

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ONDÜLİN GÖVDELİ KİRİŞLERİN OPTİMİZASYONU VE NİHAİ YÜK  
TAŞIMA KAPASİTELERİNİN ANALİZİ**

**Osman TUNCA**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**TEMMUZ 2019**

**ANTALYA**



T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**ONDÜLİN GÖVDELİ KİRİŞLERİN OPTİMİZASYONU VE NİHAİ YÜK  
TAŞIMA KAPASİTELERİNİN ANALİZİ**

**Osman TUNCA**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**TEMMUZ 2019**

**ANTALYA**



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

**ONDÜLİN GÖVDELİ KİRİŞLERİN OPTİMİZASYONU VE NİHAİ YÜK  
TAŞIMA KAPASİTELERİNİN ANALİZİ**

**Osman TUNCA  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
DOKTORA TEZİ**

**Bu tez Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından  
213 M 656 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**TEMMUZ 2019**



T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ONDÜLİN GÖVDELİ KİRİŞLERİN OPTİMİZASYONU VE NİHAİ YÜK  
TAŞIMA KAPASİTELERİNİN ANALİZİ

Osman TUNCA  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
DOKTORA TEZİ

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

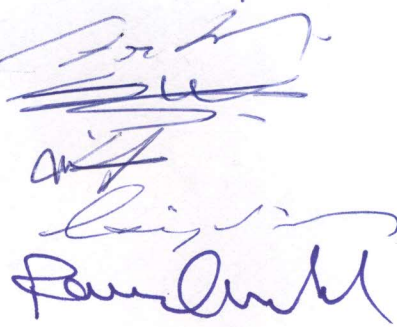
Doç. Dr. Ferhat ERDAL (Danışman)

Doç. Dr. Serdar ÇARBAŞ

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Doç. Dr. Erkan DOĞAN

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK





## ÖZET

# ONDÜLİN GÖVDELİ KİRİŞLERİN OPTİMİZASYONU VE NİHAİ YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN ANALİZİ

Osman TUNCA

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Temmuz 2019; 177 sayfa

İnşaat mühendislerinin tasarladığı yapıların önemli bir kısmında yapının kullanım gereksinimleri nedeniyle geniş açıklıklara ihtiyaç duyulur. Geniş açıklıklı yapılar tasarlanırken hem yeterli derecede güvenli hem de ekonomik çözümler üretilmelidir. Yapılacak tasarımın güvenlik ve ekonomiklik niteliklerini taşıması doğrudan tasarımda kullanılacak olan malzemenin ağırlık-dayanım oranı ile ilgilidir. Çelik, malzeme özelliği olarak yüksek birim ağırlığa karşılık gelen dayanım oranıyla diğer yapı malzemelerine kıyasla daha uygun çözümler sunmaktadır. Bilindiği üzere inşaat sektöründe kutu kesitli, dairesel kesitli, I kesitli profiller gibi farklı kesit özelliklerine sahip çelik profil türleri mevcuttur. Bunlar arasından dolu gövdeli I kesitli çelik profiller geniş açıklıkların geçilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. I kesitli çelik profiller tasarımın amacına ve taşıyacakları yüklerin durumuna göre dar ve geniş başlıklı profil türleri arasından seçilmektedir. Yapı sektöründeki gereksinimler doğrultusunda gün geçtikçe yeni profil türleri ortaya çıkmaya devam etmektedir. Büyük açıklıkların düşük maliyetle geçilmesi için tasarlanan yeni nesil çelik kirişlerin gövde yüksekliği artırılmış çelik kirişler vasıtasıyla atalet momentlerinin artırılması ve buna bağlı olarak kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin de artması sağlanmaktadır. Fakat gövde yüksekliği artırılmış kirişlerde kesim ve kaynaklama maliyetinin yanı sıra kiriş gövdesi daha narin kalacağı için yanal burkulmaya ve gövde burkulmasına daha eğilimli olduğu görülmektedir. Gövde kesiti ince dalgalı çelik bir levhanın aynı malzeme özelliklerine sahip alt ve üst başlık görevi gören iki çelik plaka ile birleştirilmesi şeklinde geliştirilerek tasarlanan ondülin gövdeli kirişler (OGK), stabilite kaybına ve büyük deformasyonlara engel olurken, uygulanan yük kombinasyonları altında kirişin plastik limit noktasına gelmeden rijitlik kaybına bağlı burkulmasını engelleyerek kesme kuvvetine ve yerel etkilere karşı kirişin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Kiriş gövdesinin bu özel yapısı ile kiriş öz ağırlığının azalması ve yük taşıma kapasitesinin artması sağlanarak ekonomik kazanç elde edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak dalgalı gövdeli kirişlerin stokastik optimizasyon yöntemleri kullanılarak minimum ağırlığa sahip olacak şekilde optimum boyutlandırılması yapılmıştır. Bunun için yapma profil olan ondülin gövdeli kirişlerde gövde yüksekliği, gövde kalınlığı ve dalgalı gövdenin tepe noktaları arası mesafenin yanı sıra başlık genişliği ve başlık kalınlığı tasarım değişkeni olarak kabul edilmiştir. Bu tasarım parametrelerinin davranış ve geometrik sınırlayıcılar altında kiriş ağırlığını minimum yapacak değerleri elde edilmiştir. Formülasyonu oluşturulmuş yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü yeni optimizasyon teknikleri olan av arama ve ateşböceği algoritması yöntemlerinin adaptasyonu ile elde edilerek bu iki yöntemin minimum ağırlığının bulunması sürecinde sergilediği performanslar kıyaslanmıştır. Tez çalışmasının ikinci ve esas aşaması olan deneysel süreçte ise; optimum boyutlandırmaları



yapılan OGK'lerin farklı yükler altındaki dayanımları hidrolik güç ünitesi basıncı silindirene sahip yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir. Eleman bazında yapılan çelik kiriş testlerinden sonra dalgalı gövdeli kirişler kompozit olarak tasarlanan döşemelere etkiyen yük altındaki davranışları incelenerek nihai yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Tezin son kısmında ise, OGK'lerinin gövde levhası burkulma analizleri ve taşıyabilecekleri kritik yüklerin hesabı sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmış ve her farklı gövde kalınlığına ve boyuna sahip ondülin gövdeli kirişler için kaydedilen sonlu elemanlar analiz sonuçları deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ondülin gövdeli çelik kiriş sistemlerinin tasarımları için BS EN1993-1:2005 (Annex-D, Eurocode 3) ve DIN 18-800 Teil-1 şartnamelerinde öngörülen tasarım kıstasları esas olarak kabul edilmiştir. Kompozit sistemler için bu şartnamelere ek olarak BS-8110'de öngörülen tasarım kıstasları esas olarak alınmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Kompozit sistemler, Ondülin gövdeli kirişler, Optimizasyon, Sonlu elemanlar yöntemi, Yük kapasitesi.

