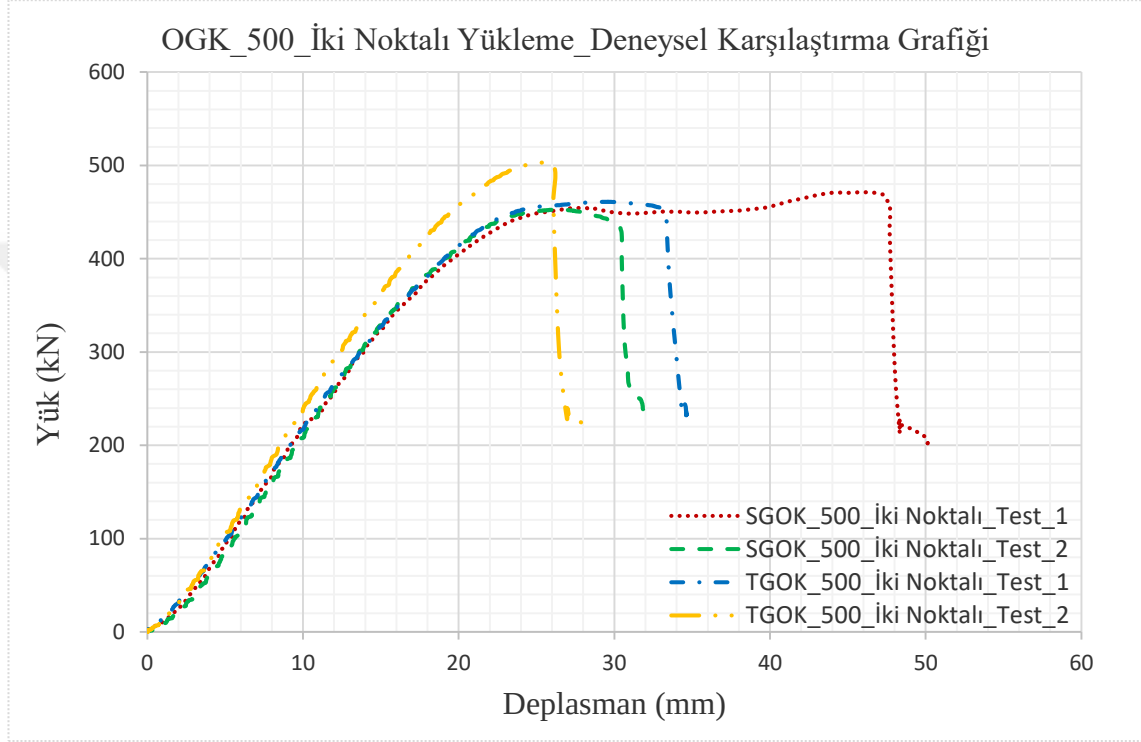
Trapezoidal ve Sinüzoidal gövdeli ondulin kirişlerin 2 adet trapezoidal ve 2 adet Sinüzoidal olarak deneyleri yapılmıştır. OGK_500 için iki noktalı yükleme altında yapılan 4 adet test sonuçlarının yük-deplasman karşılaştırılması Şekil 4.57’de gösterilmiştir. Grafikteki maksimum dayanımlar ise Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

İki noktalı yükleme SGOK_500_Test_1 diğer test elemanlarından daha fazla deplasman yaparken, öteki test elemanlarının birbirlerinde yakın deplasman yaptıkları gözlemlenmiştir. Bunun için öngörülen sebepler şunlardır;

1. Çelik sınıfları aynı olsa da birbirleri arasında değişkenlik göstermesi, kupon test sonuçlarından elde edilen akma mukavemet değerlerinin kiriş gövdesi ve başlığı boyunca homojen davranmamasından kaynaklanmaktadır.
2. Yapılan testlerde daha düşük deplasman yapan test elemanlarının yükleme sırasında ara elemanın eksantrisine oluşturacak şekilde yüklenmiş ya da yükleme sırasında yanal tutucular ile kiriş başlıkları arasında ki toplam 5-10mm olan boşlukta kiriş üst başlığının bir tarafa yatarak yine eksantrisine oluşturacak bir yükleme şeklinin olmasıdır.
3. İki noktalı yükleme sırasında 100 mm genişliğinde iki adet ara elemanın kiriş başlığına temas ettiği yüzeylerinde hemen altında ki gövde kıvrımlarının farklı pozisyonlarda denk gelmesinden kaynaklanabilmektedir.
4. Ayrıca iki noktalı yükleme durumlarında yüklemenin uygulandığı yüzey alanı yayılı yükleme durumundaki temas yüzey alanından oldukça küçük olması sebebi ile yerel imalat hatalarının ya da yerel olarak malzemenin homojen olamamasından kaynaklanabilmektedir.
5. İmalattan kaynaklı, başlıkta çentik olması, yükleme uygulanan bölgede kaynaklardan oluşabilecek hataların olması, gövdenin başlıklar ile tam merkezli olarak kaynatılmamış olmasından dolayı yüklemenin gövde üzerinde ki etkisinin eksantrisine oluşturacağından kaynaklanabilmektedir.

Yapılan testlerde göçme yüklerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. TGOK_500_Test_2 elemanın kapasitesinin diğer elemanlardan ortalama %8,7 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.57’de OGK_500 üzerinde iki noktalı yükleme altında yapılan 4 adet test sonucunda yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. İki noktalı yükleme altında nihai yüke ulaşıldıktan sonra gövdede ani bir göçme meydana gelmiş ve bu göçme sırasında gövdeden sonra da başlıkta ani bir akma gerçekleşmiştir.



Şekil 4.57. OGK_500 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri

Çizelge 4.7. OGK_500 kirişlerin iki noktalı yükleme altında test sonuçları

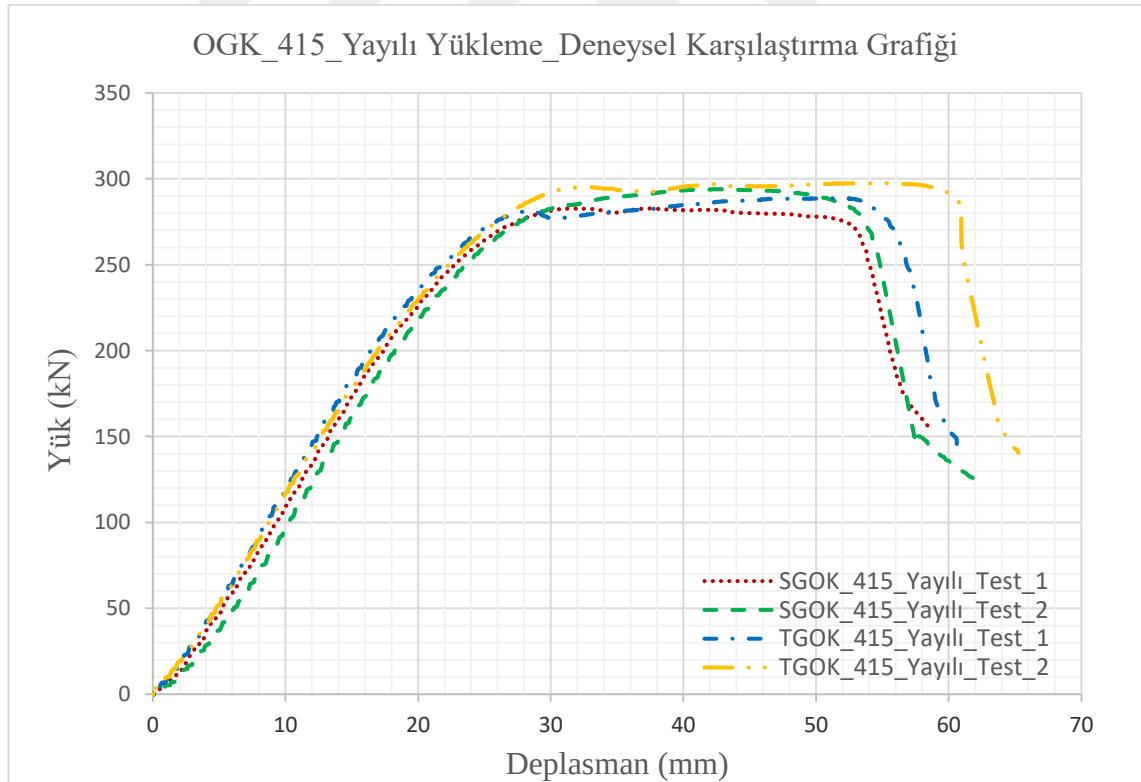
Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Davranışı	Ortalama Dayanım (kN)
TGOK_500 Test_1	İki noktalı	Trapezoidal	460.95	Gövdede yerel burkulma	481.98
TGOK_500 Test_2	İki noktalı	Trapezoidal	503.01	Gövdede yerel burkulma	
SGOK_500 Test_1	İki noktalı	Sinüzoidal	471.12	Gövdede yerel burkulma	461.81
SGOK_500 Test_2	İki noktalı	Sinüzoidal	452.49	Gövdede yerel burkulma	
OGK_500 Kirişlerin İki Noktalı Yükleme Durumunda Ortalama Dayanımı					471.90

4.8. OGK_415 Yayılı Yükleme Karşılaştırılması

Trapezoidal ve Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin 2 adet trapezoidal ve 2 adet Sinüzoidal olarak deneyleri yapılmıştır. OGK_415 için yayılı yükleme altında yapılan 4 adet test sonuçlarının yük-deplasman karşılaştırılması Şekil 4.58’de gösterilmiştir. Grafikteki maksimum dayanımlar ise Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Yayılı yükleme altında trapezoidal gövdeli kirişler ile Sinüzoidal gövdeli kirişler arasında önemli gerek göçme yükleri açısından gerekse deplasman açısından önemli bir fark gözlemlenememiştir. Yük-deplasman sonuçlarının oldukça iyi örtüşmesi test elemanlarının imalatlarının düzgün yapıldığı, malzeme özelliklerinin birbiri ile çok yakın olduğunu ve deneylerin yapılarılarının doğruluğunu ispatlamaktadır.

Şekil 4.58’de OGK_415 üzerinde yayılı yükleme altında yapılan 4 adet test sonucunda yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Yayılı yükleme altında nihai yüke ulaşıldıktan sonra bir süre deplasman yapmaya devam etmiş ve göçme gerçekleşmiştir. Yayılı yükleme altında kiriş deplasman yaparken önce başlık akmaya başlamış ve başlık aktıktan sonra gövdede ani göçme meydana gelmiştir. Gövde de göçme meydana gelene kadar başlığın akması sağlamış ve önce başlık büyük deformasyona uğradıktan sonra gövdede göçme meydana gelmiştir. Bu durum da ondülin gövdeli kiriş tasarımında istenilen bir göçme şeklidir.



Şekil 4.58. OGK_415 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri

Çizelge 4.8. OGK_415 Kirişlerin test sonuçları

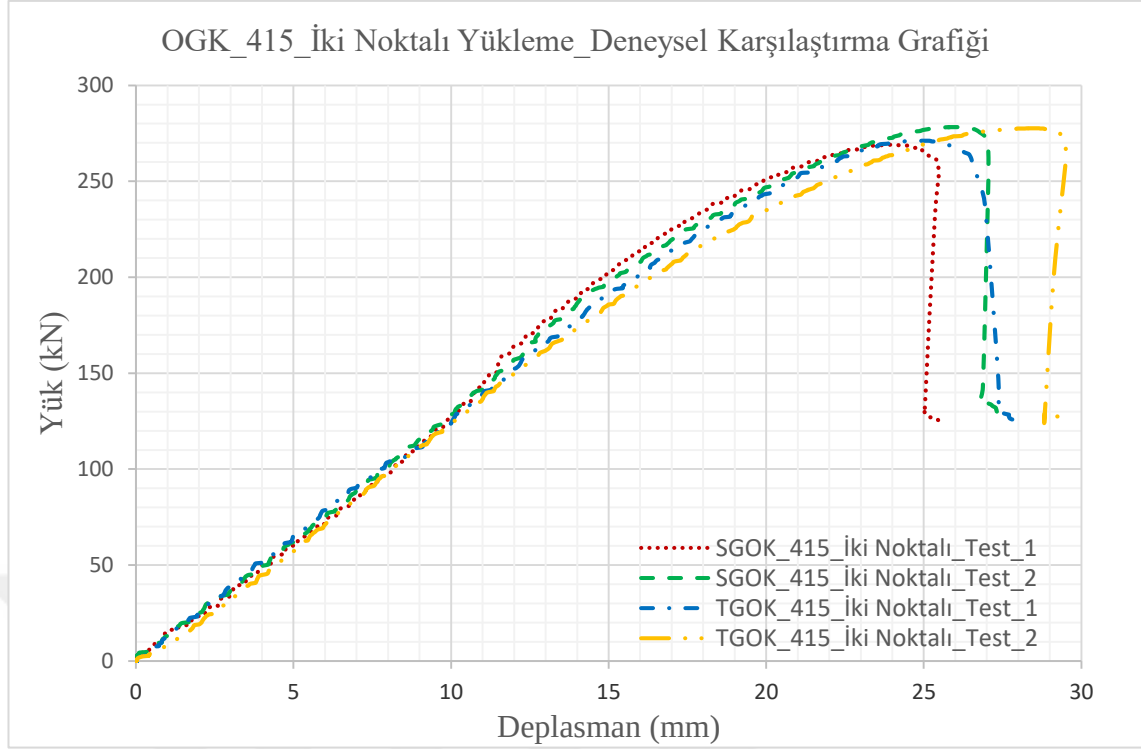
Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Davranışı	Ortalama Dayanım (kN)
TGOK_415 Test_1	Yayılı	Trapezoidal	287.92	Başlıkta yerel burkulma	292.64
TGOK_415 Test_2	Yayılı	Trapezoidal	297.36	Başlıkta yerel burkulma	
SGOK_415 Test_1	Yayılı	Sinüzoidal	282.65	Başlıkta yerel burkulma	288.29
SGOK_415 Test_2	Yayılı	Sinüzoidal	293.93	Başlıkta yerel burkulma	
OGK_415 Kirişlerin Yayılı Yüklemeye Durumunda Ortalama Dayanımı					290.47

4.9. OGK_415 İki Noktalı Yüklemeye Karşılaştırılması

Trapezoidal ve Sinüzoidal gövdeli ondulün kirişlerin 2 adet trapezoidal ve 2 adet Sinüzoidal olarak deneyleri yapılmıştır. OGK_415 için iki noktalı yüklemeye altında yapılan 4 adet test sonuçlarının yük-deplasman karşılaştırılması Şekil 4.59'da gösterilmiştir. Grafikteki maksimum dayanımlar ise Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

İki noktalı yüklemeye altında trapezoidal gövdeli kirişler ile Sinüzoidal gövdeli kirişler arasında önemli gerek göçme yükleri açısından gerekse deplasman açısından önemli bir fark gözlemlenmemiştir. Yük-deplasman sonuçlarının oldukça iyi örtüşmesi test elemanlarının imalatlarının düzgün yapıldığı, malzeme özelliklerinin birbiri ile çok yakın olduğunu ve deneylerin yapılarının doğruluğunu ispatlamaktadır.

Şekil 4.59'da yük-deplasman grafiği incelendiğinde göçme durumunda deplasman değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir. Burada grafikte gözüken ani göçmeler, başlıktan önce gövdenin ani olarak göçtüğünü ve gövde göçtükten sonra başlığın ani aktığını göstermektedir. Bu göçme durumu Bölüm 4'te SEA analizlerinde de ispatlanmıştır. Deney sırasında da kayıt alınan videolarda da gövdenin narin olmasından ve yükün tekil etkimesinden kaynaklı göçmenin önce gövdeden sonra başlıktan olduğu açıkça gözlemlenmiştir.



Şekil 4.59. OGK_415 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri

Çizelge 4.9. OGK_415 Kirişlerin test sonuçları

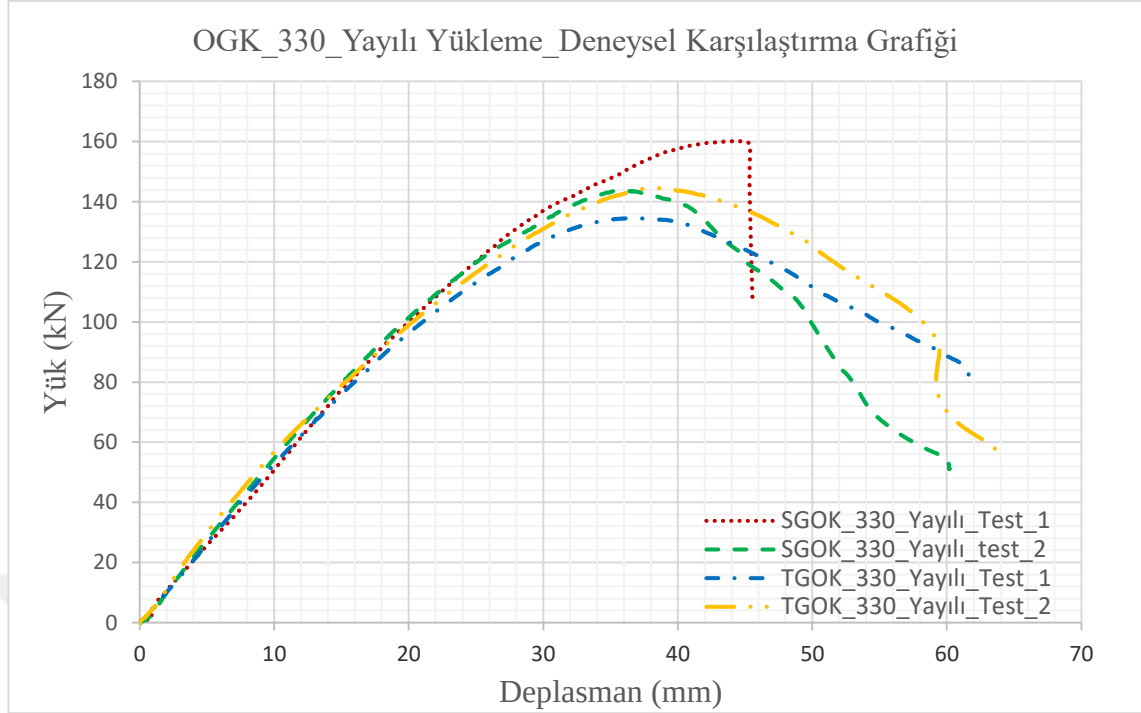
Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Davranışı	Ortalama Dayanım (kN)
TGOK_415 Test_1	İki noktalı	Trapezoidal	270.88	Gövdede yerel burkulma	274.25
TGOK_415 Test_2	İki noktalı	Trapezoidal	277.62	Gövdede yerel burkulma	
SGOK_415 Test_1	İki noktalı	Sinüzoidal	268.92	Gövdede yerel burkulma	273.58
SGOK_415 Test_2	İki noktalı	Sinüzoidal	278.24	Gövdede yerel burkulma	
OGK_415 Kirişlerin Yayılı Yükleme Durumunda Ortalama Dayanımı					290.47
OGK_415 Kirişlerin İki Noktalı Yükleme Durumunda Ortalama Dayanımı					273.92

4.10. OGK_330 Yayılı Yükleme Karşılaştırılması

Trapezoidal ve Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin 2 adet trapezoidal ve 2 adet Sinüzoidal olarak deneyleri yapılmıştır. OGK_330 için yayılı yükleme altında yapılan 4 adet test sonuçlarının yük-deplasman karşılaştırılması Şekil 4.57’de gösterilmiştir. Grafikteki maksimum dayanımlar ise Çizelge 4.9’de gösterilmiştir.