**JÜRİ:** Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Doç. Dr. Serdar ÇARBAŞ

Doç. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Doç. Dr. Erkan DOĞAN

Doç. Dr. Ramazan ÖZÇELİK



## **ABSTRACT**

### **OPTIMUM DESIGN AND ANALYSIS OF LOAD CAPACITY OF CORRUGATED WEB BEAMS**

**Osman TUNCA**

**PhD Thesis in Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL**

**July 2019; 177 pages**

A large part of the structures designed by civil engineers needs large spans due to the usage requirements of the building. When designing large-span structures, they must be produced in safe and economical way. The safety and economy characteristics of the design is directly related to the weight-to-strength ratio of the material which is used in the design. Steel offers more suitable solutions compared to other building materials as it has high strength ratio corresponding to high unit weight. As known, there are many types of steel profiles in the market such as box section, circular section and I section profiles. Among them, I-section steel profiles are frequently used for large spans. I section steel profiles are selected from narrow and wide flange profile types according to the purpose of the design and the loads they will carry. As a result of the requirements in the structural industry, new profile types are still emerging. The height of the new generation steel beams designed for large spans with minimum cost, is upgraded by increasing the moment of inertia and thus increasing the maximum load carrying capacity of the beams. However, as the height of the beam being increased, the web of the beam is simultaneously to be slender and this leads to web buckling and consequently sudden collapses. The corrugated web beams designed to be developed by combining a thin-corrugated steel plate with two steel plates and with same material properties, serving as the upper and lower flange, increases the load carrying capacity of the beam against shear force and local buckling while not only preventing the loss of stability and large deformations, but also preventing the rigidity loss of the beam before reaching the plastic limit under applied loading combinations. With this special structure of the web of the beam, the economic gain is achieved by decreasing the beam self-weight and increasing the load carrying capacity. In the scope of this thesis, firstly, the dimensions of the corrugated web of beams is designed by using optimization methods with minimum weight. For this purpose, the web height, thickness and the distance between the peak points of the corrugated web as well as the flange width and thickness are considered as design variables. The values of these design variables causing the minimum beam weight are obtained under behaviour and geometric constraints. The solutions of the structural optimization problems formulated have been obtained by adaptation of two recent optimization techniques that are hunting search and firefly algorithm methods and the performances of these two methods in the process of finding the minimum weight are compared. In the experimental process, which is the second and main stage of the thesis, the optimally designed corrugated beams are tested under single loading, two points bending and the distributed loading by using the loading frame with pressure cylinder which has hydraulic power unit. After the steel beam tests made on the structural element basis, the maximum load carrying capacities are calculated by examining the behaviors



of the corrugated web beams under the load acting on the composite designed slabs. In the last part of the thesis, the web plate buckling analysis of the steel beam specimens with corrugated webs and the calculation of the critical loads that they can carry are executed by using the finite elements software and the results of the finite elements analysis for the corrugated beams with different web thicknesses and lengths are compared with the results obtained from the experiments. Design limitations for corrugated web beams have been taken from BS EN1993-1:2005 (Annex-D, Eurocode 3) and DIN 18-800 Teil-1. Additional limitations adopted from BS-8110 have been considered for the composite systems.

**KEYWORDS:** Composite systems, Corrugated web beams, Finite elements method, Firefly algorithm, Hunting search algorithm, Load carrying capacity, Structural optimization.