Yayılı yükleme altında yapılan OGK_330 test elemanlarında SGOK_500_Test_1 elemanının yük-deplasman grafiği incelendiğinde grafikteki diğer test elemanlarına kıyasla daha yüksek bir kapasite göstermiş fakat yayılı yükleme altında beklenmedik şekilde ani olarak önce gövdeden göçme gözlemlenmiştir. SGOK_330_Test_1 elemanı 24 adet kiriş numunesi içerisinde ilk yapılan deneydir, burada diğer deneylerde yapıldığı gibi kare ve silindirik, sırasıyla sabit ve hareketli mesnet tiplerini oluşturan elemanlar ile kiriş başlığına temas eden bölge ile arasına herhangi bir eleman konulmamıştır. Burada özellikle hareketli mesnet olan silindirik mesnet elemanı yükleme altında kiriş başlığına çizgisel bir yük aktarımı yapmaktadır. Yapılan deneyde ise göçme bu silindirik mesnet elemanının olduğu bölgeden ani göçmesi istenmeyen bir sonuç doğurmuş ve daha sonraki deneylerde mesnet bölgesinden göçmenin önlenmesi ile kiriş gövdesinin doğru incelenebilmesi adına mesnetler ile başlığın temas ettiği yüzeyin arasına temas yüzey alanının artırılması için 180 mm x 250 mm en ve boy ölçülerinde sahip 30 mm kalınlığında kayma önleyici parçalarla tutturulmuş ara levhalar kullanılmıştır. OGK_330 tipi elemanlarda yayılı yükleme altında yapılan daha sonraki deneylerde ise mesnet ile başlık arasında kullanılan bu ara plakaların mesnetten göçmeyi engellediği ve daha doğru bir test yapılmasının sağlandığı gözlemlenmiştir. Burada mesnetten göçen deney elemanının daha fazla kapasite göstermesinin sebebi ise göçme noktasının yükleme merkezine olan uzaklığıdır. Aynı grafikte mesnetten göçen deney elemanının dışındaki diğer deney elemanlarının ise kapasitelerinin ve deplasmanlarının birbirine yakın ve tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.60’da OGK_330 üzerinde yayılı yükleme altında yapılan 4 adet test sonucunda yük-deplasman grafikleri karşılaştırılmıştır. Yayılı yükleme altında nihai yüke ulaşıldıktan sonra bir süre deplasman yapmaya devam etmiş ve bu sırada başlığın deformasyonu çok net bir şekilde göz ile görülebilmektedir ardından ise göçme gerçekleşmiştir. Yayılı yükleme altında kiriş deplasman yaparken önce başlık akmaya başlamış ve başlık aktıktan sonra gövdede göçme meydana gelmiştir. Gövde de göçme meydana gelene kadar başlığın akması sağlamış ve önce başlık büyük deformasyona uğradıktan sonra gövdede göçme meydana gelmiştir. Bu durum da ondülin gövdeli kiriş tasarımında istenilen bir göçme şeklidir.



Şekil 4.60. OGK_330 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri

Çizelge 4.10. OGK_330 Kirişlerin test sonuçları

Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Davranışı	Ortalama Dayanım (kN)
TGOK_330 Test_1	Yayıllı	Trapezoidal	134.44	Başlıkta yerel burkulma	139.48
TGOK_330 Test_2	Yayıllı	Trapezoidal	144.51	Başlıkta yerel burkulma	
SGOK_330 Test_1	Yayıllı	Sinüzoidal	160.09	Başlıkta yerel burkulma	151.11
SGOK_330 Test_2	Yayıllı	Sinüzoidal	142.12	Başlıkta yerel burkulma	
OGK_330 Kirişlerin Yayıllı Yükleme Durumunda Ortalama Dayanımı					145.30

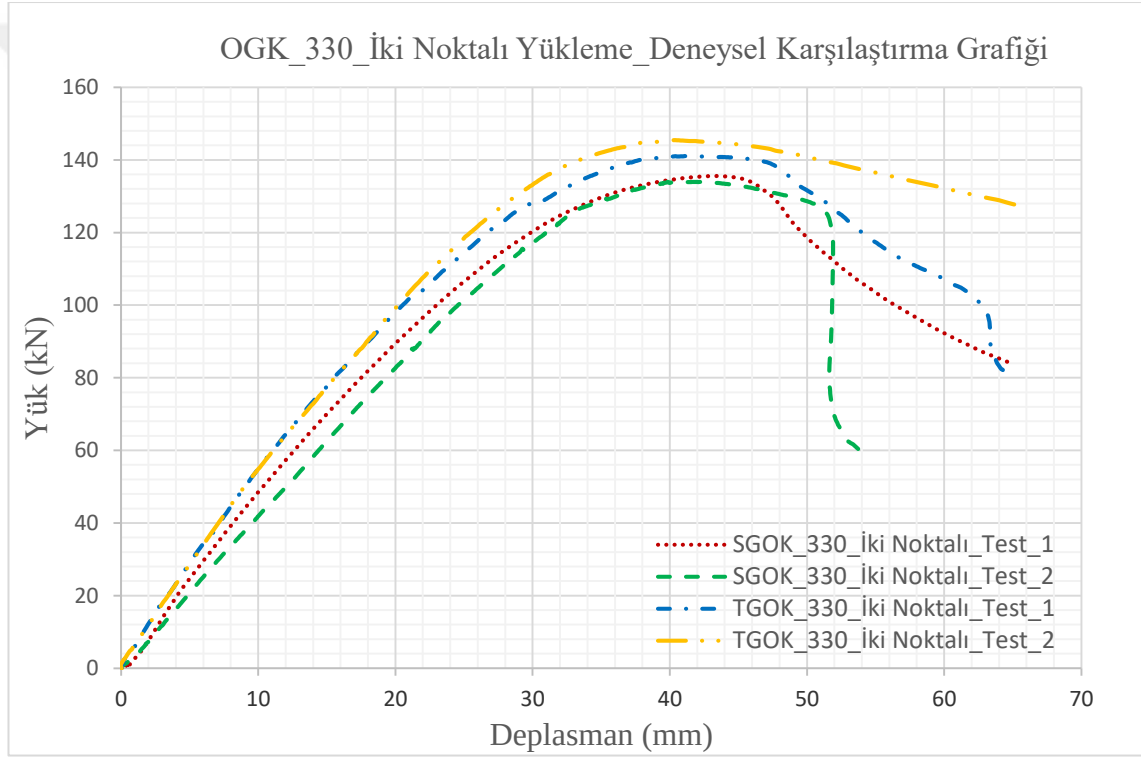
4.11. OGK_330 İki Noktalı Yükleme Karşılaştırılması

Trapezoidal ve Sinüzoidal gövdeli ondülin kirişlerin 2 adet trapezoidal ve 2 adet Sinüzoidal olarak deneyleri yapılmıştır. OGK_330 için iki noktalı yükleme altında yapılan 4 adet test sonuçlarının yük-deplasman karşılaştırılması Şekil 4.58’de gösterilmiştir. Grafikteki maksimum dayanımlar ise Çizelge 4.10’de gösterilmiştir.

İki noktalı yükleme altında OGK_330 tipi deney elemanları için yük-deplasman grafik sonuçları deney elemanlarının yaklaşık aynı kapasiteye sahip olduğunu,

deplasmanlarının ve davranışlarının benzer olduğunu göstermektedir. SGOK_330_Test_2 deney elemanında aynı grafikteki diğer deney elemanlarına kıyasla daha az deplasman yaptığı ve daha ani bir göçme olduğu gözlemlenmiştir. Deney elemanları arasındaki kapasite ve deplasman farklılıkları ise homojen olmayan malzeme, deney elemanları içinde küçükte olsa değişebilen kupon test sonuçları, imalat hataları ve eksantrisite oluşturacak yüklemelerden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.61’de yük-deplasman grafiği incelendiğinde göçme durumunda deplasman değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir. Burada grafikte gözükten ani göçmeler, başlıktan önce gövdenin göçtüğünü ve gövde göçtükten sonra başlığın aktığını göstermektedir. Bu göçme durumu Bölüm 4’te SEA analizlerinde de ispatlanmıştır. Deney sırasında da kayıt alınan videolarda da gövdenin narin olmasından ve yükün tekil etkimesinden kaynaklı göçmenin önce gövdeden sonra başlıktan olduğu açıkça gözlemlenmiştir.



Şekil 4.61. OGK_330 İki noktalı yükleme altında yük-deplasman grafikleri

Çizelge 4.11. OGK_330 Kirişlerin test sonuçları

Test Adı	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Davranışı	Ortalama Dayanım (kN)
TGOK_330 Test_1	İki noktalı	Trapezoidal	140.97	Gövdede yerel burkulma	143.10
TGOK_330 Test_2	İki noktalı	Trapezoidal	145.23	Gövdede yerel burkulma	
SGOK_330 Test_1	İki noktalı	Sinüzoidal	135.34	Gövdede yerel burkulma	134.60
SGOK_330 Test_2	İki noktalı	Sinüzoidal	133.86	Gövdede yerel burkulma	
OGK_330 Kirişlerin İki Noktalı Yükleme Durumunda Ortalama Dayanımı					138.90

Yapılan deneylerin sonuçlarında genel olarak özetlenen karşılaştırmalı kıyaslama tablosunda trapezioadal gövdeli kirişlerin eğilme altında Sinüzoidal gövdeli kirişlere oranla daha yüksek kapasiteye sahip olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 4.11).

Çizelge 4.12. Tüm kirişleri test sonuçları genel özeti

TEST	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	Göçme Yüğü(kN)	Göçme Davranışı	Ort. Dayanım (kN)
TGOK_500_Test_1	Yayılı	Trapezoidal	566.28	Başlıkta yerel burkulma	539.55
TGOK_500_Test_2	Yayılı	Trapezoidal	512.81	Başlıkta yerel burkulma	
TGOK_500_Test_1	İki Noktalı	Trapezoidal	460.95	Gövdede yerel Burkulma	481.98
TGOK_500_Test_2	İki Noktalı	Trapezoidal	503.01	Gövdede yerel Burkulma	
SGOK_500_Test_1	Yayılı	Sinüzoidal	506.19	Başlıkta yerel burkulma	505.40
SGOK_500_Test_2	Yayılı	Sinüzoidal	504.60	Başlıkta yerel burkulma	
SGOK_500_Test_1	İki Noktalı	Sinüzoidal	471.12	Gövdede yerel Burkulma	461.81
SGOK_500_Test_2	İki Noktalı	Sinüzoidal	452.49	Gövdede yerel Burkulma	
TGOK_415_Test_1	Yayılı	Trapezoidal	287.92	Başlıkta yerel burkulma	292.64
TGOK_415_Test_2	Yayılı	Trapezoidal	297.36	Başlıkta yerel burkulma	
TGOK_415_Test_1	İki Noktalı	Trapezoidal	270.88	Gövdede yerel Burkulma	274.25
TGOK_415_Test_2	İki Noktalı	Trapezoidal	277.62	Gövdede yerel Burkulma	
SGOK_415_Test_1	Yayılı	Sinüzoidal	282.65	Başlıkta yerel burkulma	288.29
SGOK_415_Test_2	Yayılı	Sinüzoidal	293.93	Başlıkta yerel burkulma	
SGOK_415_Test_1	İki Noktalı	Sinüzoidal	268.92	Gövdede yerel Burkulma	273.58
SGOK_415_Test_2	İki Noktalı	Sinüzoidal	278.24	Gövdede yerel Burkulma	
TGOK_330_Test_1	Yayılı	Trapezoidal	134.44	Başlıkta yerel burkulma	139.48
TGOK_330_Test_2	Yayılı	Trapezoidal	144.51	Başlıkta yerel burkulma	
TGOK_330_Test_1	İki Noktalı	Trapezoidal	140.97	Gövdede yerel Burkulma	143.10
TGOK_330_Test_2	İki Noktalı	Trapezoidal	145.23	Gövdede yerel Burkulma	
SGOK_330_Test_1	Yayılı	Sinüzoidal	160.09	Başlıkta yerel burkulma	151.11
SGOK_330_Test_2	Yayılı	Sinüzoidal	142.12	Başlıkta yerel burkulma	
SGOK_330_Test_1	İki Noktalı	Sinüzoidal	135.34	Gövdede yerel Burkulma	134.60
SGOK_330_Test_2	İki Noktalı	Sinüzoidal	133.86	Gövdede yerel Burkulma	

Çizelge 4.13. Ondülin gövdeli kirişler için karşılaştırmalı kıyaslama tablosu

Gövde Tipi	Gövde Yüksekliği	Yükleme Tipi	Göçme Yüğü	Kapasite Fazlası	Gövde Tipine Göre Kapasitesi Fazla Olan
Sinüzoidal	500	Yayılı	505.40	6.76%	Trapeziodal > Sinüzoidal
Trapeziodal	500	Yayılı	539.55		
Sinüzoidal	500	İki Noktalı	461.81	4.37%	Trapeziodal > Sinüzoidal
Trapeziodal	500	İki Noktalı	481.98		
Sinüzoidal	415	Yayılı	288.29	1.51%	Trapeziodal > Sinüzoidal
Trapeziodal	415	Yayılı	292.64		
Sinüzoidal	415	İki Noktalı	273.58	0.24%	Trapeziodal > Sinüzoidal
Trapeziodal	415	İki Noktalı	274.25		
Sinüzoidal	330	Yayılı	142.12	1.89%	Sinüzoidal > Trapeziodal
Trapeziodal	330	Yayılı	139.48		
Sinüzoidal	330	İki Noktalı	134.60	6.32%	Trapeziodal > Sinüzoidal
Trapeziodal	330	İki Noktalı	143.10		

4.12. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Kirişlerin Analizi

Ondülin gövdeli kirişlerinin yayılı ve iki noktadan yükleme altında yük taşıma kapasiteleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel veriler ile sonlu elemanlar analizi sonuçlarının kıyaslanması bu bölümde değerlendirilmiş olup her kiriş tipi için deneylerden elde edilen göçme yükü ortalamaları Abaqus/CAE 6.14-1 programında 10 kN artımla verilerek yük-deplasman grafikleri, eşdeğer gerilmeler (equivalent, von-mises stress), kesme gerilmeleri (shear stress) ve normal gerilmeler (normal stress) hesaplanmış ve bulunan değerlerden eşdeğer gerilme değerleri özet olarak verilmiştir. Bunlara ilave olarak, deney sonrası kirişlerin görselleri ile sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen görseller kirişlerin göçme modları ve şekil değiştirmelerine bağlı olarak karşılaştırmalı verilmiştir.

4.12.1. SOGK_500 SEA

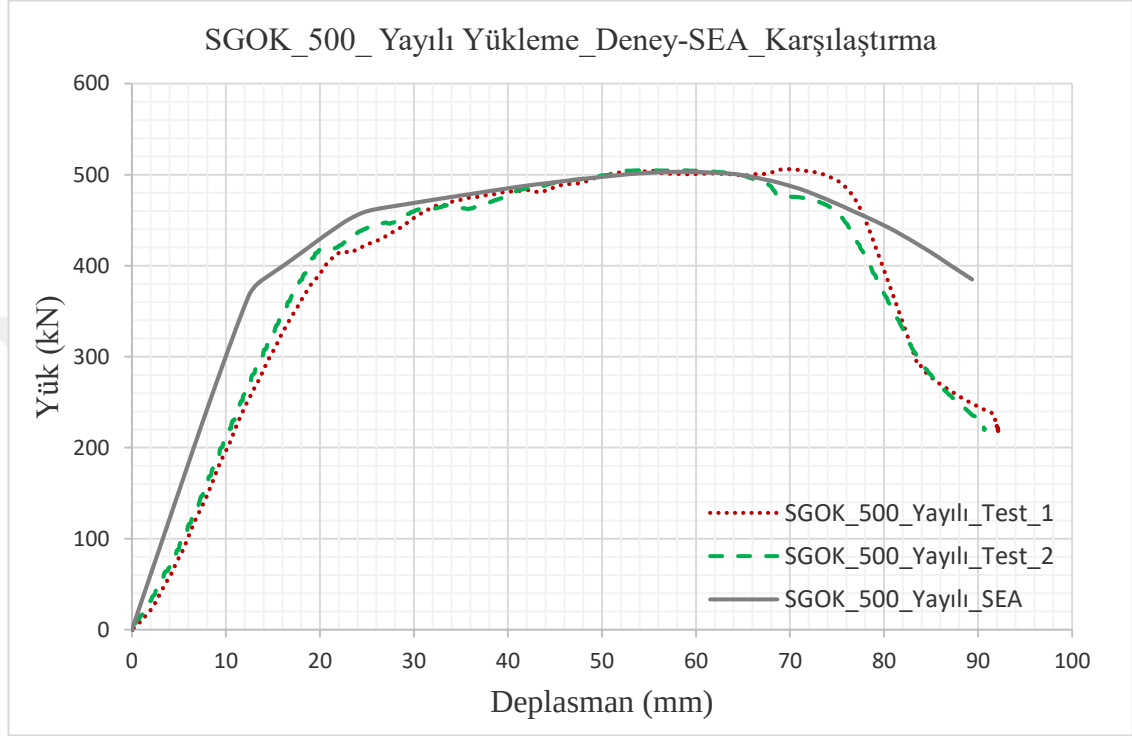
4.12.1.1. SGOK_500 yayılı yükleme SEA

Deneysel çalışmada yayılı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 505,40 kN göçme yükü elde edilmiştir. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine yayılı olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneysel çalışmada ara elemanın kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

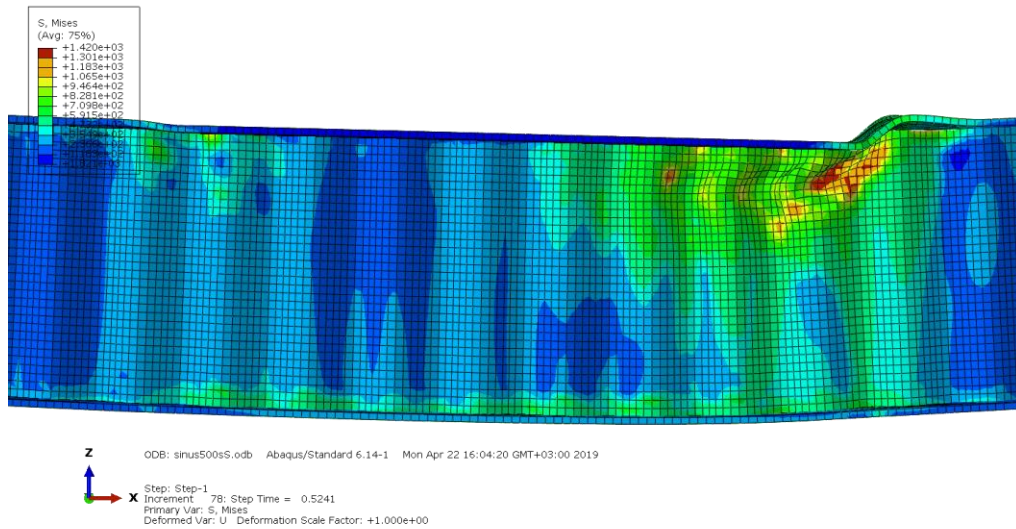
Şekil 4.63'de yayılı yükleme uygulanan alanın sağ tarafında büyük deformasyonlar gözlenirken sol tarafta daha küçük deformasyonlar gözlemlenmiştir. Bunun sebebi malzeme özelliklerinin homojen dağılmıyor olması, imalattan ya da

kaynaklamadan oluşabilecek dislokasyonlar veya yüklemenin deformasyon olan tarafa doğru daha fazla uygulanması gibi sebeplerdir.

Şekil 4.63’de gövdede ve başlıkta yerel burkulma detaylı olarak gözükmektedir. Şekil 4.66’da basit eğilme altındaki deformasyon durumu gözükmektedir. Şekil 4.62’de ise SGOK_500 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır.

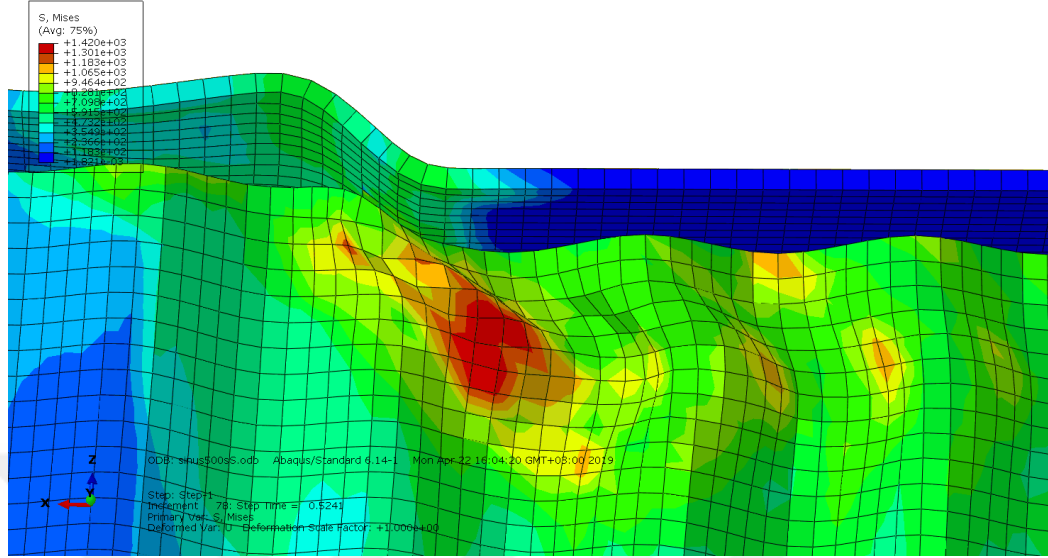


Şekil 4.62. SOGK_500 Yayıllı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma



Şekil 4.63. SGOK_500 Yayıllı yükleme altında deformasyon sonucu

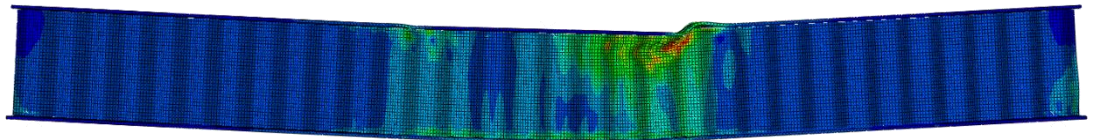
Şekil 4.64’de kiriş başlığındaki ve gövdesindeki SEA deformasyon sonucunun Şekil 4.65’deki deneysel deformasyon sonucu ile örtüştüğü gözlenmektedir.



Şekil 4.64. SGOK_500 Yayılı yükleme altında gövde ve başlıkta SEA deformasyon sonucu



Şekil 4.65. SGOK_500 Yayılı yükleme altında gövde ve başlıkta deneysel deformasyon sonucu



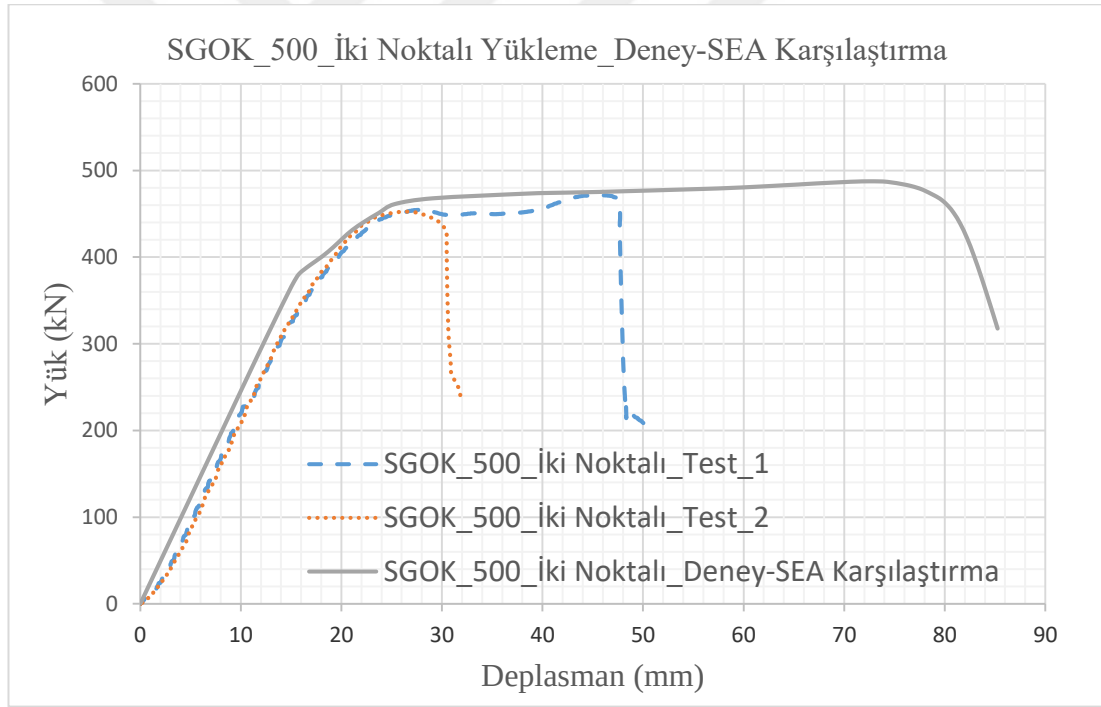
Şekil 4.66. SGOK_500 Yayılı yükleme altında genel deformasyon sonucu

4.12.1.2. SGOK_500 iki noktalı yükleme SEA

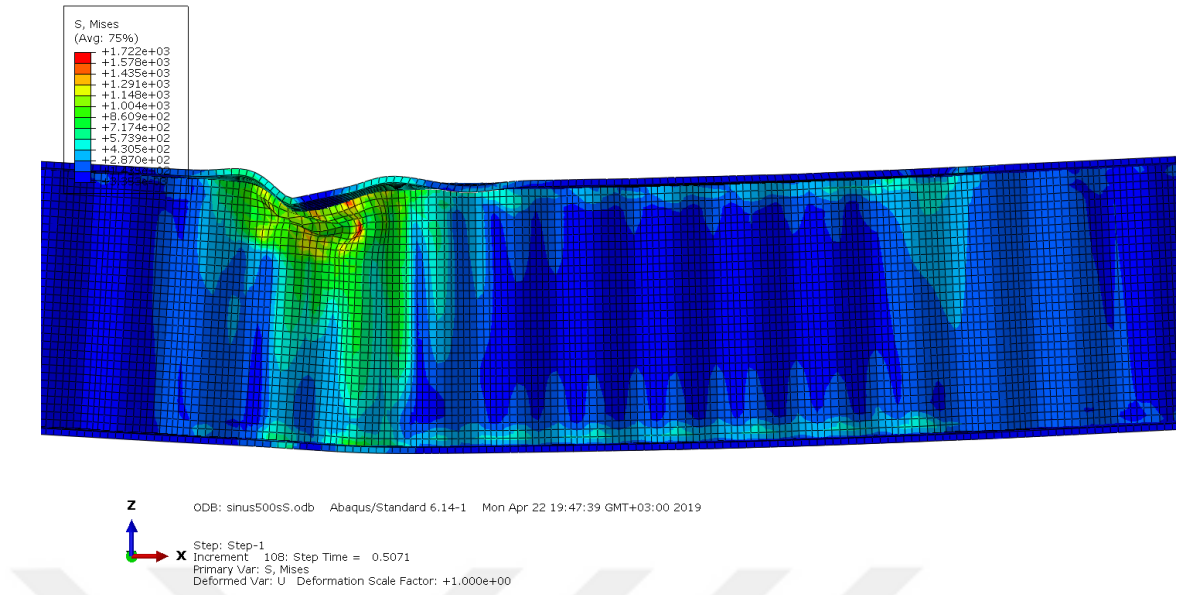
Deneyisel çalışmada iki noktalı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 486,84 kN göçme yükü elde edilmiştir. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine 110 cm aralık ile iki noktasal yük olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneyisel çalışmada ara elemanın kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

Şekil 4.68’de gövde ve başlıkta sağ tarafta küçük deformasyonlar gözükürken, sol tarafta büyük deformasyonlar gözlenmiştir. Bunun sebebi malzeme özelliklerinin homojen dağılmıyor olması, imalattan ya da kaynaklamadan oluşabilecek dislokasyonlar veya yüklemenin deformasyon olan tarafa doğru daha fazla uygulanması gibi sebeplerdir.

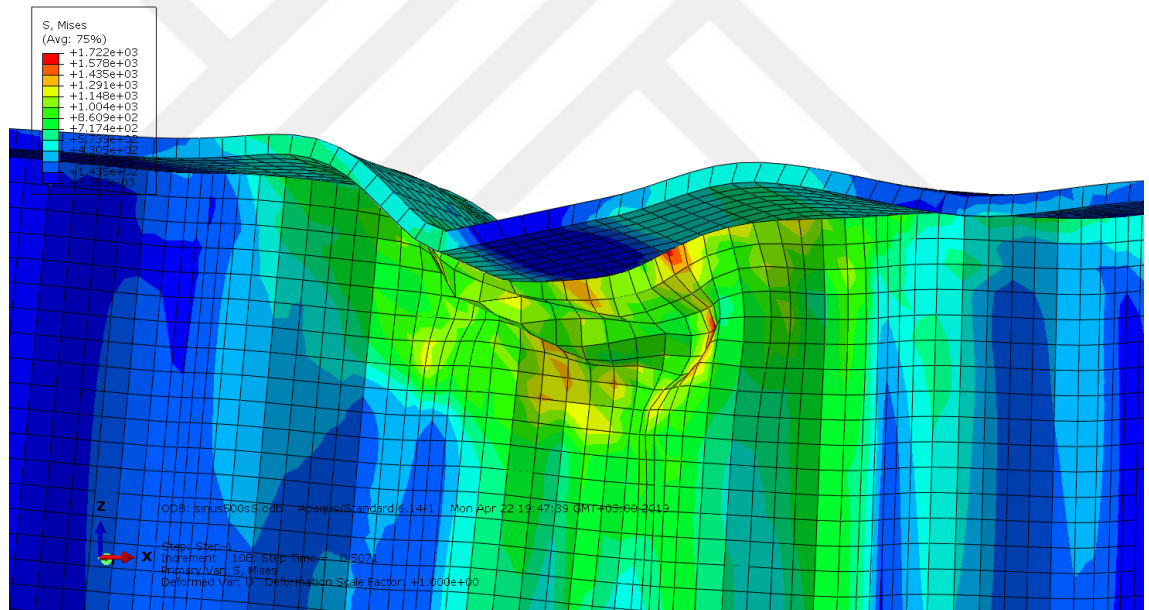
Şekil 4.68’de ise SGOK_500 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 4.69’da gövdede ve başlıkta yerel burkulma detaylı olarak gözükmemektedir. Şekil 4.70’de kirişin arka taraftan yük altındaki deformasyon durumu gözükmemektedir. Şekil 4.67’de kirişin deney sonrası deformasyon sonucu gözükmemektedir, kiriş başlığında ve gövdesinde oluşan deformasyon sonucunun SEA analiz sonuçlarına oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.



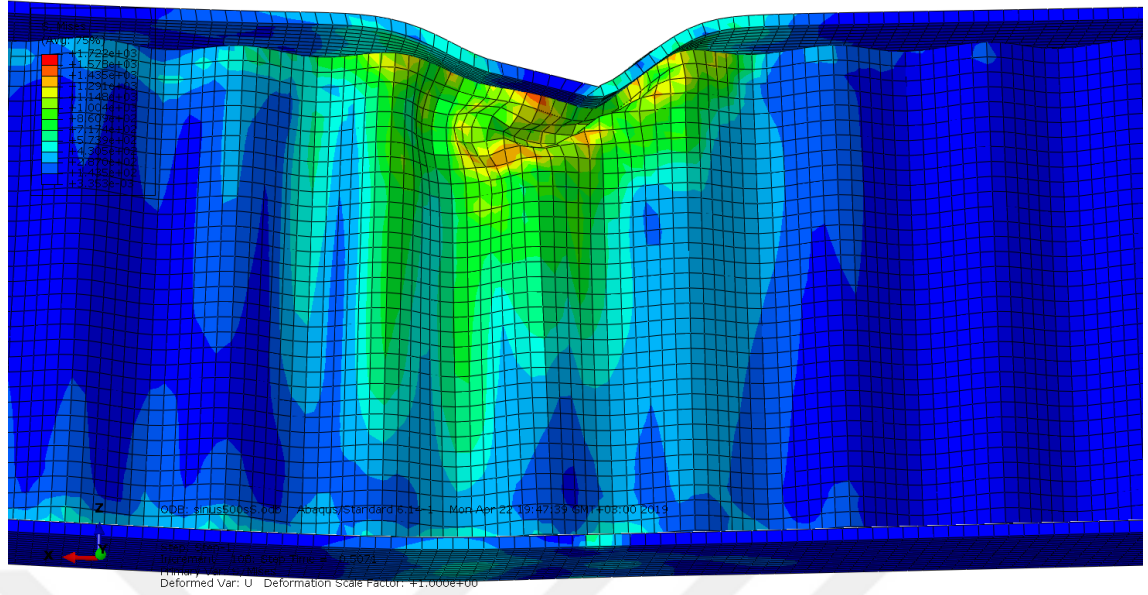
Şekil 4.67. SOGK_500 İki Noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma



Şekil 4.68. SGOK_500 İki noktalı yükleme altında deformasyon sonucu (ön taraf)

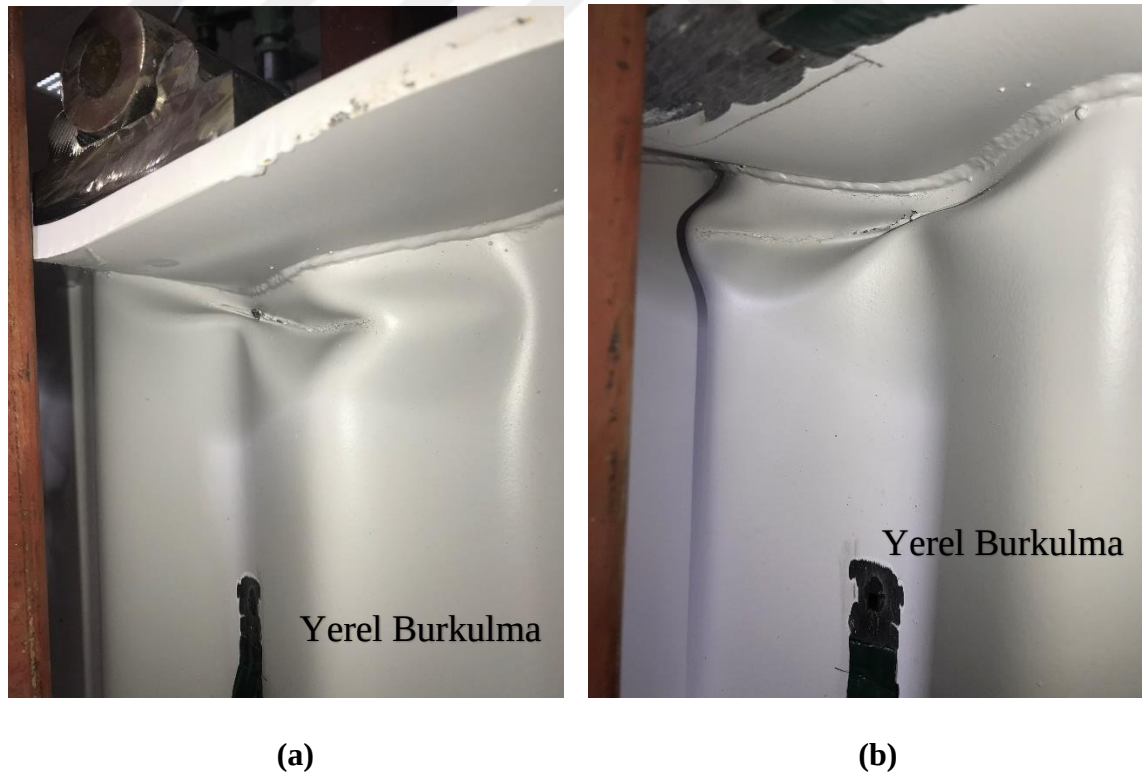


Şekil 4.69. SGOK_500 İki noktalı yükleme altında deformasyon sonucu (ön taraf)



Şekil 4.70. SGOK_500 İki noktalı yükleme altında deformasyon sonucu (arka taraf)

Şekil 4.71’de deneysel deformasyon sonucunda kiriş gövdesinin ön ve arka yüzlerinde oluşan deforme halleri incelendiğinde sonuçların SEA deformasyon sonuçları ile tutarlı bir davranış yaptığı gösterilmiştir.