**COMMITTEE:** Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

Assoc. Prof. Dr. Serdar ÇARBAŞ

Assoc. Prof. Dr. İbrahim AYDOĞDU

Assoc. Prof. Dr. Erkan DOĞAN

Assoc. Prof. Dr. Ramazan ÖZÇELİK



## ÖNSÖZ

Bu tezin ilk aşamasında stokastik (olasılıksal) arama tekniklerinden av arama ve ateşböceği algoritmaları kullanılarak yeni nesil kirişlerden biri olan ondülin gövdeli çelik kirişlerin optimum boyutlandırılması araştırılmıştır. Bu optimizasyon algoritmalarının yapı sektöründe daha etkin kullanılabilmesi için yeniden formüle edilmesi planlanmıştır. Bu sebeple, ondülin gövdeli kirişler tasarlanırken tasarımı yapılan çelik kirişlerin ulusal ve uluslararası şartnamelerde belirtilen yük ve tasarım kriterlerini sağlamasına dikkat edilmiştir. Bu bağlamda, ülkemizde oldukça maliyetli olarak bilinen çelik yapıların daha ekonomik olarak tasarlanması amaçlanmıştır. Tezin ikinci kısmında; farklı yükleme koşulları altındaki yeni nesil ondülin gövdeli çelik kirişlerin dayanımları hidrolik güç ünitesi basınç silindirinine sahip yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir. Ondülin gövdeli çelik kiriş numunelerinin sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak elastik burkulma analizleri yapıldıktan ve taşıyabilecekleri kritik yükler hesaplandıktan sonra her bir kiriş deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Eleman bazında yapılan çelik kiriş testlerinin ardından dalgalı gövdeli kirişlere döşemeler de eklenerek kompozit olarak tekrardan tasarlanmış ve böylece bu kirişlerin döşemelere etkileyen yük altındaki nihai yük taşıma kapasiteleri hesaplanarak davranışları incelenmiştir. Tezin son kısmında ise, sonlu elemanlar programı kullanılarak dalgalı gövdeli çelik kiriş numunelerinin gövde levhası burkulma analizleri ve taşıyabilecekleri kritik yüklerin hesabı gerçekleştirilmiş ve her farklı gövde kalınlığına ve boyuna sahip ondülin gövdeli kirişler için kaydedilen sonlu eleman analizi sonuçları deneylerden elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. Bu yolla güncel hayattan alınan gerçek kiriş uygulamaları ve yapı optimizasyonu ile elde edilecek düşük maliyetli çelik kirişlerin göçme modlarının reel olarak tespiti sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, TÜBİTAK 213M656 nolu proje kapsamında proje yürütücüsü Doç. Dr. Ferhat ERDAL ile birlikte, optimizasyon konusunda uzman bir araştırmacı olan Doç. Dr. Erkan DOĞAN'a, özellikle deneysel süreçte bursiyer yüksek lisans öğrencisi Serkan TAŞ'a ve bugüne kadar danıştığım hiçbir konuda beni cevapsız bırakmayan Doç. Dr. Serdar ÇARBAŞ'a koşulsuz sevgileri, bu tez çalışmasındaki emekleri ve her daim yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca benden hiçbir koşulda moral desteklerini esirgemeyen, annem Gülayşe TUNCA, ablam Güler TUNCA GÖK ve kıymetli eşim Selma TUNCA'ya ayrıca çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan saygıdeğer babam Mustafa TUNCA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vii
AKADEMİK BEYAN .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xxi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xxxı
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tezin Yapısı .....	2
2. KAYNAK TARAMASI .....	5
2.1. Yapı Optimizasyonu.....	5
2.1.1. Av arama yöntemi .....	6
2.1.2. Ateş böceği yöntemi.....	7
2.2. Ondülin Gövdeli Kirişler.....	11
2.2.1. Trapezoidal gövdeli kirişler .....	12
2.2.2. Sinusoidal gövdeli kirişler.....	28
2.2.3. Zigzag gövdeli kirişler .....	39
3. MATERYAL VE METOT .....	45
3.1. Optimizasyon .....	45
3.1.1. Av arama yöntemi .....	45
3.1.1.1. Tamsayı değişkenleri için av arama optimizasyon yöntemi .....	45
3.1.1.2. Sınırlayıcıların kontrolü .....	47
3.1.1.3. Tasarım örneği .....	47
3.1.2. Ateşböceği algoritması yöntemi.....	48
3.1.2.1. Tasarım örneği .....	51
3.1.3. Optimum boyutlandırma probleminin matematiksel modeli .....	52
3.1.3.1. Dalgalı gövde bölgesi için davranış sınırlayıcıları.....	54
3.1.3.2. Alt ve üst başlık bölgeleri için davranış sınırlayıcıları.....	54
3.1.4. Ondülin gövdeli kiriş için bilgisayar uygulamaları.....	55

3.1.5. Ondülin gövdeli kompozit kiriş tasarımı .....	56
3.2. Deneysel Çalışma.....	58
3.2.1. Ondülin gövdeli kirişlerin kapasitelerinin belirlenmesi.....	58
3.2.1.1. Ondülin gövdeli kirişlerin fabrikasyon süreci.....	58
3.2.1.2. Ondülin gövdeli kirişlerin eleman bazında testleri .....	61
3.2.2. Ondülin gövdeli kompozit kiriş deneyleri .....	69
3.2.2.1. Ondülin gövdeli kompozit kirişlerin fabrikasyon süreci.....	69
3.2.2.2. Ondülin gövdeli kirişlerin kompozit döşeme testleri.....	71
3.3. Optimum Boyutlandırılan OGK'lerin Malzeme Testleri .....	73
3.3.1. Malzeme çekme dayanımları .....	73
3.3.2. OGKK'lerin malzeme basınç dayanımları.....	74
3.4. Nümerik Çalışma .....	75
3.4.1. Ondülin gövdeli kirişlerin sonlu elemanlar analizleri.....	75
3.4.1.1. Geometrik modelleme.....	75
3.4.1.2. Malzeme özellikleri.....	77
3.4.1.3. Ağ büyüklüğü ve kullanılan yöntem.....	78
3.4.1.4. Yükleme durumu ve mesnet koşulları .....	79
3.4.2. Ondülin gövdeli kompozit döşemelerin sonlu elemanlar modellerinin oluşturulması.....	81
3.4.2.1. Geometrik modelleme.....	82
3.4.2.2. Malzeme özellikleri.....	83
3.4.2.3. Ağ büyüklüğü ve kullanılan yöntem.....	83
3.4.2.4. Yükleme durumu ve mesnet koşulları .....	85
3.4.2.5. Döşeme kirişi sonlu elemanlar yükleme durumu.....	85
4. BULGULAR.....	91
4.1. OGK'lerin Optimum Boyutları.....	91
4.1.1. 5-metre açıklıklı OGK_330 kirişinin optimizasyonu.....	91
4.1.2. 5-metre açıklıklı OGK_415 kirişinin optimizasyonu.....	92
4.1.3. 5-metre açıklıklı OGK_500 kirişinin optimizasyonu.....	94
4.2. OGKK'lerin döşeme boyutları.....	95

4.3. OGK Kapasitelerinin Eleman Bazında Testleri .....	96
4.3.1. OGK_330 kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu.....	96
4.3.2. OGK_330 üzerinde iki noktadan yükleme durumu .....	99
4.3.3. OGK_330 kirişleri üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu.....	102
4.3.4. OGK_500 kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu.....	104
4.3.5. OGK_500 kirişleri üzerinde iki noktadan yükleme durumu.....	107
4.3.6. OGK_500 kirişleri üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu.....	110
4.3.7. OGK_415 kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu.....	113
4.3.8. OGK_415 kirişleri üzerinde iki noktadan yükleme durumu.....	116
4.3.9. OGK_415 kirişleri üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu.....	119
4.4. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Kompozit Döşeme Testleri .....	122
4.4.1. OGKK_330 kirişleri üzerinde iki noktasal yükleme durumu .....	122
4.4.2. OGKK_415 kirişleri üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu.....	123
4.4.3. OGKK_500 kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu.....	124
4.5. Optimum Boyutlandırılan Kirişlerin Malzeme Testleri .....	125
4.5.1. Çelik çekme testleri.....	125
4.5.2. Döşeme betonu malzeme basınç dayanımları .....	126
4.6. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Sonlu Elemanlar Analizleri.....	127
4.6.1. OGK_330 kirişi sonlu elemanlar tekil yükleme durumu .....	127
4.6.2. OGK_330 kirişi sonlu elemanlar iki noktadan yükleme durumu .....	130
4.6.3. OGK_330 kirişi sonlu elemanlar yayılı yükleme durumu .....	132
4.6.4. OGK_415 kirişi sonlu elemanlar tekil yükleme durumu .....	134
4.6.5. OGK_415 kirişi sonlu elemanlar iki noktadan yükleme durumu .....	137
4.6.6. OGK_415 kirişi sonlu elemanlar yayılı yükleme durumu .....	140
4.6.7. OGK_500 kirişi sonlu elemanlar tekil yükleme durumu .....	142
4.6.8. OGK_500 kirişi sonlu elemanlar iki noktadan yükleme durumu .....	144
4.6.9. OGK_500 kirişi sonlu elemanlar yayılı yükleme durumu .....	147
4.7. OGKK Döşemelerinin Sonlu Elemanlar Modellerinin Oluşturulması .....	149
4.7.1. OGKK_330 kirişi sonlu elemanlar iki noktasal yükleme durumu.....	150
4.7.2. OGKK_415 kirişi sonlu elemanlar düzgün yayılı yükleme durumu .....	153