Şekil 4.71. (a) SGOK_500 iki noktalı yükleme altında gövdedeki deformasyonun ön taraftan fotoğrafı; **(b)** SGOK_500 iki noktalı yükleme altında gövdedeki deformasyonun arka taraftan fotoğrafı

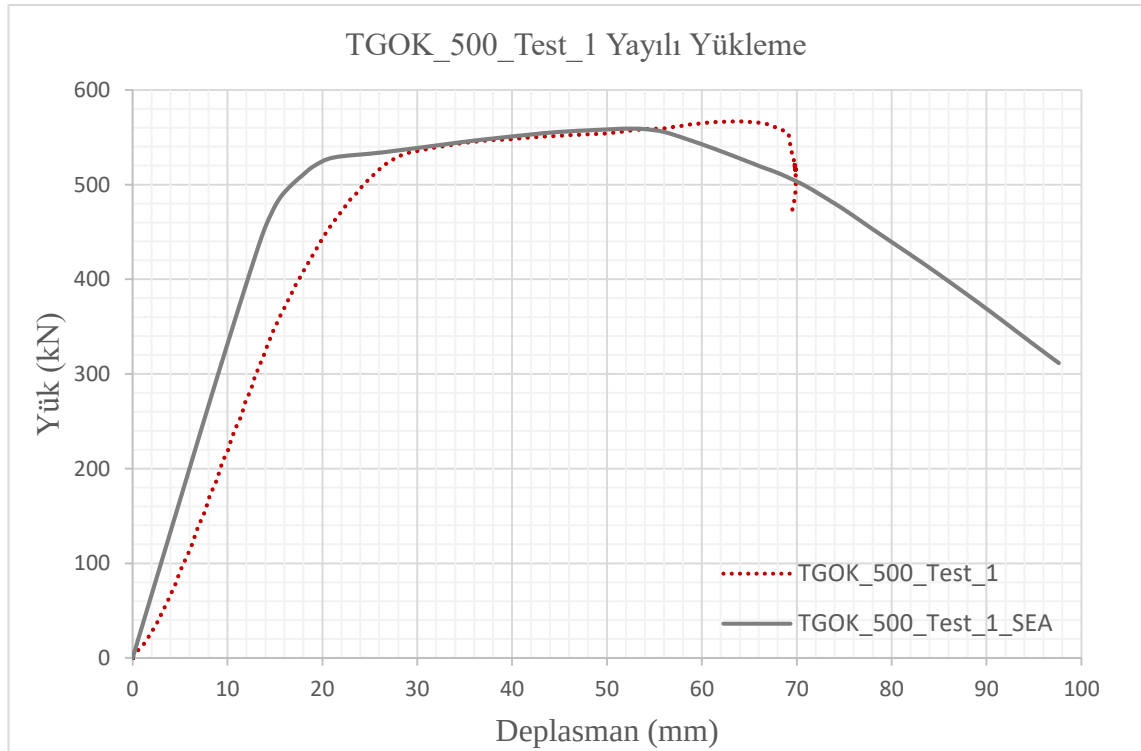
4.12.2. TOGK_500 SEA

4.12.2.1. TGOK_500 yayılı yükleme SEA

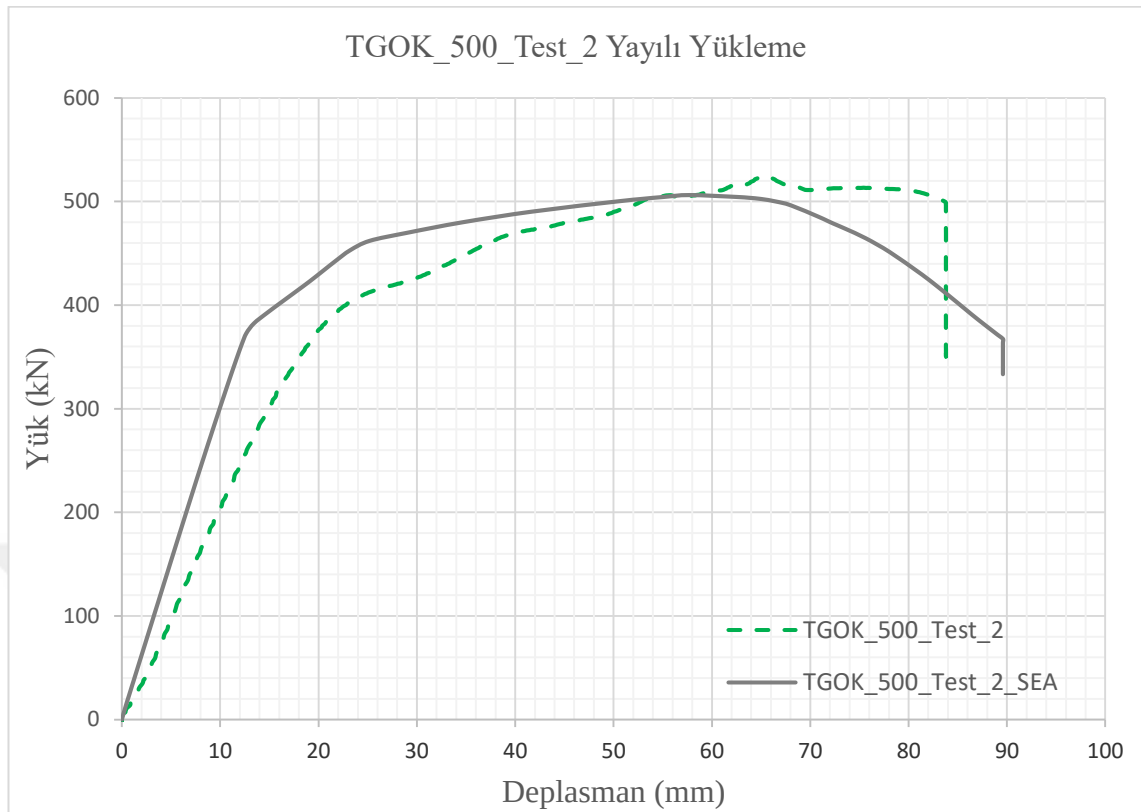
Deneyisel çalışmada yayılı yükleme sonucunda yapılan iki deneylerde Test_1 için 566,28 kN göçme yükü ölçülürken, Test_2 için 512,81 kN göçme yükü ölçülmüştür. Yapılan bu deneylerde iki deneyin göçme yükleri arasında %10,41 bir farklı kapasite gözlemlenmiş ve bunun sebebi araştırılmıştır. Burada deneylerden sonra her iki elemandan da ayrı ayrı 4'er adet hem başlıklardan hem gövdelerden kupon numunesi alınarak tekrar çekme testi uygulanmıştır. Yapılan kupon testlerinde göçme yükü fazla olan elemandan alınan kuponların daha yüksek akma mukavemetlerine sahip olduğu görülmüş ve SEA için ortalama bir kupon verisi kullanılmasının yerine her ikisi içinde ayrı kupon verileri ile ayrı ayrı SEA analizleri yapılmış ve SEA sonuçları ile deneyisel sonuçların çok yakınsadığı gözlemlenmiştir.

Yükleme kirişin üst başlığının orta bölgesine yayılı olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneyisel çalışmada yük hücresinin kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kiriş parçalara bölerek yapılmıştır.

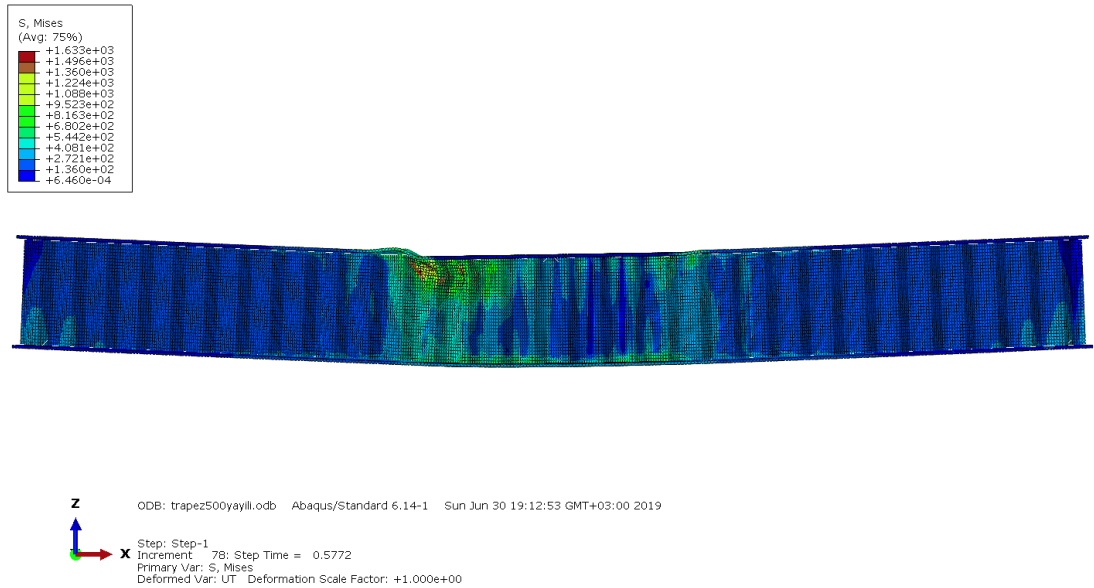
Şekil 4.72'de TOGK_500_Test_1 yayılı yükleme altında Deney-SEA karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 4.73'de TOGK_500_Test_2 yayılı yükleme altında Deney-SEA karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 4.74, Şekil 4.75, Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de SEA deformasyon sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.72. TOGK_500_Test_1 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma

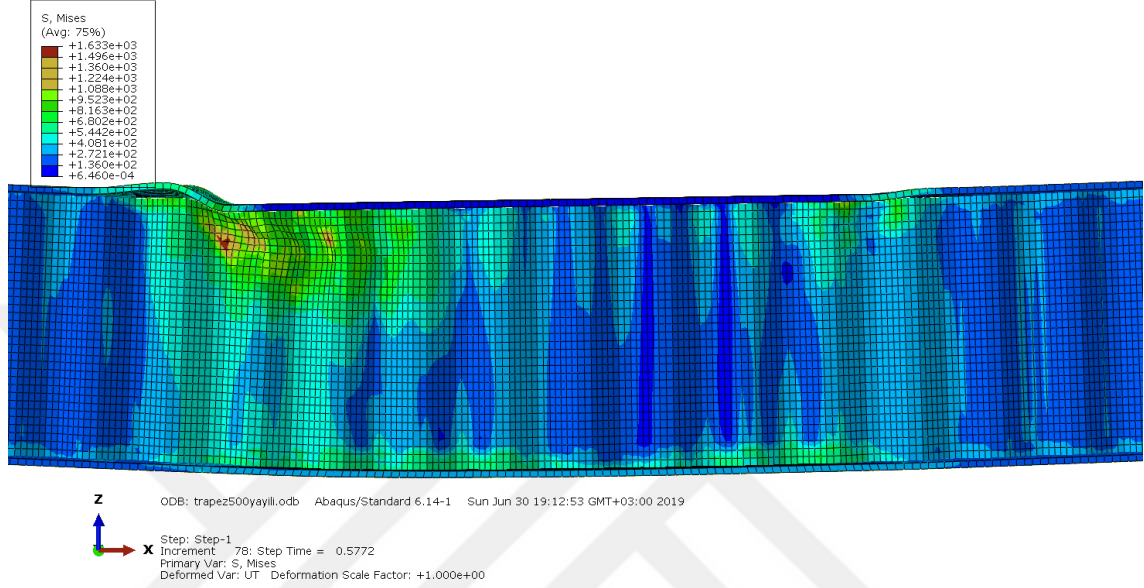


Şekil 4.73. TOGK_500_Test_2 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma

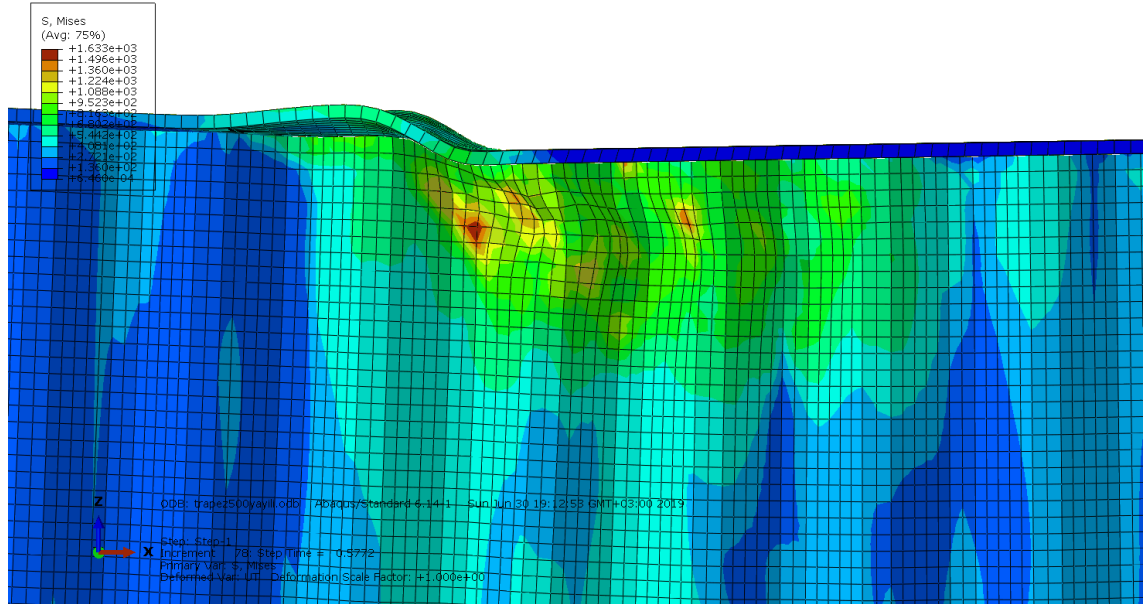


Şekil 4.74. TGOK_500 Yayılı yükleme basit eğilme durumu SEA deformasyon sonucu

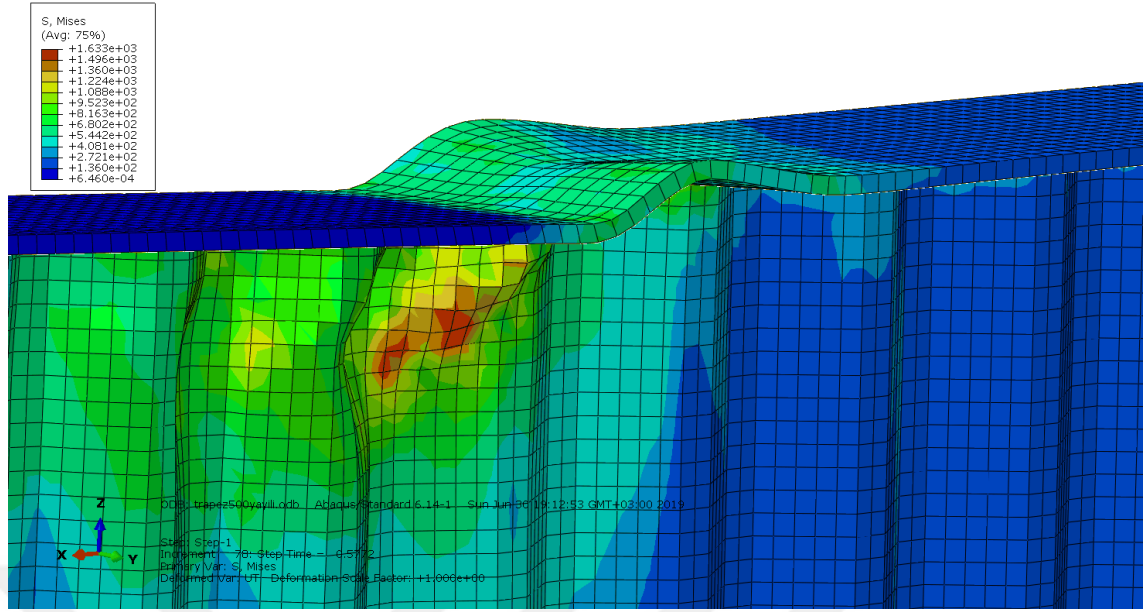
Deneysel süreçte ara eleman ile yayılı yüklemenin uygulandığı bölgenin hemen altında gözle görülür bir deformasyon olmamıştır. SEA sonuçlarında da yayılı yükün başlıka etki eden yüzeyi programda farklı yüzey alan tanımlama durumları denenmiş ve başlıkta yükün etkidiği alan rijit body olarak tanımlandığında deneysel sonuçlarla tutarlı davranışlar yakalanmıştır. Şekil 4.75’de görülen deformasyon durumunda başlıkta ve gövde de akma gerçekleşene kadar yayılı yükün etki ettiği alanda gerilme oluşmamıştır.



Şekil 4.75. TGOK_500 Yayılı yükleme altında ara eleman ile yüklemenin uygulandığı bölgenin altındaki yük dağılımı ve SEA deformasyon sonucu



Şekil 4.76. TGOK_500 Yayılı yükleme başlıkta ve gövdede yerel burkulma SEA deformasyon sonucu

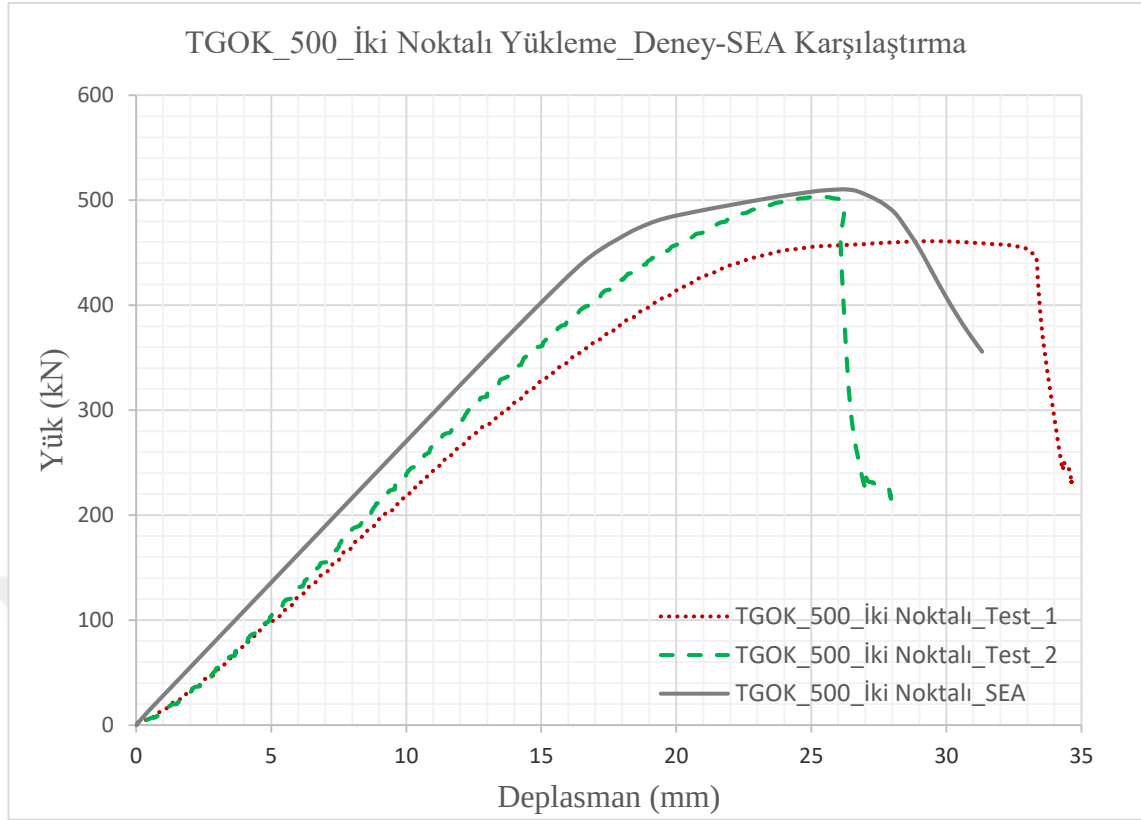


Şekil 4.77. TGOK_500 Yayılı yükleme başlıkta ve gövdede SEA deformasyonu

4.12.2.2. TGOK_500 iki noktalı yükleme SEA

Deneyisel çalışmada iki noktalı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 460,58 kN göçme yükü elde edilmiştir. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine 110 cm aralık ile iki noktasal yük olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneyisel çalışmada ara elemanın kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

Şekil 4.78’de ise SGOK_500 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır. Grafik incelendiğinde Test_1 için SEA analiz sonucunda kapasitenin yakalandığı fakat Test_2’den uzak olduğu görülmektedir. Bunun sebebi malzeme özelliklerinin kupon çekme test sonuçlarında ve kirişin kendi içerisinde homojen davranış göstermemesi ya da yüklemedeki 2-3mm ekstantrisiteden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.



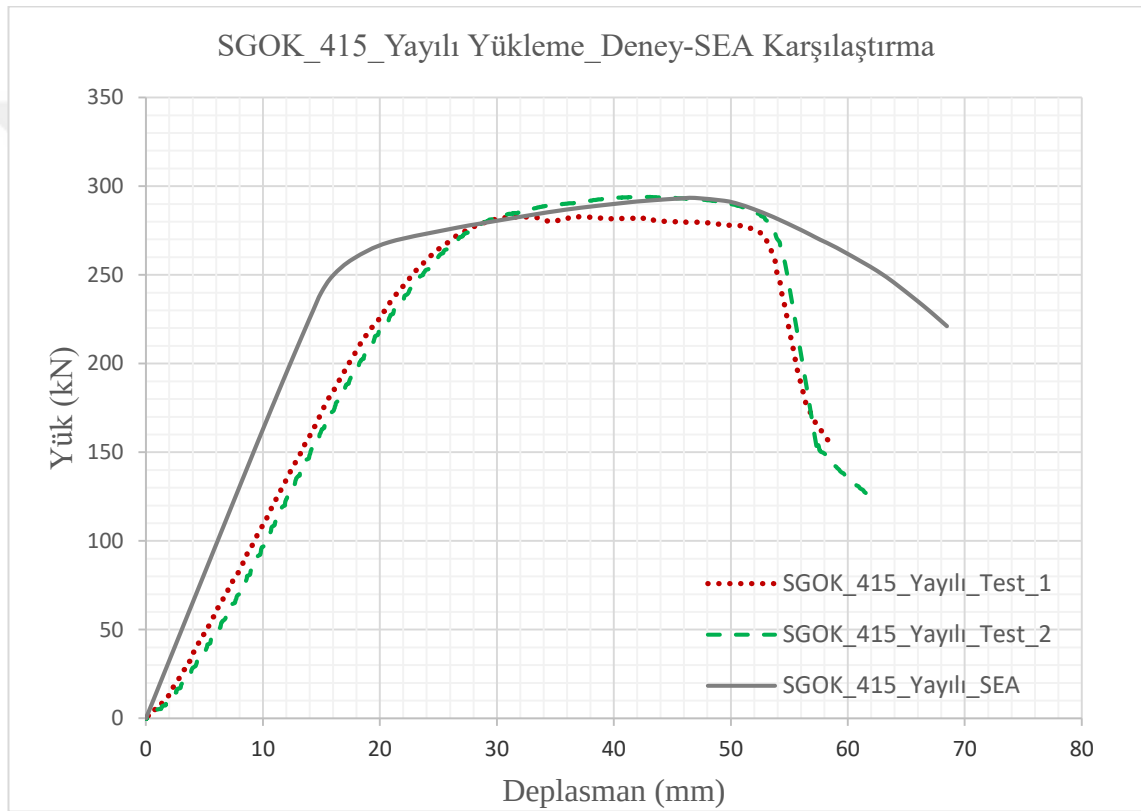
Şekil 4.78. TOGK_500 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma

4.12.3. SOGK_415 SEA

4.12.3.1. SGOK_415 yayılı yükleme SEA

Deneyssel çalışmada yayılı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 293,40 kN göçme yükü elde edilmiştir. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine yayılı olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneyssel çalışmada ara elemanın kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

Şekil 4.79'da ise SGOK_500 için Test_1 ve Test_2'nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 4.79. SOGK_415 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma

4.12.3.2. SGOK_415 iki noktalı yükleme SEA

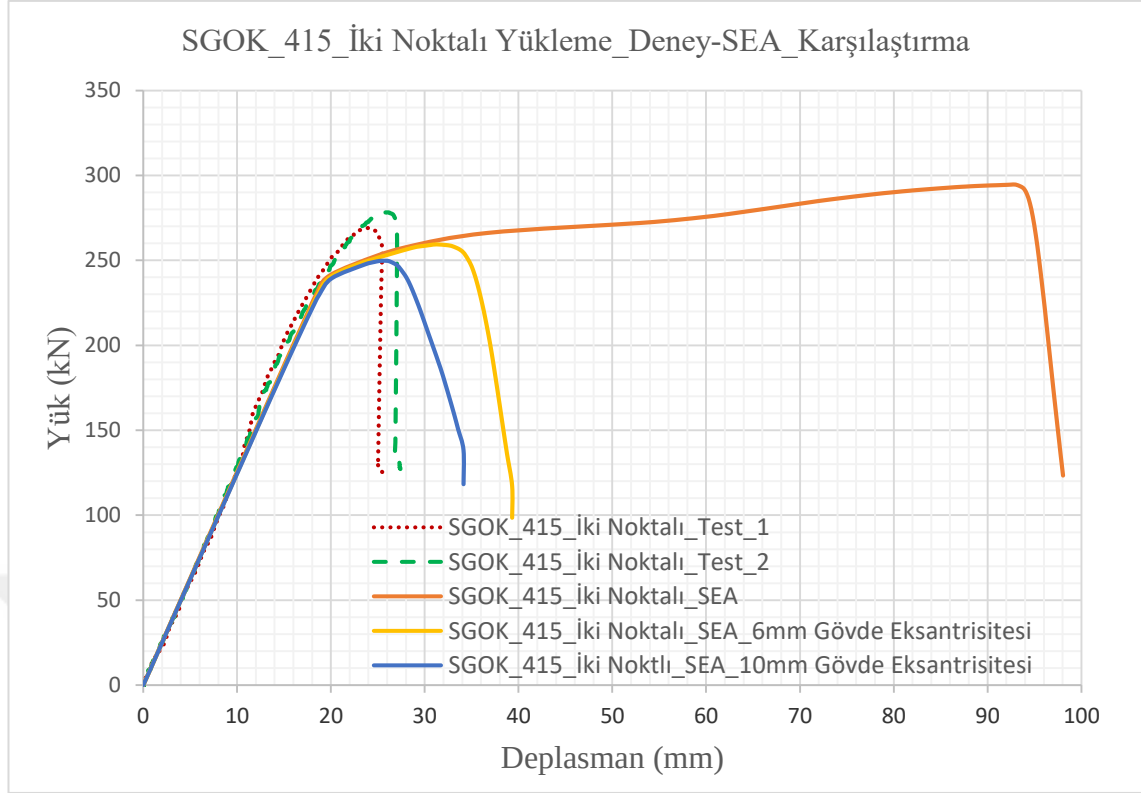
Deneyssel çalışmada iki noktalı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 273,58 kN göçme yükü elde edilmiştir. SEA sonuçlarında ise sırasıyla başlıklar ile gövdenin merkezli olarak imal edildiği durum için yapılan SEA için 248,24 kN, gövdenin başlıklar ile 6 mm eksantrik olduğu durum için yapılan SEA için 258,75 kN, gövdenin başlıklar ile 10 mm eksantrik olduğu durum için yapılan SEA için 294,58 kapasite elde edilmiştir. SEA sonucundaki deplasman sonucunun deneyssel sonuçtan elde edilen deplasman sonucundan yaklaşık 68 mm daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi araştırılmıştır, yüklemenin tam merkezli olarak aktarılmasında, gövde ile başlıkların tam

merkezli olarak kaynatılmamış olması ve yükleme esnasında ara elemanın tam olarak merkezli yük aktaramaması gibi sebeplerin bir tanesi ya da birden fazlasının birleşik bir etki oluşturmaktadır. Bu sebeplerden hareketle sırasıyla 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm ve 10 mm gövde eksantrisitesi oluşturulacak şekilde analizler yapılmış ve deneysel test sonuçları ile kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. 10 mm gövde eksantrisitesi oluşturulan SEA sonucunda deplasmanın oldukça düştüğü ve SEA sonuç grafiği ile deneysel sonuç grafiğinin birbirine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Deneysel eleman üzerinden deney sonrasında kumpas ile ölçüldüğünde ise gövdenin başlık merkezinden yaklaşık 3 mm kayık olarak kaynaklandığı görülmüş ve yüklemeden kaynaklı da oluşabilecek 7 mm hata ile beraber sonuç SEA sonucu ile de doğrulanmıştır.

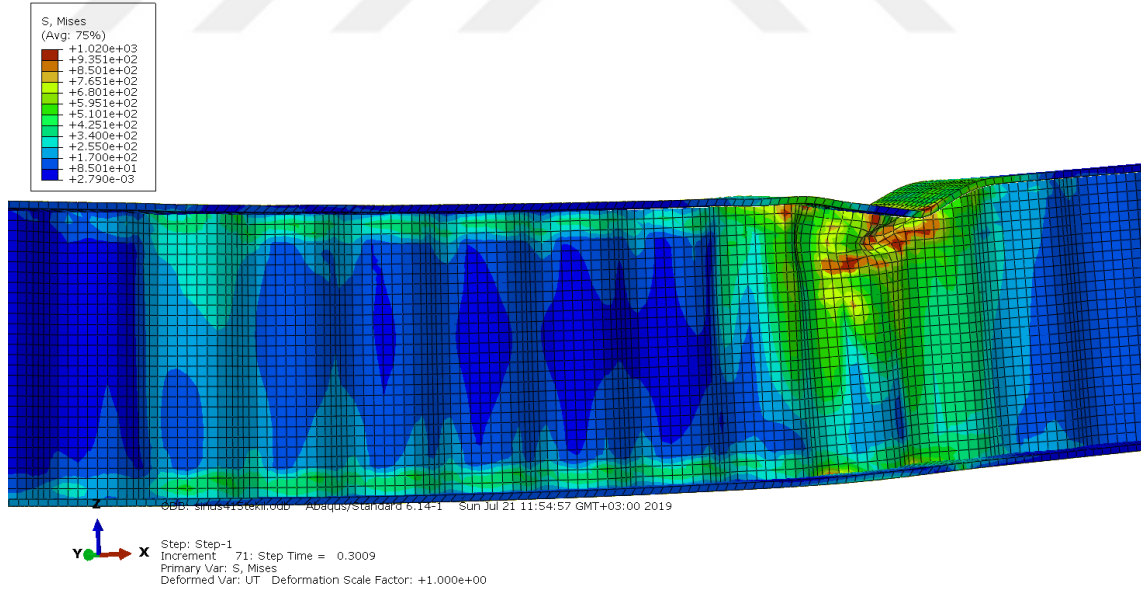
Bu analizler sonucunda ise gövde eksantrisitesinin, yüklemenin eksantrik olarak uygulanmasının ya da kirişin üst başlığının deney esnasında hareket ederek yüklemenin tam olarak simetrik yapılamamasının özellikle ince gövde kesitli çelik kiriş elemanlarda deplasman kapasitesine yüksek oranda etki ettiği deneysel sonuçlarla SEA sonuçlarının karşılaştırılması ile ispatlanmıştır.

Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine 110 cm aralık ile iki noktasal yük olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneysel çalışmada ara elemanın kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

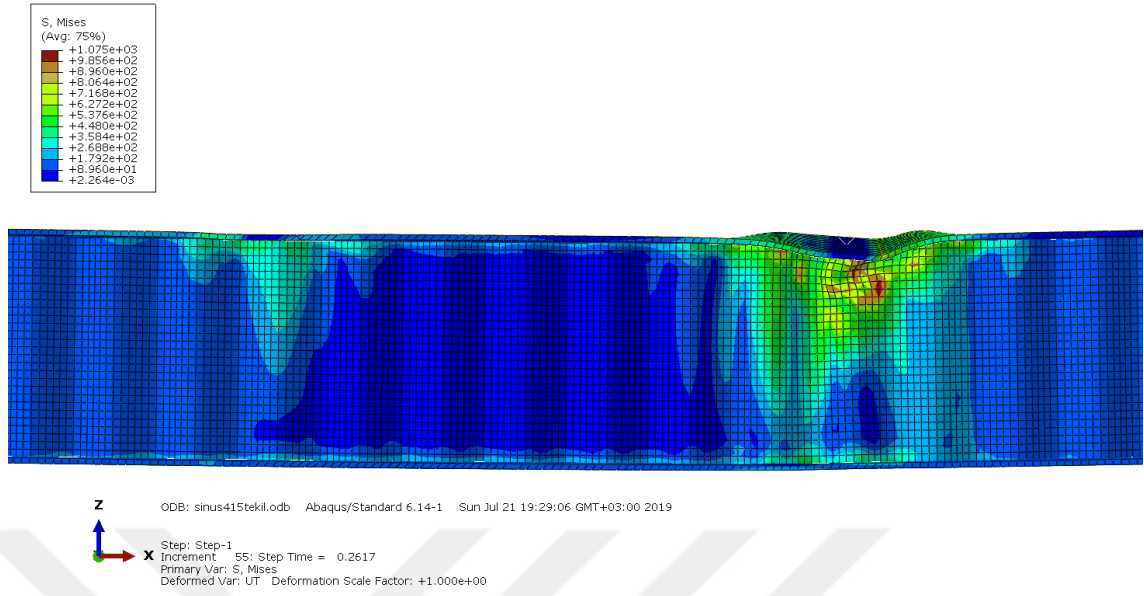
Şekil 4.80’de ise SGOK_500 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 4.81’de kirişin ön yüzünde SEA deformasyon sonucunda kiriş başlığında ve gövdesindeki deformasyon sonuçları gözükmemektedir. Şekil 4.82’de ise kirişin arka yüzünden SEA deformasyon sonucu gözükmemektedir.



Şekil 4.80. SOGK_415 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma



Şekil 4.81. SOGK_415 İki noktalı yükleme altında SEA deformasyon sonucu



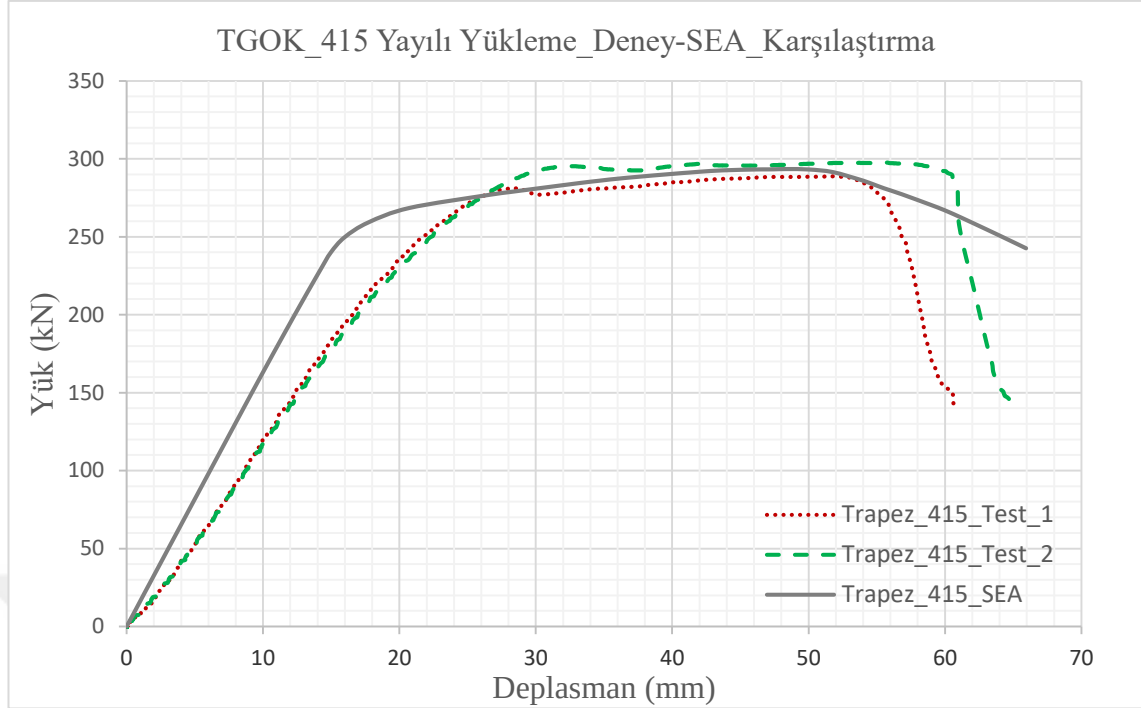
Şekil 4.82. SOGK_415 İki noktalı yükleme altında SEA deformasyon sonucu

4.12.4. TOGK_415 SEA

4.12.4.1. TGOK_415 yayılı yükleme SEA

Deneyisel çalışmada yayılı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 292,64 kN göçme yükü elde edilmiştir. SEA sonuçlarında ise elde edilen kapasite ise 293,18 kN olarak ölçülmüştür. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine yayılı olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneyisel çalışmada ara elemanın kiriş üst başlığına temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

Şekil 4.83’de ise SGOK_500 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 4.83. TOGK_415 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma

4.12.4.2. TGOK_415 iki noktalı yükleme SEA

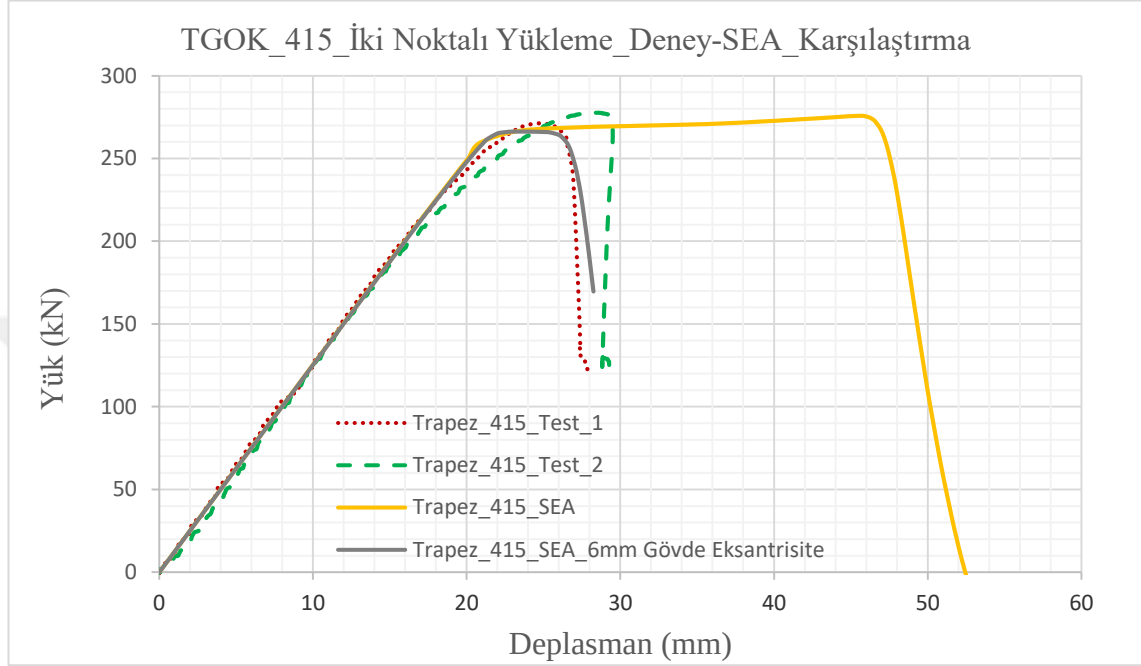
Deneyisel çalışmada yayılı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 270,58 kN göçme yükü elde edilmiştir. SEA analizinde ise 274,25 kN göçme yükü elde edilerek kapasite yakalanmıştır fakat SEA sonucundaki deplasman sonucunun deneyel sonuçtan elde edilen deplasman sonucundan yaklaşık 16 mm daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi araştırılmıştır, yüklemenin tam merkezli olarak aktarılmaması, gövde ile başlıkların tam merkezli olarak kaynatılmamış olması ve yükleme esnasında ara elemanın tam olarak merkezli yük aktaramaması gibi sebeplerin bir tanesi ya da birden fazlasının birleşik bir etki oluşturmasıdır. Bu sebeplerden hareketle sırasıyla 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm ve 6 mm gövde eksantrisitesi oluşturulacak şekilde analizler yapılmış ve deneyel test sonuçları ile kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. 6 mm gövde eksantrisitesi oluşturulan SEA sonucunda deplasmanın oldukça düştüğü ve SEA sonuç grafiği ile deneyel sonuç grafiğinin birbirine yakınsadığı gözlemlenmiştir. Deneyel eleman üzerinden deney sonrasında kumpas ile ölçüldüğünde ise gövdenin başlık merkezinden yaklaşık 2 mm kayık olarak kaynaklandığı görülmüş ve yüklemekten kaynaklı da oluşabilecek 4 mm hata ile beraber sonuç SEA sonucu ile de doğrulanmıştır.