4.7.3. OGKK_500 kirişı sonlu elemanlar tekil yükleme durumu .....	156
5. TARTIŞMA .....	159
6. SONUÇLAR .....	165
7. KAYNAKLAR .....	167
ÖZGEÇMİŞ	



## AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Ondülin Gövdeli Kirişlerin Optimizasyonu ve Nihai Yük Taşıma Kapasitelerinin 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

Osman Tunca





## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

- $h_F$  : çelik tabliye yüksekliği
- $h_c$  : sacın üstündeki beton kalınlığı
- $h_p$  : sacın tırnaklarındaki beton kalınlığı
- $A_G$  : 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 eksen çelik kirişin üst başlığında ise moment değeri
- $N_{NORMAL}$  : başlıklardaki normal kuvvet
- $N_{T-MAKS}$  : başlıklarda oluşan maksimum normal kuvvet
- $N_{stu}$  : stud çivisi sayısı
- $P_v$  : kirişte yük etkisiyle oluşan kuvvet
- $P_{Rd}$  : bir kesme çivisinin taşıyabileceği nihai kuvvet
- $Ra_{max}, Ra_{max}$  : rasgele hareket yarıçapı değerleri
- $R_c$  : beton basınç kuvveti
- $V_D$  : 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

- $b_{eff}$  : etkili beton genişliği
- $b_f$  : giriş başlık genişliği
- $d_1$  : çelik girişin merkezi ile üst yüzeyi arası mesafe
- $f_{ck}$  : beton basınç dayanımı
- $f_u$  : çelik maksimum çekme gerilmesi
- $f_y$  : malzeme akma gerilmesi
- $k_c$  : basınç kuvvet faktörü
- $l_0$  : giriş açıklığı
- $t_c$  : beton döşemenin yüksekliği
- $t_f$  : giriş başlık kalınlığı
- $t_w$  : giriş gövde kalınlığı
- $y_c$  : çelik girişin basınç bölgesinin merkezi ile üst yüzeyi arası mesafe
- $y_t$  : çelik kesitin çekme bölgesinin merkezi ile alt yüzeyi arası mesafe
- $\gamma_a, \gamma_c$  : çelik ve beton için malzeme kısmi faktörleri
- $\gamma_v$  : güvenlik katsayısı (Kesme çivisi)
- $\lambda_{GN}$  : giriş dalgalı gövde narinlik parametresi
- $\rho_s$  : çeliğin birim hacim ağırlığı
- $\sigma_{ALLOW}$  : başlıkların izin verilen çekme gerilmesi
- $\sigma_{EL}$  : elastik sınır gerilme
- $\tau_{EG}$  : giriş gövde enine burkulma kayma parametresi
- $h$  : dalgalı giriş gövde boyu
- $A$  : başlıkların kesit alanı
- $E$  : elastisite modülü
- $HGCR$  : avcı grubu değerlendirme oranı
- $HGS$  : av grubu boyutu
- $I$  : ışık yoğunluğu

- $L$  : kiriş açıklığı
- $MML$  : lidere doğru maksimum hareket
- $d$  : kompozit kirişlerde çelik kiriş yüksekliği
- $f(x_i)$  : amaç fonksiyonu
- $g(x_i)$  : tasarım sınırlayıcısı
- $m$  : tasarım sınırlayıcıların toplam sayısı
- $n$  : tasarım değişkenleri sayısı
- $r$  : 0-1 arasında rasgele seçilen sayı
- $s$  : gövde dalga boyu
- $w$  : gövde dalga boyları arası mesafe
- $z$  : başlıkların ağırlık merkezleri arasındaki mesafe
- $\alpha$  :  $[0,1]$  arasında değişen rasgele bir sayı
- $\mu$  ve  $\varphi$  : yakınsama oranı parametreleri
- $\beta$  : çekicilik
- $\gamma$  : ışık emme katsayısı
- $\varepsilon$  : ateşböceğinin yeni konumunun belirlenmesinde ağırlığını ifade eden rasgele bir sayı

Ondalık ayraç olarak virgül kullanılmıştır.

## **Kısaltmalar**

AAA : Av Arama Algoritması

ABA : Ateşböceği Algoritması

BSA : Geri İzleme En İyileme Algoritması

BTA : Benzetimli Tavlama Algoritması

CRM : Computer Rolling Machine

DVM-ABA: Destek Vektör Makinesi Ateşböceği Algoritması

DVM-Dalgacık: Destek Vektör Makinesi Dalgacık

EKKDVS: En Küçük Kareler Destek Vektörü Sınıflandırması

EYA : Emperyalist Yarışması Algoritması

FEMA : Federal Insurance and Mitigation Administration

GA<sub>s</sub> : Genetik Algoritmalar

GAA : Grup Arama Algoritması

GİA :Geri İzleme Algoritması

GKA :Guguk Kuşu Algoritması

HA : Harmoni Arama

HA : Harmoni Arama Algoritması

HSZA : Hızlandırılmış Sürü Zekası Algoritması

KKO : Karınca Kolisi Optimizasyonu

LRFD : Load and Resistance Factor Design

MP : Matematiksel Programlama

OGK : Ondülin Gövdeli Kiriş

OGKK: Ondülin Gövdeli Kompozit Kiriş

OK : Optimumluk Kriteri

BOA :Balina Optimizasyonu Algoritması

KAA : Karga Arama Algoritması

NASA : National Aeronautics and Space Administration  
SE : Sonlu Elemanlar  
SEA : Sonlu Elemanlar Analizi  
SGK : Sinüsoidal Gövdeli Kiriş  
SGKK : Sinüsoidal Gövdeli Kompozit Kiriş  
SOFIL : Swarm Optimized Fuzzy Instance Based Learning  
SZA : Sürü Zekası Algoritması  
TGK : Trapezoid Gövdeli Kiriş  
TGKK : Trapezoid Gövdeli Kompozit Kiriş  
EC : Eurocode  
NACA : National Advisory Committee for Aeronautics  
TS : Türk Standardı  
YA : Yarasa Algoritması  
YSA : Yapay Sinir Ağları  
ZGK : Zigzag Gövdeli Kiriş