Bu analizler sonucunda ise gövde eksantrisitesinin, yüklemenin eksantrik olarak uygulanmasının ya da kirişin üst başlığının deney esnasında hareket ederek yüklemenin tam olarak simetrik yapılamamasının özellikle ince gövde kesitli çelik kiriş elemanlarda deplasman kapasitesine yüksek oranda etki ettiği deneyel sonuçlarla SEA sonuçlarının karşılaştırılması ile ispatlanmıştır.

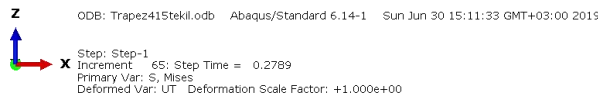
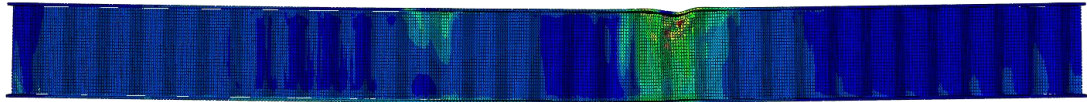
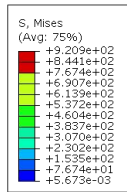
Yük kirişin üst başlığının ortasından kenarlara doğru merkezi 550 mm olacak şekilde iki adet 100x200 mm² plaka ile rigid body tanımlaması ile uygulanmıştır.

Kuvvetin uygulandığı alan deneysel çalışmada ara elemanın kiriş üst başlığına temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

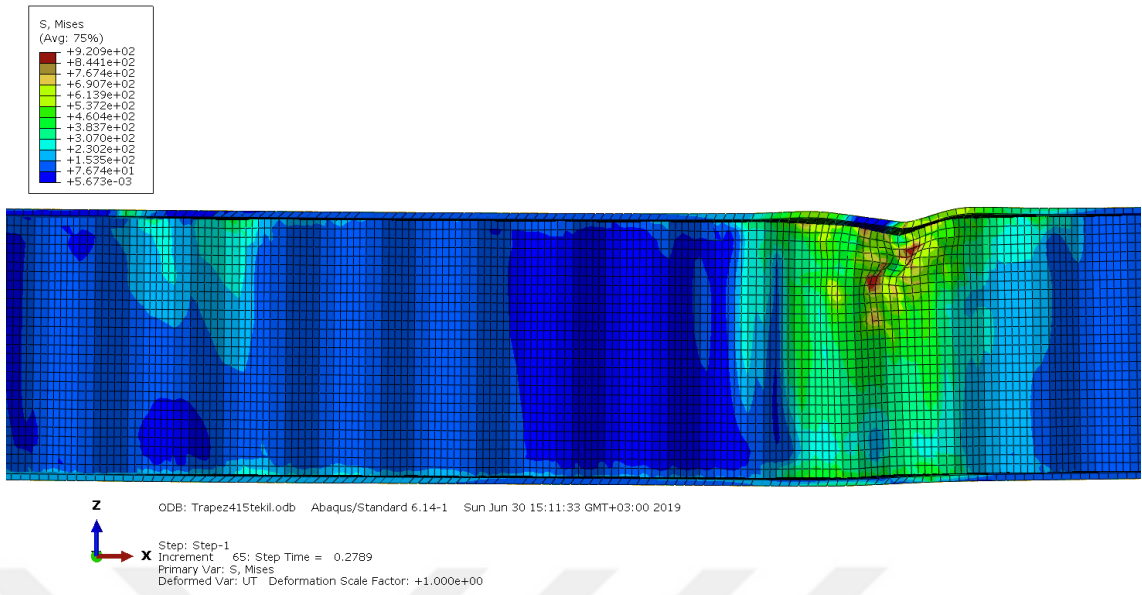
Şekil 4.84’de ise TGOK_415 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır.



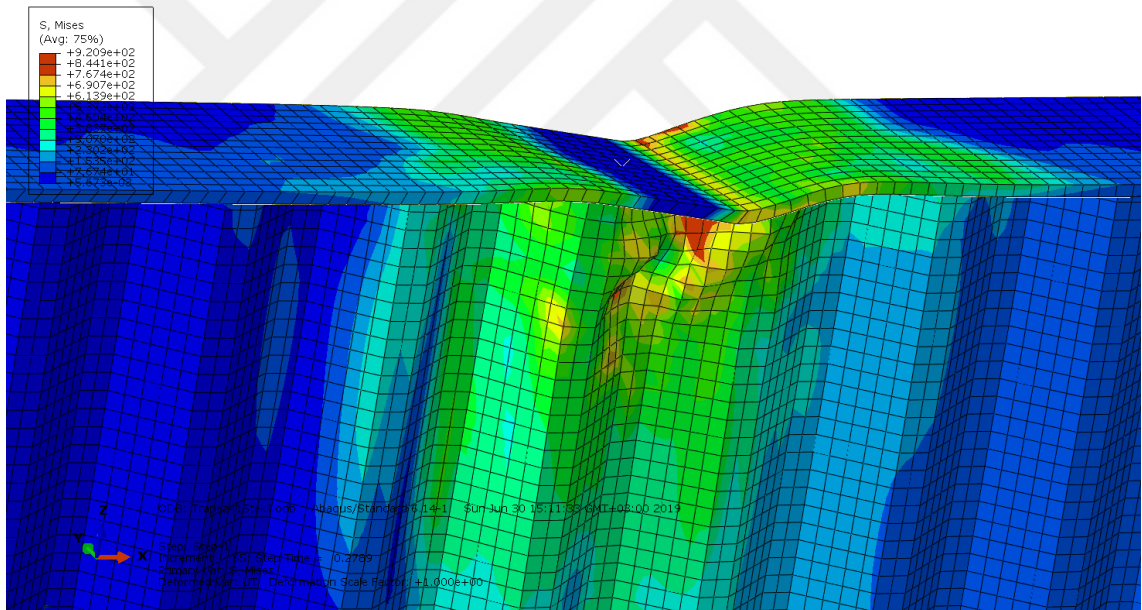
Şekil 4.84. TOGK_415 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma



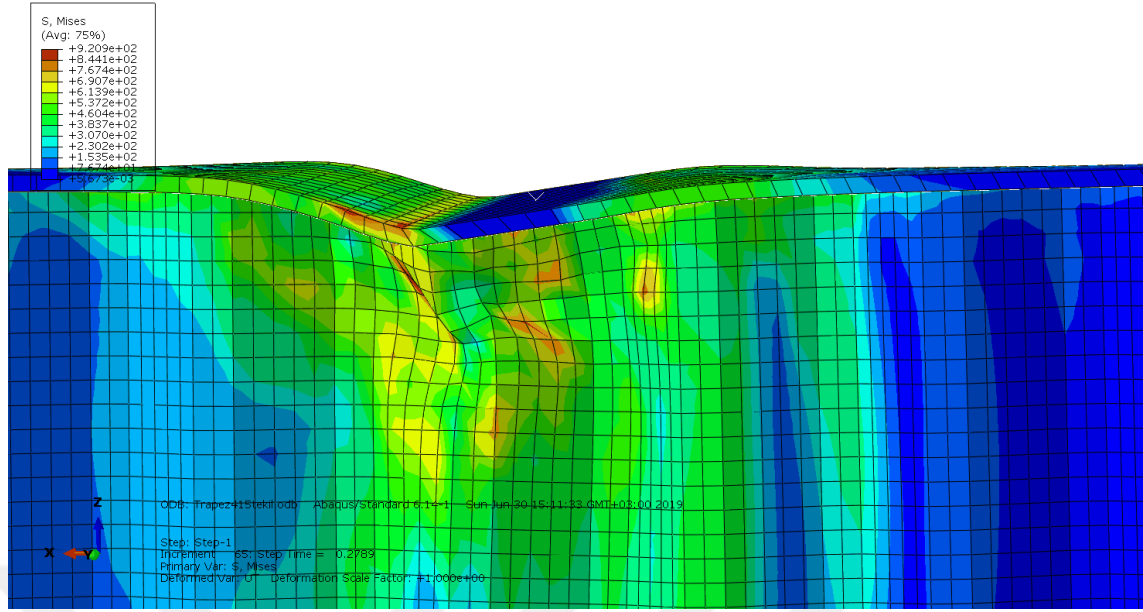
Şekil 4.85. TOGK_415 İki noktalı yükleme basit eğilme deformasyon durumu



Şekil 4.86. TOGK_415 İki noktalı yükleme deformasyon durumu



Şekil 4.87. TOGK_415 İki noktalı yükleme deformasyon durumu



Şekil 4.88. TOGK_415 İki noktalı yükleme deformasyon durumu

4.12.5. SOGK_330 SEA

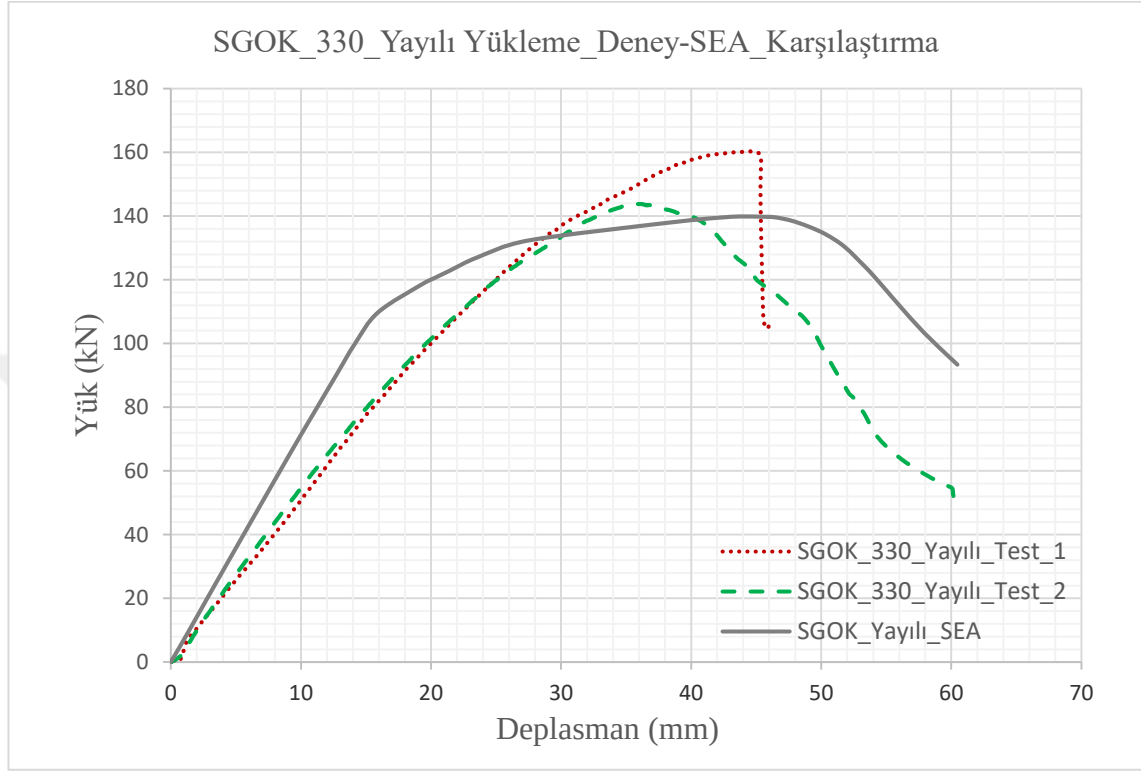
4.12.5.1. SGOK_330 yayılı yükleme SEA

Deneyisel çalışmada yayılı yükleme sonucunda yapılan Test_1 için 160,09 kN, Test_2 için 142,12 kN göçme yükü elde edilmiştir. Burada deneyisel sonucalar arasında %11,22 fark meydana gelmiştir, bunun sebebi SGOK_Test_1 elemanının hareketli mesnet ile başlık levhası arasında mesneden silindirik bir yapıya sahip olması ve bu silindirik elemanın başlığa çizgisel bir yük etki aktarmasıyla büyük gerilmelerden kaynaklı mesneden hemen üstünde gövdeden göçmesidir. Yapılan diğer 23 deney elemanda mesnetten göçme olmaması için kiriş alt başlığı ile mesnet arasına 180x250 mm 2 ölçülerinde 30 mm et kalınlığına sahip plakalar konmuştur. Bu sayede nu deneyde tecrübe edilmiş ve istenmeyen bir göçme durumu olan mesnetten göçmenin diğer tüm deneylerde önüne geçilmiştir.

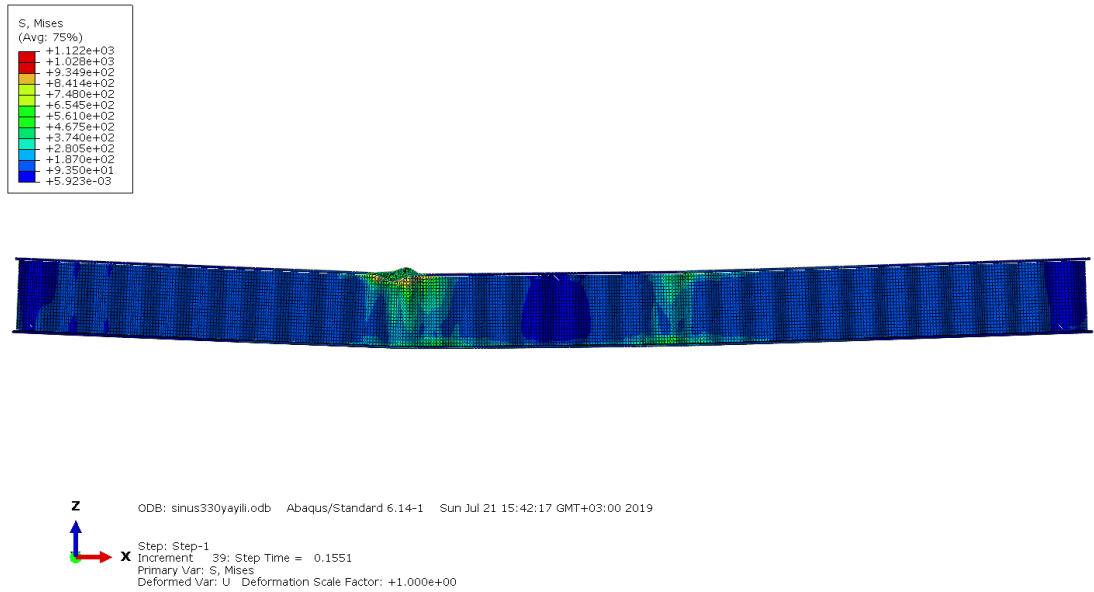
Deneyisel sonuçlar için yük-deplasman grafiğine bakıldığında zaman Test_1 deney elemanının 160,09 kN kapasiteye ulaştıktan sonra diğer Test_2'ye ve bu tez kapsamında diğer tüm yayılı yükleme altında yapılan deneylere göre farklı bir davranış sergilemiş ve ani bir göçme meydana gelmiştir. Dolayısıyla bu deney elemanının sonuçları değerlendirmeye alınmamış fakat grafikte gösterilmiştir. Test_1'in daha fazla kapasiteye ulaşmasının sebebi ise yüklemenin olduğu merkeze olan mesafesinin uzak oluşu ve kupon kapasitesinin Test_2'ye oranla daha fazla oluşudur.

SEA sonuçlarında ise elde edilen kapasite ise 139,57 kN olarak ölçülmüştür. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine yayılı olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneyisel çalışmada ara elemanın kiriş üst başlığına temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

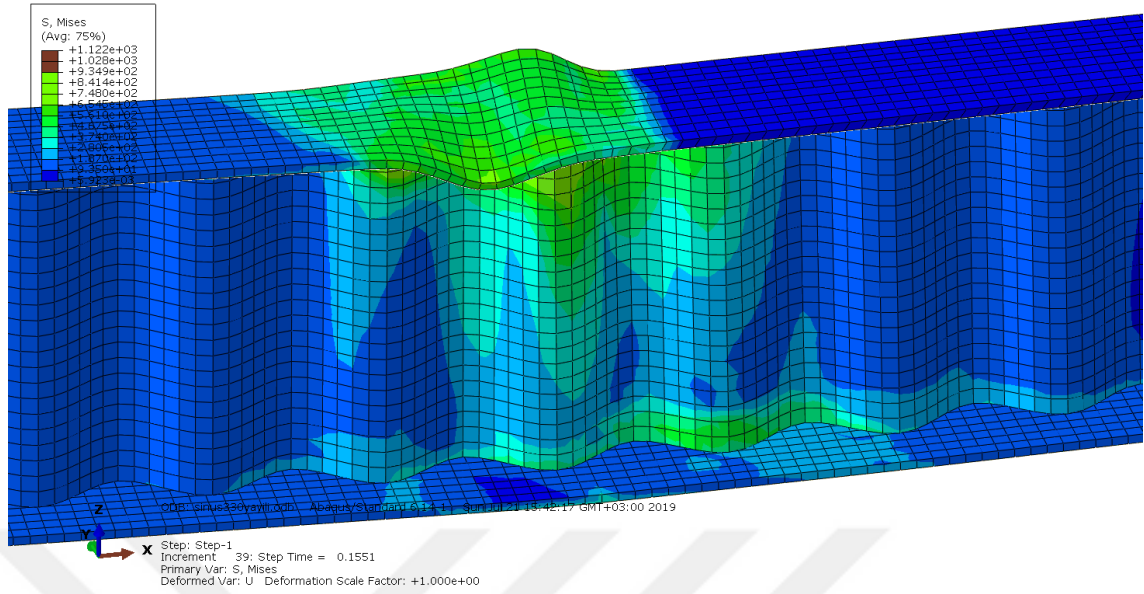
Şekil 4.89’da SGOK_500 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 4.90’da SGOK_330 için SEA sonucunda basit eğilme deformasyon sonucu gösterilmiştir. Şekil 4.91’de kiriş başlığında ve gövdesinde oluşan SEA deformasyon sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4.89. SOGK_330 Yayılı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma



Şekil 4.90. SOGK_330 Yayılı yükleme deformasyon durumu

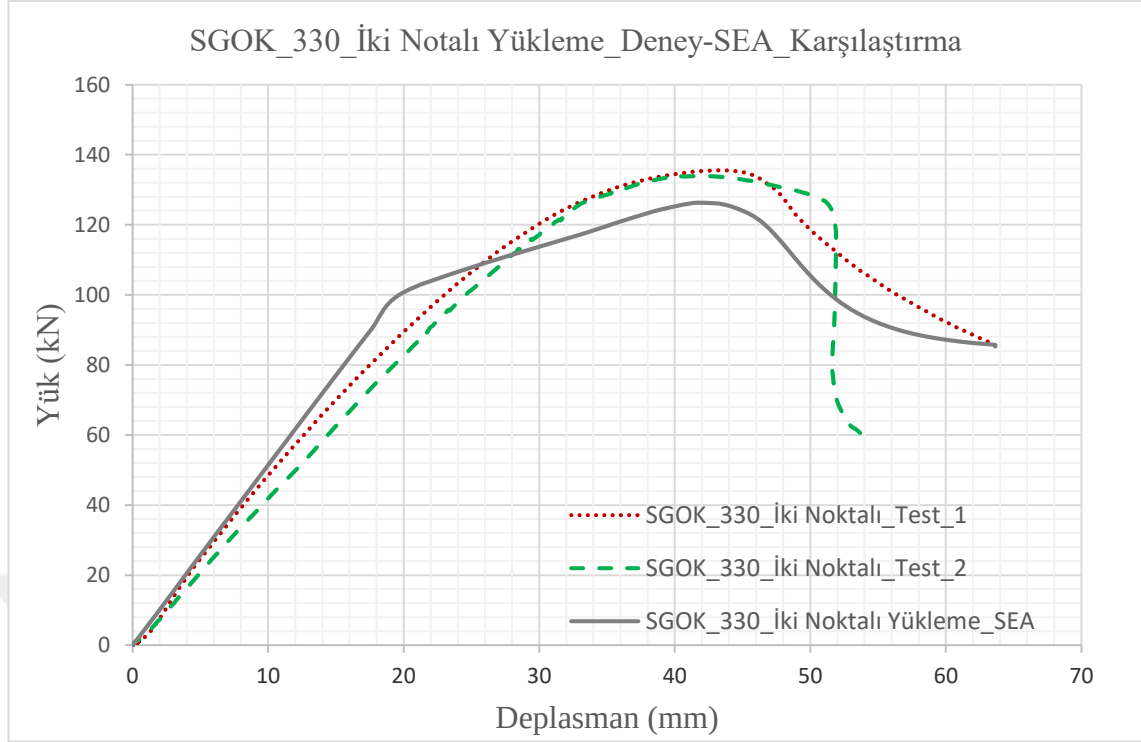


Şekil 4.91. SOGK_330 Yayılı yükleme deformasyon durumu

4.12.5.2. SGOK_330 iki noktalı yükleme SEA

DeneySEL çalışmada iki noktalı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 134,60 kN göçme yükü elde edilmiştir. SEA sonucunda ise kiriş kapasitesi 126,15 kN olarak tespit edilmiştir. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine 110 cm aralık ile iki noktasal yük olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneySEL çalışmada ara elemanın kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

Şekil 4.92’de ise SGOK_330 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır. Grafik incelendiğinde Test_1 ve Test_2’nin kapasitelerinin birbirleri ile oldukça yakınsadığı fakat Test_2’nin daha ani göçtüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebi lokal ya da global dislokasyonlardan, yüklemenin veya gövdenin oluşturabileceği eksantrisitelerden kaynaklanmaktadır.



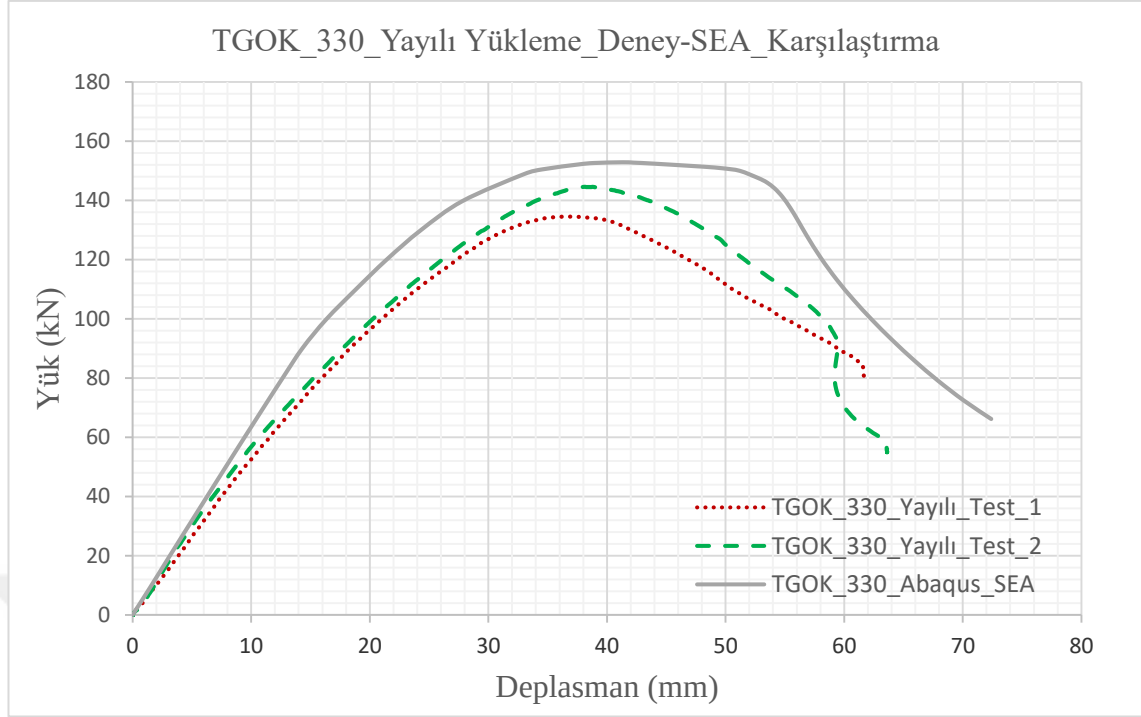
Şekil 4.92. SOGK_330 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA Karşılaştırma

4.12.5. TOGK_330 SEA

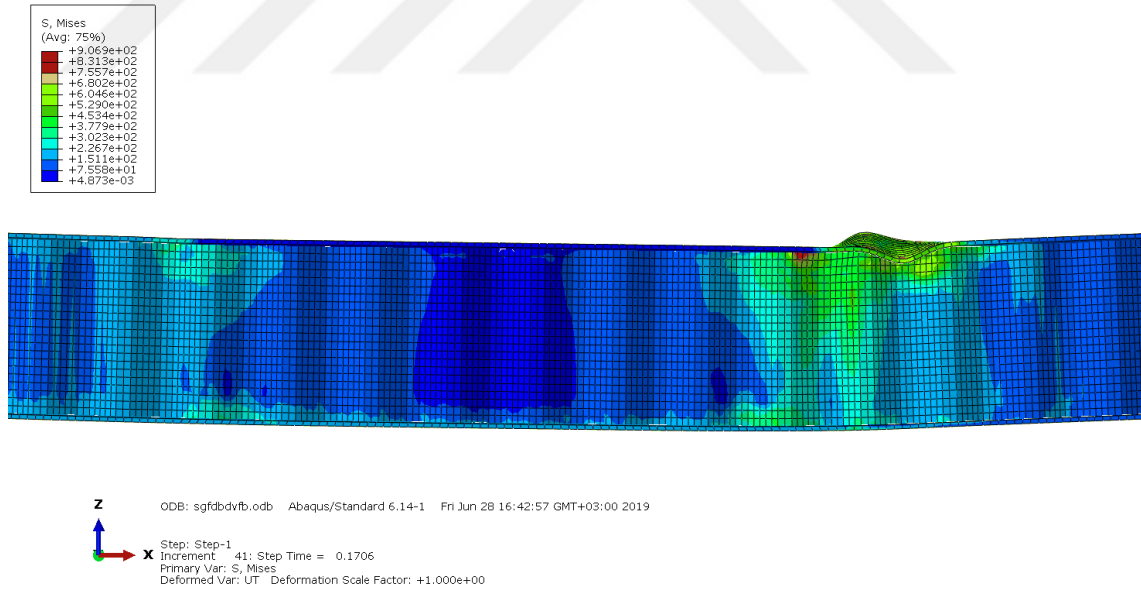
4.12.5.1. TGOK_330 yayılı yükleme SEA

Deneyssel çalışmada yayılı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 139,48 kN göçme yükü elde edilmiştir. SEA sonuçlarında ise elde edilen kapasite ise 152,59 kN olarak ölçülmüştür. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine yayılı olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneyssel çalışmada ara elemanın kiriş üst başlığına temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

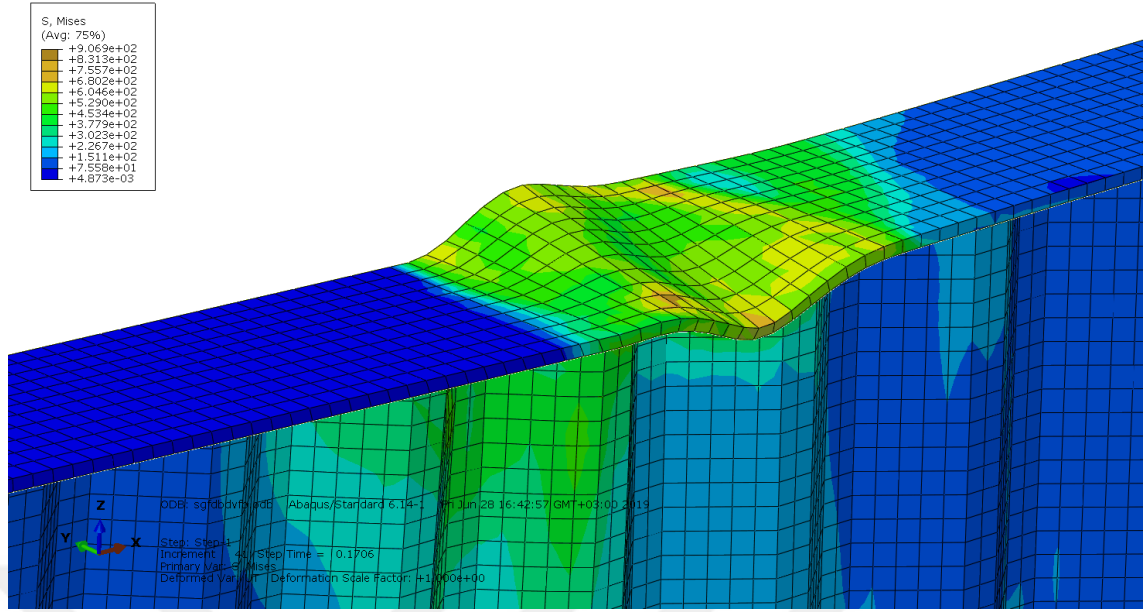
Şekil 4.93’de TGOK_500 için Test_1 ve Test_2’nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 4.94 ve Şekil 4.95’de ise SEA sonucunda kirişte yayılı yükleme altında başlıklarda ve gövdede oluşan deformasyon durumu ile gerilme dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.93. TOGK_330 Yayılı yükleme altında Deney-SEA karşılaştırma



Şekil 4.94. TOGK_330 Yayılı yükleme deformasyon durumu

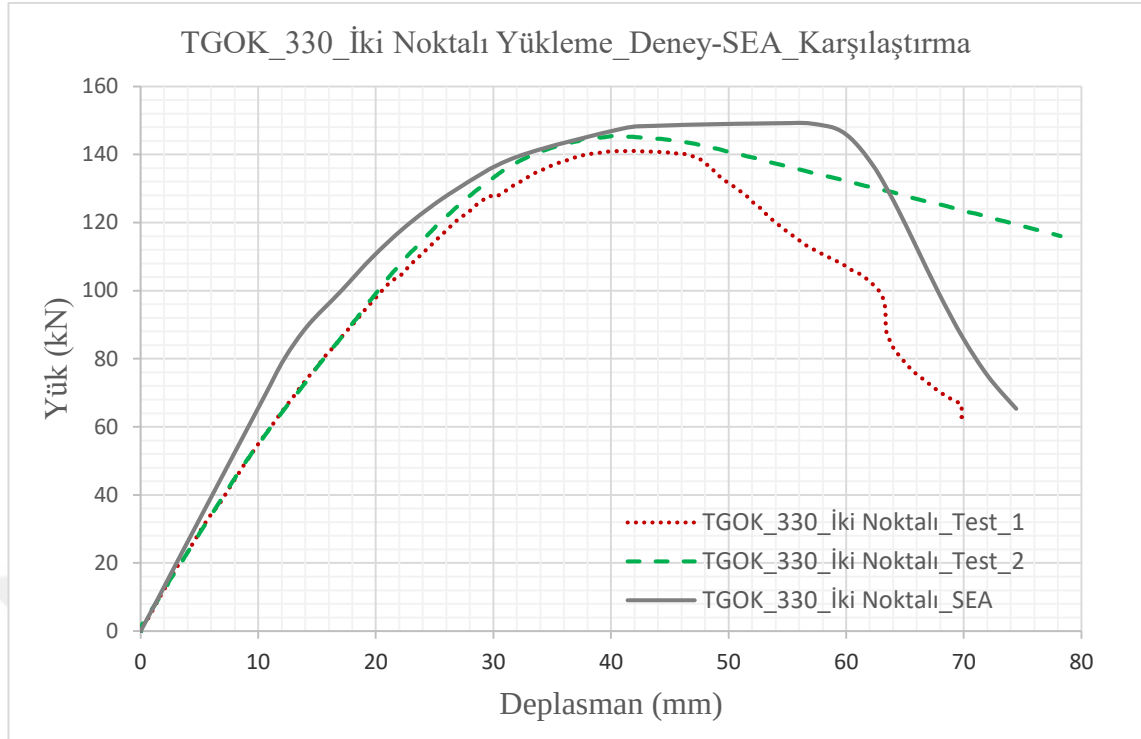


Şekil 4.95. TOGK_330 Yayılı yükleme deformasyon durumu

4.12.5.1. TGOK_330 iki noktalı yükleme SEA

Deneyisel çalışmada iki noktalı yükleme sonucunda yapılan iki test için ortalama 143,10 kN göçme yükü elde edilmiştir. SEA sonucunda ise kiriş kapasitesi 148,41 kN olarak tespit edilmiştir. Yük kirişin üst başlığının orta bölgesine 110 cm aralık ile iki noktasal yük olarak uygulanmıştır. Kuvvetin uygulandığı alan deneyisel çalışmada ara elemanın kirişlere temas ettiği alanla birebir aynıdır ve kuvvet 100 adımda uygulanmıştır. Analizler 15mm Hex-Mesh tipi ile kirişi parçalara bölerek yapılmıştır.

Şekil 4.96'da TGOK_330 için Test_1 ve Test_2'nin de aynı grafikte gösterildiği şekliyle sonlu elemanlar analiz sonucu ile karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 4.96. TOGK_330 İki noktalı yükleme altında Deney-SEA karşılaştırma

Çizelge 4.14. Sonlu elemanlar analiz sonuçları ve deneysel sonuçların genel özeti

TEST	Yükleme Tipi	Gövde Tipi	SEA Dayanım (kN)	Elastisite Modülü (MPa)	Mesh Boyutu (mm)	Mesh Tipi	Eleman Tipi	Göçme Yüğü (kN)	Deney Ort. Dayanım (kN)
TGOK_500_Test_1	Yayılı	Trapezoidal	558.69	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	566.28	539.55
TGOK_500_Test_2	Yayılı	Trapezoidal	506.23	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	512.81	
TGOK_500_Test_1	İki Noktalı	Trapezoidal	460.58	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	460.95	481.98
TGOK_500_Test_2	İki Noktalı	Trapezoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	503.01	
SGOK_500_Test_1	Yayılı	Sinüzoidal	504.11	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	506.19	505.40
SGOK_500_Test_2	Yayılı	Sinüzoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	504.60	
SGOK_500_Test_1	İki Noktalı	Sinüzoidal	486.84	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	471.12	461.81
SGOK_500_Test_2	İki Noktalı	Sinüzoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	452.49	
TGOK_415_Test_1	Yayılı	Trapezoidal	293.18	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	287.92	292.64
TGOK_415_Test_2	Yayılı	Trapezoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	297.36	
TGOK_415_Test_1	İki Noktalı	Trapezoidal	270.58	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	270.88	274.25
TGOK_415_Test_2	İki Noktalı	Trapezoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	277.62	
SGOK_415_Test_1	Yayılı	Sinüzoidal	293.40	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	282,65	288.29
SGOK_415_Test_2	Yayılı	Sinüzoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	293.93	
SGOK_415_Test_1	İki Noktalı	Sinüzoidal	267.35	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	268.92	273.58
SGOK_415_Test_2	İki Noktalı	Sinüzoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	278.24	
TGOK_330_Test_1	Yayılı	Trapezoidal	152.59	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	134.44	139.48
TGOK_330_Test_2	Yayılı	Trapezoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	144.51	
TGOK_330_Test_1	İki Noktalı	Trapezoidal	148.41	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	140.97	143.10
TGOK_330_Test_2	İki Noktalı	Trapezoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	145.23	
SGOK_330_Test_1	Yayılı	Sinüzoidal	139.57	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	160.09	-
SGOK_330_Test_2	Yayılı	Sinüzoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	142.12	142.12
SGOK_330_Test_1	İki Noktalı	Sinüzoidal	126.15	1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	135.34	134.60
SGOK_330_Test_2	İki Noktalı	Sinüzoidal		1,9x10 ⁵	15	Hex	C3D8I	133.86	

5. TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, farklı geometrik yapılara sahip ondülin gövdeli çelik kirişlerin yapı optimizasyonu yöntemleri ile en ekonomik olarak tasarlanabilmeleri, bu kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve bunun sonucu olarak da ülkemizdeki mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Sinüzoidal ve trapezoidal gövde yapısına sahip çelik kirişlerin optimum boyutlandırma problemleri formüle edilerek elde edilen ayrık değişkenli optimizasyon probleminin çözümü, geliştirilmiş olan av arama ve ateş böceği algoritması optimizasyon teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. ondülin gövde yüksekliği, gövde dalga boyu, dalga yüksekliği, başlık kalınlığı ve başlık genişliği tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Optimizasyon yöntemleri kullanılarak minimum ağırlık ile maksimum yük taşıyacak olan optimum boyutlara daha hızlı ve etkili şekilde ulaşılmıştır. Bu sistemlerin tasarım kriterleri için BS (British Standart) şartnamesinde öngörülen hükümler esas alınmıştır.