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. a) Sinüsoidal; b) Trapezoidal; c) Zigzag gövde yapısı.....	12
Şekil 2.2. Sherman ve Fisher (1971) test düzeni .....	13
Şekil 2.3. Elgaaly ve Hamilton (1997) test düzeni .....	14
Şekil 2.4. Metwally ve Loow (2003) test düzeni .....	15
Şekil 2.5. Mo vd. (2003) kompozit kutu kirişin göçme durumu .....	15
Şekil 2.6. Anami ve Sause (2005) TGK birleşiminin SE modeli .....	16
Şekil 2.7. Anami vd. (2005) kaynak bölgesinde oluşan çatlak.....	16
Şekil 2.8. Gil vd. (2005) kiriş numunesinin deformasyonu.....	17
Şekil 2.9. Dabon ve Elamary (2006) TGK göçme durumu .....	17
Şekil 2.10. Driver vd. (2006) deney düzeni .....	18
Şekil 2.11. Sherif vd. (2006) yorulma çatlakları.....	18
Şekil 2.12. Tahir vd. (2008) birleşim bölgesi deformasyonu .....	19
Şekil 2.13. Denan, Saad ve Osman (2009) majör eksende elastik eğilme testi .....	20
Şekil 2.14. Moon vd. (2009) gövde burkulma durumu.....	20
Şekil 2.15. Kim ve Lee (2011) yatay kesme göçmesi durumu .....	21
Şekil 2.16. Kovesdi vd. (2012a) test düzeni .....	22
Şekil 2.17. Abraham (2013) beton dolgulu kiriş testi.....	23
Şekil 2.18. Arunkumar, Sampathkumar ve Sukumar (2013) TGK göçme durumu .....	23
Şekil 2.19. Lho vd. (2014) düşey gövde burkulması .....	24
Şekil 2.20. Cao vd. (2015) deney düzeneği .....	24
Şekil 2.21. Liv d. (2015) deney düzeneği .....	25
Şekil 2.22. Jager vd. (2016) deney düzeneği .....	26
Şekil 2.23. Elkawas vd. (2017) SE modeli .....	26
Şekil 2.24. Leblouba vd. (2017) TGK gövde burkulması .....	27
Şekil 2.25. Li, Zhang ve Li (2019) TGK gövde burkulması.....	28
Şekil 2.26. Fraser (1956) TGK gövde burkulması.....	29
Şekil 2.27. Khalid vd. (2004) dikey SGK göçme sonrası görünüm .....	29
Şekil 2.28. Kıymaz vd. (2010) gövde boşluklu SGK'in SE modeli .....	30
Şekil 2.29. Pasternak ve Kubienc (2010) SGK kaynak simülasyonu .....	31
Şekil 2.30. Pimenta vd. (2012) kiriş göçme modu.....	31

<b>Şekil 2.31.</b> Pasternak ve Bartholome (2012) SGK'lerin <b>a)</b> Lokal, <b>b)</b> Global göçme modu.....	32
<b>Şekil 2.32.</b> Shahmohammadi vd. (2013) kullanılan <b>a)</b> Düz; <b>b)</b> Trapezoidal; <b>c)</b> Sinüsoidal; <b>d)</b> Zigzag gövde modelleri.....	33
<b>Şekil 2.33.</b> Aydın vd. (2014) kolon-kiriş birleşimi göçme modu.....	33
<b>Şekil 2.34.</b> Aydın vd. (2015) SGK deney düzeneği.....	34
<b>Şekil 2.35.</b> Pimenta vd. (2015) SGK göçme durumu.....	34
<b>Şekil 2.36.</b> Aydın vd. (2016) SGK göçme durumu.....	35
<b>Şekil 2.37.</b> Guo vd. (2016) kemer testi deney düzeneği.....	36
<b>Şekil 2.38.</b> Basinski (2018) SGK gövde burkulması.....	37
<b>Şekil 2.39.</b> Zubkov vd. (2018) iki noktadan yükleme deney düzeni.....	38
<b>Şekil 2.40.</b> Gremza ve Basinski (2019) döşemeli kiriş deney düzeni.....	39
<b>Şekil 2.41.</b> Metwally ve Loov (2003) kompozit kiriş deney düzeni.....	40
<b>Şekil 2.42.</b> Denan ve Hashim (2013) eğilmeye maruz kalan ZGK.....	41
<b>Şekil 2.43.</b> Mathe ve Parthasarathi (2015) beton dolgulu ZGK eğilme testi.....	42
<b>Şekil 2.44.</b> Denan vd. (2016) ZGK burulma testi.....	42
<b>Şekil 2.45.</b> Sumathi ve Chandra Babu (2017) ZGK deney elemanı.....	43
<b>Şekil 3.1.</b> Altı katlı ve iki açıklığa sahip düzlem çelik çerçeve.....	48
<b>Şekil 3.2.</b> Ateş böceği optimizasyon algoritması.....	50
<b>Şekil 3.3.</b> 61 elemanlı konsol mesnetli çelik ızgara sistemi.....	51
<b>Şekil 3.4.</b> Tasarım değişkenlerinin OGK üzerinde gösterimi.....	53
<b>Şekil 3.5.</b> Sinüsoidal dalga gövdeli kompozit kirişe etkiyen iç kuvvetler.....	56
<b>Şekil 3.6. a)</b> Bağlantı ankraji uygulaması; <b>b)</b> Bağlantı ankraji.....	58
<b>Şekil 3.6. a)</b> CRM yöntemi ile gövdenin dalgalı hale getirilmesi ve; <b>b)</b> Başlıklar ile kaynaklanması.....	59
<b>Şekil 3.7.</b> Gövdenin ondülin forma getirilmesi için hazırlanan kalıp.....	59
<b>Şekil 3.8. a)</b> Gövdenin ondülin forma getirilmesi; <b>b)</b> Elde edilen ondülin gövde.....	60
<b>Şekil 3.9. a)</b> Gövde ve başlıkların mengenerlerle birbirine tutturulması; <b>b)</b> Noktasal kaynakların atılması; <b>c)</b> Full penetrasyon kaynaklama; <b>d)</b> Antipas boya ile boyanması.....	61
<b>Şekil 3.10.</b> Yanal desteklenmiş ondülin gövdelerin kiriş test düzeneği.....	62
<b>Şekil 3.11.</b> Ondülin gövdelerin kiriş test tekil yükleme durumu.....	62