Çalışmanın ikinci aşaması olan deneysel süreçte; ilk kısımda optimizasyonu yapılan ondülin gövdeli çelik kirişlerin yükleme çerçevesinde 1000 kN kapasiteye sahip hidrolik piston ile iki noktalı ve yayılı yük uygulanarak yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Ondülin gövdeli kirişlerin gövdesi boyunca bükülerek elde edilen gövde levhasının alt ve üst başlıklarının birbirine kaynakla birleştirilmesi sonucunda kirişin gövde levhası inceltirilerek tasarruf sağlanmış ve gövdedeki kıvrımlar sayesinde ise kirişin burkulma kapasitesi artırılmıştır. Çalışmada kiriş gövdesinin yerel burkulma ve moment-kesme aktarımı değerlendirmelerine bağlı olarak optimizasyonu yapılan kirişlerin gövde yapısının yük taşıma kapasitelerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca, üretilen bu optimum boyutlandırılmış çelik kirişlerin göçme modları incelenmiştir. Trapezoidal ve Sinüzoidal gövde yapısına sahip kirişlerin birbiri ile kıyaslaması yapılmıştır.

Farklı geometrik yapılara sahip OGK_500 elemanlarda yapılan yayılı yükleme ondülin gövdeli kirişler üzerinde yapılan testlerde ortalama dayanım trapezoidal gövdeli kirişlerde 539,55 kN, Sinüzoidal gövdeli kirişlerde 505,40 kN olarak yapılan testlerde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar trapezoidal gövde yapısına sahip çelik kirişin Sinüzoidal boşluklu kirişe oranla %6,76 daha fazla dayanımlı olduğunu göstermektedir. OGK_500 elemanlarda iki noktalı yükleme durumunda ise trapezoidal elemanda dayanım 481,98 kN iken, Sinüzoidal elemanda 461,81 kN olarak gözlemlenmiştir. İki noktalı yükleme durumunda ise yine trapezoidal gövdeli eleman Sinüzoidal gövdeli elemana kıyasla %4,37 daha fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür. OGK_415 ve OGK_330 elemanlar da yapılan testlerdeki kıyaslamalar ise Çizelge 4.13’de verilmiştir. OGK_415 çelik kiriş elemanlarda yayılı ve iki noktalı yükleme altında büyük bir fark gözlemlenmemiştir. OGK_330 çelik kiriş elemanlarda ise iki noktalı yükleme durumunda trapezoidal gövde yapısına sahip eleman sinüzoidal gövde yapısına sahip elemana göre %6,32 daha fazla taşıma kapasitesine sahiptir.

OGK_330 çelik kiriş elemanlarda yayılı yükleme altında Sinüzoidal gövde yapısına sahip eleman trapezoidal gövde yapısına sahip elemana göre %1,89 daha fazla kapasiteye sahip olduğu görülmüştür. Bölüm 4’te SGOK_330 elemanın yayılı yükleme altında Test_1 deney elemanın mesnet bölgesinden göçtüğü için hesaplamalara dahil edilmemiştir.

6. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında trapez ve dalgalı forma sahip ondülin gövdeli çelik yapma kirişlerin öncelikle meta-algisal optimizasyon yöntemlerinden birisi olan harmoni arama yöntemi kullanılarak optimum boyutlandırmaları yapılmıştır. Her iki çelik kirişin optimizasyonlarında kullanılan bu yöntem daha önce farklı alanlara uygulamasında etkin sonuçlar verdiği için tercih edilmiştir. Tez kapsamındaki ondülin gövdeli kirişlerin optimum boyutlandırma örneklerindeki tasarım geçmiş grafiklerinde de görüldüğü üzere harmoni arama yöntemi bir diğer optimizasyon tekniği olan ateş böceği algoritmasına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durum da harmoni arama yöntemine bağlı optimum sonuçların deneysel çalışmalarda kullanılmasını sağlamıştır.

Tez çalışmasının sonraki aşamasında optimum boyutlandırılmış kirişlerin farklı yük kombinasyonları altında göçme durumları incelenmiştir. Her iki kiriş türünden farklı yük kombinasyonları ve farklı boyutlarda toplamda 24 adet kiriş test edilmiştir. Bu testler sonucunda trapeziodal gövde yapısına sahip olan çelik yapma kirişlerin sinüs eğrisi fonksiyonu şeklinde gövdeye sahip olan kirişlere oranla biraz daha yüksek kapasiteye sahip oldukları belirlenmiştir. Aynı zamanda yayılı yükleme durumuna maruz kalan kirişlerin iki noktalı yükleme durumuna maruz kalan kirişlere oranla daha yüksek kapasiteyi görünce göçme durumunun oluştuğu gözlemlenmiştir. Kirişlere yayılı yükleme tipi uygulandığı zaman önceden de hedeflendiği ve beklendiği üzere ilk aşamada üst flanş kısmında akma meydana gelmiş; daha sonra flanşlar kapasitesine ulaştınca gövde kısımlarında akma oluşmuş ve nispeten yavaş bir göçme durumu meydana gelmiştir. İki noktasal yükleme durumunda ise yüklerin kirişlerle temas ettiği yüzeylerin kısıtlı olmasından dolayı gövdeler kapasitesi hızlı bir şekilde ulaşarak ani akmalar meydana gelmiş ve üst başlıklarda akma sonra oluşmuştur.

Deneysel kısımda göçme yükleri belirlenen trapez ve dalgalı forma sahip olan çelik yapma kirişlerin taşıma gücü analizleri ve kirişlerin taşıyabilecekleri kritik yüklerin sonlu elemanlar yazılımlarından birisi olan ABAQUS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece her bir kiriş için deneysel ve sonlu eleman analizi değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. ABAQUS sonlu elemanlar analizi ile doğrusal olmayan analizler yükün adım adım uygulanması ile gerçekleştirilmiş ve elemanlar üzerindeki şekil değiştirmeler ve meydana gelen gerilmeler deneysel çalışmalardaki sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Bu sonuçlar ışığında 24 adet kirişin deneysel sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları kabul edilebilir sınırlardaki hata paylarıyla birbirlerini doğruladığı belirlenmiştir.

7. KAYNAKLAR

- Abbas, H. H., Sause, R. And Driver, R. G. 2006. Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads, *Jornual of Structural Engineering*, 132 (8): 806-814.
- Abbas, H. H., Sause, R. and Driver, R. G. 2007. Analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane loads. *Journal of Structural Engineering*, 133 (3): 347-355.
- Abaqus (2007) Standard User's Manual, ABAQUS CAE Manual, Version 6.7-1.
- Agarwal, K., Wu, S. And Papangelis, J. 2018. Finite element analysis of local shear buckling in corrugated web beams. *Engineering Structures*, 162: 37-50.
- Anami, K. and Sause, R. 2005. Fatigue of web-flange weld of corrugated web girders: 2. Analytical evaluation of fatigue strength of corrugated web-flange weld. *International Journal of Fatigue*. 27:383-393.
- Anami, K., Sause, R. and Abbas, H. H. 2005. Fatigue of web-flange weld of corrugated web girders: 1. Influence of web corrugation geometry and flange geometry on web-flange weld toe stresses. *International Journal of Fatigue*, 27:373-381.
- Arunkumar, G., Sampathkumar, P. And Sukumar, S. 2013. Investigation on cold-formed steel lipped I beam with trapeziodal corrugation in web by varying depht. *International Journal of Innovative Research & Development*, 2 (5): 938-950.
- Aydın, A. C., Maali, M., Kılıç, M. and Sarioğlu, M. 2015 Experimental investigation of sinus beams with end-plate connections. *Thin-Walled Structures*, 97:35-43.
- Aydın, R., Yardımcı, N., Kısa, M. H. and Gokce, T. 2014. In-plane behavior of beam-to-column connections of corrugated web I-sections. *Journal of Constructional Steel Resarch*, 100: 183-196
- Aydın, R., Yüksel, E. And Yardımcı, N. 2016. İnce sinüzoidal gövdeli çelik I kesitlerden oluşturulan bir kolon-kiriş birleşiminin davranışı. Prof. Dr. M. Hasan Boduroğlu Sempozyumu, ss. 139-152, 9-10 Mayıs, İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Balsinski, W. 2018. Shear buckling of plate girders with corrugated web restrained by end stiffeners. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3): 757-771.
- Bartholome, S. And Pasternak, H. 2013. Girders with structured web-ongoing resarch. Annual Stability Conference Structural Stability Resarch Council, ss. 114, 16-20 April, At St. Louis, Missouri, USA.
- Baser, M., Shanmugam, N. E. and Khalim, A. R. 2011. Horizontally curved composite plate girders with trapeziodally corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (6): 947-956.

- British Standards. BS 5950. 2000. Structural Use of Steelworks in Building, Part 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.
- British Standards, BS 5950, 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., 2000.
- B. V. Babu and R. Angira, Optimization of non-linear chemical processes using evolutionary algorithm: Int. Symp. 55th Annual Session IChE 2002 (CHEMCON- 2002), OU. Hydrabed, December 19-32 Application No. 13.
- Cao, Q., Jiang, H. and Wang, H. 2015. Shear behavior of corrugated steel webs in H shape bridge girders. *Mathematical problems in Engineering*, 2015: 1-15.
- Chen, H., Guo, Y. L. And Duo, C. 2013. Fabricating procedure and in-plane stability of circular arch of H shape with sinusoidal corrugated web. Proceedings of the 10th Pacific Structural Steel Conference (PSSC 2013), ss. 468-473, 8-11 October, Singapore.
- Dabon, M. and Elamary, A. S. 2006. Flange compactness effect on the behavior of steel beams with corrugated webs. *Journal of Engineering Sciences*, 34 (5): 1507-1523.
- Dorigo, M. and Stützle, T., Ant Colony Optimization, A Bradford Book, Massachusetts Institute of Technology, (2004).
- DIN V ENV 1993-1-1, EUROCODE 3: Design of Steel Structures; Part 1- General Rules and rules for buildings.
- DIN 18 800 Teil1-3, Stahbauten; Bemessung und Konstruktion.
- Erdal F., Doğan, E., Tunca, O. and Taş, S. 2016. Optimum Design of Corrugated Web Beams Using Stochastic Search Techniques. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1(3), 104-108.
- Erdal F., Tunca, O., Taş, S., Doğan, E. 2015. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Stokastik Optimizasyon Yöntemleri Kullanılarak Optimum Boyutlandırılması. *XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, 24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon*
- Elkawas, A. A., Hassanein, M. F. and El-Boghdadi, M. H. 2017. Numerical investigation on the nonlinear sher behavior of high-strength steel tapered corrugated web bridge girders. *Engineering Structures*, 134: 358-375.

- Elgaaly, M., Hamilton, R.W., Seshadri, A., 1996. Shear Strength of Beams with Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 122 (4): 390-398.
- Elgaaly, M. and Seshadri, A. 1997. Girders with corrugated webs under partial compressive edge loading. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 123 (6): 783-791.
- Elgaaly, M., Seshadri, A. and Hamilton, R. W. 1997. Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 123 (6): 772-782.
- Elgaaly, M., Seshadri, A. 1998. Depicting the behavior of girders with corrugated web up to failure using non-linear finite element analysis. *Advances in Engineering Software*, 29 (3-6): 195-208.
- Eldip, M. E. A. H. 2009. Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges. *Jornual of Constructional Steel Research*, 65 (12): 2129-2139
- Fraser F., 1956. Experiniental Investigation of The Strength of Multiweb Beams with Corrugated Webs, National Advisory Committee for Aeronautics. Langley Aeronautical Lab.; Langley Field, VA, United States
- Guo, Y. L., Chen, H., Pi, Y. L., Duo, C. 2015. In-plane failure mechanism and strength of pin-ended steel I-section circular arches with sinusoidal corrugated web. *Journal of Structure Engineering*, 142:1-15.
- Guo, Y. L., Chen, H., Pi, Y. L., And Bradford, M. A. 2015. In-plane strength of steel arches with a sinusoidal corrugated web under a full-span uniformvertical load: Experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, 110: 105-115.
- Goldberg D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing, (1989).
- Gönen, H. G. G. 2007. Endüstriyel yapı tasarımında H profillerle ondülin gövdeli profillerin karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 161 s.
- Hestenes M.R., Multiplier and Gradient Methods, Optimiton Theory and Applications 4, 303-320, (1969).
- Hajsadeghi, M., Zirakian, T., Keyhani, A., Naderi, R. And Shahmohammadi, A. 2014. Energy dissipation characteristics of steel coupling beams with corrugated webs. *Journal of Contructional Steel Resarch*, 10:124-132.
- Jager, B., Dunai, L. and Kövesdi, B. 2016. Experimental based numerical modelling of girders with trapeziodally corrugated web subjected to combined loading.

- Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, ss. 1-14, November 7-8, Baltimore, Maryland.
- Jiao, P., Borchani, W., Soleimani, S. And Mc Graw, B. 2017. Lateral-torsional buckling analysis of wood composite I-beams with sinusoidal corrugated beams with sinusoidal corrugated web. *Thin-Walled Structures*, 119: 72-82.
- Johnson RP ve Cafolla J, Local Flange Buckling in Plate Girders with Corrugated Webs, *Structures and Buildings* (ICE), 123, 148-156, 1998.
- Kövesdi, B., Dunai, L. and Kuhlmann, U. 2012. Interacting stability behavior of steel I-girders with corrugated webs. *Thin-Walled Structures*, 61: 132-144.
- Kövesdi, B., Jager. B. and Dunai, L. 2012. Stress distribution in the flanges of girders with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 79: 2014-215.
- Khalid, Y. A., Chan, C. L., Shari, B. B. And Hamouda, A. M. S. 2004. Bending behavior of corrugated web beams. *Jornual of Material Processing Technology*, 150 (3); 242-254.
- Kıymaz, G., Coskun, E., Cosgun, C. And Seckin, E. 2010. Transverse load carrying capacity of sinusoidally corrugated steel web beams with web openings. *Steel and Composite Structures*, 10 (1): 69-85.
- Kıymaz, G., Coskun, E., Cosgun, C. And Seckin, E. 2007. Strength of sinusoidally corrugated web beams with web openings. Proc. ISCAS'07; Beale, R.G. (Ed.), Oxford Brookes University, England
- Kirkpatrick, S., Gerlatt, C. D., Vecchi, M. P., Optimization by Simulated Annealing, Science, 220, 671-680, (1983).
- Lho, S. H., Lee, C. H., Oh, J. T., Ju, Y. K. and Kim, S. D. 2014, Flexural capacity of plate girders with very slender corrugated webs. *International Journal of Steel Structures*, 14 (4): 731-744.
- Li Y, Zhang W, Zhou Q, Qi X ve Widera GEO, Development and Research on H-Beams with Wholly Corrugated Webs, *Journal of Materials Processing Technology*, 101, 1-3, 115-118, 2000.
- Linder, J. and Huang, B. 1994. Progress in the analysis of beams with trapezoidally corrugated webs. The Seventeenth Czech and Slovak International Conference on Steel Structures and Bridges. September, Bratislava, Slovakia.
- Leblouba, M, Barakat, S., Maalej, M., Al-Toubat, S. and Karzad, A. S. 2019. Normalized shear strenth of trapeziodal corrugated steel webs: Improved modeling and uncertainty propagation. *Thin-Walld Structures*, 137: 67-80.

- Lee K.S., Geem Z.W., A New Structural Optimization Method Based on the Harmony Search Algorithm, *Computers and Structures*, 82, 781-798, (2004).
- 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.
- Machimdarong, C., Watanabe, E. and Utsunomiya, T. 2003. An extended elastic shear deformable beam theory and its application to corrugated steel web girder. *Journal of Strurural Engineering*, 49(A): 29-38.
- M.R. Hestenes, Multiplier and Gradient Methods, *Optimition Theory and Applications* 4, 1969: 303-320
- Nguyen, N. D., Kim, S. N., Han, S. R. and Kang, Y. J. 2010. Elastic lateral-torsional buckling strenght of I-girder with trapeziodal web corrugations using a new warping constant under uniform moment. *Engineering Structures*, 32 (8): 2157-2165.
- Oftadeh., Mahjoob MJ, Shariatpanahi M, A novel meta-heuristic optimization algorithm inspired by group hunting of animals: Hunting search, *Computers and Mathematics with Applications*, 60, 2087-2098, 2010.
- Oliveira, J. P. S., Calenzani, A. F. G., Fakury, R. H. and Ferreira, W. G. 2016. Elastic critical momentof continious composite beams with a sinusoidal-web steel profile for lateral-torsional buckling. *Engineering Structures*, 113:121-132.
- Pasternak, H., Kubieniec, G., 2010. Plate girders with corrugated webs. *Jornual of Civil Engineering and Management*, 16 (2): 166-171.
- Perez, R. E., Behdinin, K., Particle Swarm Approach for Structural Design Optimization, *Computers and Structures*, 85 (19-20), 1579-1588, (2007).
- Pimenta, R. J., Diniz, S. M. C Queiroz, G., Galvao, A. And Rodrigues, F. C. 2012. Reliability-based design recommendations for composite corrugated-web beams. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 28: 185-193.
- 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.
- Raiza, A. M. A., Sunitha, R. C. M. And Sumitha, K. K. 2016. Load carrying capacity of corrugated web beam. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3 (9): 135-138.
- Sause, R. and Braxtan, T. N. 2011. Shear Strength of trapeziodal corrugated steel webs. *Journal of Contructional Steel Research*, 67 (2): 223-236.

- Shahmohammadi, A., Mirghaderi, R., Hajsadeghi, M. And Khanmohammadi, M. 2013. Application of corrugated plates as the web of steel coupling beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 85: 178-190.
- Sherman, D. And Fisher, J. 1971. Beams with Corrugated Webs. *International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures*, ss. 196-204, 20 Agust, University of Missouri-Rolla, USA.
- Shlyakhin, D. And Lukin, A. 2016. A flexible beam with corrugated web and its performance under bending: an experimental study. *5th International Scientific Conference Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education*, ss. 1-7, 16-17 November, Moscow State University Of Civil Engineering (MGSU), Russia.
- S. Kirkpatrick, C. D. Gerlatt, M. P. Vecchi, *Optimization by Simulated Annealing*, Science, 1983: 671-680.
- S. Łukasik, S. Żak, "Firefly Algorithm for Continuous Constrained Optimization", *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, (2009) 97-106 vol. 5796.
- Steelwork design Guide to BS 5950: Part 1, Section Properties, Member Capacities, Vol.1, 4th edition, The Steel Construction Institute, U.K., 1990.
- Tahir, M. M., Sulaiman, A. and Saggaff, A. 2008. Structural behavior of trapezoidal web profiled steel beam section using partial strength connection. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 8: 55-66.
- Vachca, J., Kyzlik, P., Both, I. And Wald, F. 2016. Beams with corrugated web at elevated temperature experimental results. *Thin-Walled Structures*, 98:19-28.
- Venkayya, V. B., Khot, N. S., and Berke, L., *Application of Optimality Criteria Approaches to Automated Design of Large Practical Structures*, Second Symposium Structural Optimization, AGARD-CP-123, Milano, Italy, (1973).
- X. S. Yang, *Firefly Algorithms for Multimodel Optimzation*, SAGA 2009 LNCS, (2009) 169-178 vol.5792, pp.. Springer, Heidelberg
- Yang, XS, *Firefly Algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimisation*, *International Journal of Bio- Inspired Computation*, Vol. 2, No. 2, pp.78–84, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

HARUN TAYLAN

haruntaylan@pakmetal.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2016-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2011-2015	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Pak Metal Müh. Mim. İnş. 2006-Devam Ediyor	Mühendis
Akdeniz Üniversitesi NAP-3668 Numaralı Bilimsel Araştırma Projesi 2018-2019	Trapez ve Dalgalı Formdaki Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin Yük Taşıma Kapasitelerinin Karşılaştırmalı Analizi