<b>Şekil 3.12. a)</b> Yük hücresi; <b>b)</b> Sabit mesnet; <b>c)</b> Hareketli mesnet.....	63
<b>Şekil 3.13. a)</b> Düşey deplasman ölçer; <b>b)</b> Yatay deplasman ölçer ve; <b>c)</b> Gerinim ölçerlerin yükleme sisteminde gösterimi .....	63
<b>Şekil 3.14.</b> OGK testi iki noktadan yükleme durumu.....	64
<b>Şekil 3.15.</b> OGK_330_Test_3 sonrası bayrak levhalarının sabitlenmesi .....	65
<b>Şekil 3.16.</b> Ondülin gövdelerin kiriş düzgün yayılı yükleme durumu.....	65
<b>Şekil 3.17.</b> OGK_415 ve OGK_500 çelik kiriş testleri için tasarlanan yanal deplasman engelleyici .....	66
<b>Şekil 3.18. a)</b> Yanal deplasman engelleyici, <b>b)</b> Taban levhasının deliklerine klavuz yardımıyla diş açma, <b>c)</b> Ankraj uygulanacak olan zeminin matkapla delinmesi, <b>d)</b> Taban levhasının yere sabitlenmesi, <b>e)</b> Kullanılan IPN_300 çelik profiller, <b>f)</b> Profillere berkitme levhalarının kaynatılması, <b>g)</b> Kutu profillerden yapılan desteklerin kaynaklanması, <b>ğ)</b> Yanal deplasman engelleyicinin montajı.....	68
<b>Şekil 3.19.</b> Ondülin gövdelerin kiriş test tekil yükleme durumu .....	69
<b>Şekil 3.20.</b> OGK_330, OGK_415 ve OGK_500 kompozit döşeme kirişlerinin kalıplarının hazırlanması.....	70
<b>Şekil 3.21.</b> OGK_330, OGK_415 ve OGK_500 döşeme kirişleri için beton dökümü...	71
<b>Şekil 3.22.</b> OGK_330 döşeme kirişleri üzerinde iki noktasal yükleme durumu .....	72
<b>Şekil 3.23.</b> OGK_415 üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu.....	72
<b>Şekil 3.24.</b> OGK_500 döşeme kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu.....	73
<b>Şekil 3.25.</b> ASTM standartlarına göre hazırlanan kupon geometrisi (mm).....	74
<b>Şekil 3.26. a)</b> 50t'luk pres <b>b)</b> CNC yazılım ekranı <b>c)</b> CNS kesim işlemi.....	74
<b>Şekil 3.27.</b> OGK_415 beton basınç deney düzeneği.....	75
<b>Şekil 3.28.</b> OGK_330 Ondülin Gövdeli Kiriş Geometrik Modeli.....	76
<b>Şekil 3.29.</b> Sonlu elemanlar modelinde birleşim ayarları .....	76
<b>Şekil 3.30.</b> Lineer ve lineer olmayan analiz kıyaslanması.....	77
<b>Şekil 3.31.</b> Malzeme özelliklerinin ANSYS yazılımına girilmesi.....	78
<b>Şekil 3.32.</b> Farklı ağ büyüklüklerine karşılık gelen maksimum gerilmeler.....	79
<b>Şekil 3.33. a)</b> Deplasmanın 10 adıma tanımlanması; <b>b)</b> Deplasman–zaman diyagramı	79
<b>Şekil 3.34. a)</b> Tekil yükün SEA uygulanması; <b>b)</b> Deney düzeneğinde yükün uygulanması ve veri okunması; <b>c)</b> Reaksiyon kuvvetinin SEA'de okunması .....	80
<b>Şekil 3.35. a)</b> Hareketli, <b>b)</b> Sabit mesnet koşullarının modellenmesi .....	80

Şekil 3.36. a) Hareketli, b) Sabit mesnet hareket sınırlayıcılarının atanması .....	81
Şekil 3.37. a) Deneydeki deplasman ölçerlerin, b) SEA ile modellenmesi.....	81
Şekil 3.38. a) SEA’de donatı ve kesme saplamaları b) ANSYS Design Modeller’da tasarlanan OGKK_415 kirişi .....	82
Şekil 3.39. Ondülin gövdeli kompozit kirişlerin birleşim ayarları .....	83
Şekil 3.40. Doğrusal olmayan beton malzeme özelliklerinin ANSYS yazılımına girilmesi .....	83
Şekil 3.41. Farklı ağ büyüklüklerine karşılık gelen maksimum von mises gerilmeleri	84
Şekil 3.42. Ondülin gövdeli kompozit döşeme kirişinin SE’ya ayrılması.....	85
Şekil 3.43. SEA OGKK_330 üzerine ortalama yükün uygulanması.....	86
Şekil 3.44. SEA orta nokta deplasmanının okunması.....	86
Şekil 3.45. a) OGKK_330 SEA statik yapısı; b) OGKK_330 deney düzeni .....	87
Şekil 3.46. a) OGKK_415 SEA statik yapısı; b) OGKK_415 deney düzeni .....	88
Şekil 3.47. a) OGKK_500 SEA statik yapısı; b) OGKK_500 deney düzeni .....	89
Şekil 4.1. Optimum boyutlandırılması yapılan 5-metre açıklıklı OGK.....	91
Şekil 4.2. Optimum boyutlandırılan OGK_330 kirişinin profil kesitleri.....	92
Şekil 4.3. Optimum boyutlandırılan OGK_415 kirişinin profil kesitleri.....	93
Şekil 4.4. Optimum boyutlandırılan OGK_500 kirişinin profil kesitleri.....	95
Şekil 4.5. OGK_330_Test_1 tekil yükleme sonrası durumu .....	96
Şekil 4.6. OGK_330_Test_1 tekil yükleme yük-deplasman grafiği.....	97
Şekil 4.7. OGK_330_Test_1 göçme durumu.....	97
Şekil 4.8. OGK_330_Test_2 göçme durumu.....	98
Şekil 4.9. OGK_330_Test_2 yük-deplasman grafiği.....	98
Şekil 4.10. OGK_330 tekil yükleme yük-deplasman grafikleri .....	99
Şekil 4.11. OGK_330 iki noktadan yükleme durumu .....	99
Şekil 4.12. OGK_330_Test_3 yanal burkulma durumu .....	100
Şekil 4.13. OGK_330_Test_3 yük-deplasman grafiği.....	100
Şekil 4.14. OGK_330_Test_4 yükleme göçme durumu.....	101
Şekil 4.15. OGK_330_Test_4 yük-deplasman grafiği.....	101
Şekil 4.16. OGK_330 iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri.....	102
Şekil 4.17. OGK_330_Test_5 yanal burkulma durumu .....	102
Şekil 4.18. OGK_330_Test_5 yük-deplasman grafiği.....	103

<b>Şekil 4.19.</b> OGK_330_Test_6 göçme durumu.....	103
<b>Şekil 4.20.</b> OGK_330_Test_6 yük-deplasman grafiği.....	104
<b>Şekil 4.21.</b> OGK_330 iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri.....	104
<b>Şekil 4.22.</b> OGK_500_Test_7 tekil yükleme durumu .....	105
<b>Şekil 4.23.</b> OGK_500_Test_7 göçme durumu.....	105
<b>Şekil 4.24.</b> OGK_500_Test_7 yük-deplasman grafiği.....	106
<b>Şekil 4.25.</b> OGK_500_Test_8 göçme durumu.....	106
<b>Şekil 4.26.</b> OGK_500_Test_8 yük-deplasman grafiği.....	107
<b>Şekil 4.27.</b> OGK_500 tekil yükleme yük-deplasman grafikleri .....	107
<b>Şekil 4.28.</b> OGK_500_Test_9 lokal ezilme durumu.....	108
<b>Şekil 4.29.</b> OGK_500_Test_9 yük-deplasman grafiği.....	108
<b>Şekil 4.30.</b> OGK_500_Test_10 iki noktadan yükleme durumu.....	109
<b>Şekil 4.31.</b> OGK_500_Test_10 göçme durumu.....	109
<b>Şekil 4.32.</b> OGK_500_Test_10 yük-deplasman grafiği.....	110
<b>Şekil 4.33.</b> OGK_500 iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri.....	110
<b>Şekil 4.34.</b> OGK_500_Test_11 yanal burkulma durumu .....	111
<b>Şekil 4.35.</b> OGK_500_Test_11 yük-deplasman grafiği.....	111
<b>Şekil 4.36.</b> OGK_500_Test_12 göçme durumu.....	112
<b>Şekil 4.37.</b> OGK_500_Test_12 yük-deplasman grafiği.....	112
<b>Şekil 4.38.</b> OGK_500 yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri .....	113
<b>Şekil 4.39.</b> OGK_415_Test_13 tekil yükleme durumu .....	113
<b>Şekil 4.40.</b> OGK_415_Test_13 tekil yükleme a) Yanal burkulma ve; b) Göçme durumu .....	114
<b>Şekil 4.41.</b> OGK_415_Test_13 yük-deplasman grafiği.....	114
<b>Şekil 4.42.</b> OGK_415_Test_14 a) Yanal burkulma ve; b) Göçme durumu .....	115
<b>Şekil 4.43.</b> OGK_415_Test_14 yük-deplasman grafiği.....	115
<b>Şekil 4.44.</b> OGK_415 tekil yükleme yük-deplasman grafikleri .....	116
<b>Şekil 4.45.</b> Ondülin gövdelerin kiriş test iki noktadan yükleme durumu .....	116
<b>Şekil 4.46.</b> OGK_415_Test_15 a) Yanal burkulma ve; b) Göçme durumu .....	117
<b>Şekil 4.47.</b> OGK_415_Test_1 yük-deplasman grafiği.....	117
<b>Şekil 4.48.</b> OGK_415_Test_16 a) Yanal burkulma ve; b) Göçme durumu .....	118
<b>Şekil 4.49.</b> OGK_415_Test_16 yük-deplasman grafiği.....	118

<b>Şekil 4.50.</b> OGK_415 iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri.....	119
<b>Şekil 4.51.</b> OGK_415_Test_17 <b>a)</b> Yanal burkulma ve; <b>b)</b> Göçme durumu .....	120
<b>Şekil 4.52.</b> OGK_415_Test_17 yük-deplasman grafiği.....	120
<b>Şekil 4.53.</b> OGK_415_Test_18 <b>a)</b> Yanal burkulma ve; <b>b)</b> Göçme durumu .....	121
<b>Şekil 4.54.</b> OGK_415_Test_18 yük-deplasman grafiği.....	121
<b>Şekil 4.55.</b> OGK_415 yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri .....	122
<b>Şekil 4.56.</b> OGKK_330 döşeme kirişleri iki noktadan yükleme göçme durumları .....	122
<b>Şekil 4.57.</b> OGK_330 kompozit kirişleri iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri.....	123
<b>Şekil 4.58.</b> OGKK_415 döşeme kirişleri düzgün yayılı yükleme göçme durumları ....	123
<b>Şekil 4.59.</b> OGKK_415 düzgün yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri.....	124
<b>Şekil 4.60.</b> OGKK_500 döşeme kirişleri İki noktadan yükleme göçme durumları.....	124
<b>Şekil 4.61.</b> OGK_500 kompozit kirişleri tekil yükleme yük-deplasman grafikleri.....	125
<b>Şekil 4.62.</b> <b>a)</b> Çelik kupon malzeme deneyi; <b>b)</b> Deney sonrası kuponlar .....	125
<b>Şekil 4.63.</b> <b>a)</b> Hasır donatı malzeme deneyi; <b>b)</b> Deney sonrası donatılar .....	126
<b>Şekil 4.64.</b> OGK_330 kupon test sonuçları .....	126
<b>Şekil 4.65.</b> Ondülin gövdeli kompozit döşeme kirişinin beton basınç deneyi.....	127
<b>Şekil 4.66.</b> Ondülin gövdeli kirişe SEA ile uygulanan tekil yük .....	127
<b>Şekil 4.67.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme .....	128
<b>Şekil 4.68.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman.....	128
<b>Şekil 4.69.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmesi .....	129
<b>Şekil 4.70.</b> OGK_330 kirişinin tekil yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	129
<b>Şekil 4.71.</b> Ondülin gövdeli kirişe SEA’nde uygulanan iki noktadan yük .....	130
<b>Şekil 4.72.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme .....	130
<b>Şekil 4.73.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında maksimum deplasman.....	131
<b>Şekil 4.74.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmesi.....	131
<b>Şekil 4.75.</b> OGK_330 kirişinin iki noktadan yük altında sea ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	132
<b>Şekil 4.76.</b> Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan yayılı yük .....	132
<b>Şekil 4.77.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum gerilme .....	133

<b>Şekil 4.78.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman.....	133
<b>Şekil 4.79.</b> OGK_330 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmesi .....	134
<b>Şekil 4.80.</b> OGK_330 kirişinin yayılı yük altında sea ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	134
<b>Şekil 4.81.</b> OGK_415 SEA ile uygulanan tekil yük .....	135
<b>Şekil 4.82.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme.....	135
<b>Şekil 4.83.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman.....	136
<b>Şekil 4.84.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmesi .....	136
<b>Şekil 4.85.</b> OGK_415 kirişinin tekil yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	137
<b>Şekil 4.86.</b> Ondülin gövdeli kirişe SEA ile uygulanan iki noktasal yük.....	137
<b>Şekil 4.87.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum gerilme ..	138
<b>Şekil 4.88.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum deplasman.....	138
<b>Şekil 4.89.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki iki noktyasal yük altında kesme gerilmesi .....	139
<b>Şekil 4.90.</b> OGK_415 kirişinin iki noktasal yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	139
<b>Şekil 4.91.</b> Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan yayılı yük .....	140
<b>Şekil 4.92.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum gerilme.....	140
<b>Şekil 4.93.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman.....	141
<b>Şekil 4.94.</b> OGK_415 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmesi .....	141
<b>Şekil 4.95.</b> OGK_415 kirişinin yayılı yük altında sea ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	142
<b>Şekil 4.96.</b> Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan tekil yük .....	142
<b>Şekil 4.97.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme.....	143
<b>Şekil 4.98.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman.....	143
<b>Şekil 4.99.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmesi .....	144
<b>Şekil 4.100.</b> OGK_500 kirişinin tekil yük altında sea ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	144
<b>Şekil 4.101.</b> Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan iki noktasal yük .....	145
<b>Şekil 4.102.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum gerilme	145

<b>Şekil 4.103.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum deplasman.....	146
<b>Şekil 4.104.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında kesme gerilmesi.....	146
<b>Şekil 4.105.</b> OGK_500 kirişinin iki noktasal yük altında sea ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	147
<b>Şekil 4.106.</b> Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan tekil yük .....	147
<b>Şekil 4.107.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum gerilme .....	148
<b>Şekil 4.108.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman.....	148
<b>Şekil 4.109.</b> OGK_500 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmesi .....	149
<b>Şekil 4.110.</b> OGK_500 kirişinin yayılı yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	149
<b>Şekil 4.111.</b> OGKK_330 kirişi SE statik yapısı.....	150
<b>Şekil 4.112.</b> OGKK_330 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum Von-Mises gerilme dağılımı .....	150
<b>Şekil 4.113.</b> OGKK_330 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum deplasman.....	151
<b>Şekil 4.114.</b> OGKK_330 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında kesme gerilmesi..	151
<b>Şekil 4.115.</b> OGKK_330 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında; <b>a)</b> Döşeme betonu üstten görünüm; <b>b)</b> Döşeme betonu alttan görünüm; <b>c)</b> Döşeme hasır donatı; <b>d)</b> Kesme saplaması eşlenik gerilme dağılımı. ....	152
<b>Şekil 4.116.</b> OGKK_330 iki noktasal yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	152
<b>Şekil 4.117.</b> OGKK_415 SE düzgün yayılı yükleme durumu.....	153
<b>Şekil 4.118.</b> OGKK_415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yük altında maksimum gerilme.....	153
<b>Şekil 4.119.</b> OGKK_415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yük altında maksimum deplasman.....	154
<b>Şekil 4.120.</b> OGKK_415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yük altında kesme gerilmesi.....	154
<b>Şekil 4.121.</b> OGKK_415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yük altında; <b>a)</b> Döşeme betonu üstten görünüm; <b>b)</b> Döşeme betonu alttan görünüm; <b>c)</b> Döşeme hasır donatı; <b>d)</b> Kesme saplaması eşlenik gerilme dağılımı. ....	155

<b>Şekil 4.122.</b> OGKK_415 düzgün yayılı yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri.....	155
<b>Şekil 4.123.</b> OGKK'e uygulanan tekil yükleme .....	156
<b>Şekil 4.124.</b> OGKK_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme.....	156
<b>Şekil 4.125.</b> OGKK_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman....	157
<b>Şekil 4.126.</b> OGKK_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmesi.....	157
<b>Şekil 4.127.</b> OGKK_500 kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında; <b>a)</b> Döşeme betonu üstten görünüm; <b>b)</b> Döşeme betonu alttan görünüm; <b>c)</b> Döşeme hasır donatı; <b>d)</b> Kesme saplaması eşlenik gerilme dağılımı. ....	158
<b>Şekil 4.128.</b> OGKK_500 tekil yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri .	158





## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 3.1.</b> Altı katlı ve iki açıklıklı çelik çerçeve için optimum boyutlandırma .....	48
<b>Çizelge 3.2.</b> 61 elemanlı konsol ızgara sisteminin optimum boyutlandırması .....	52
<b>Çizelge 3.3.</b> Ağ türlerinin düğüm noktası ve eleman sayıları .....	84
<b>Çizelge 4.1.</b> Optimizasyon tekniklerinin tasarım parametreleri .....	91
<b>Çizelge 4.2.</b> 5-metre açıklıklı OGK_330 kirişinin optimum boyutları .....	92
<b>Çizelge 4.3.</b> 5-metre açıklıklı OGK_415 kirişinin optimum boyutları .....	93
<b>Çizelge 4.4.</b> 5-metre açıklıklı OGK_500 kirişinin optimum boyutları .....	94
<b>Çizelge 5.1.</b> OGK_330 kirişinin ve IPN profillerle karşılaştırılması .....	160
<b>Çizelge 5.2.</b> OGK_415 kirişinin ve IPN profillerle karşılaştırılması .....	160
<b>Çizelge 5.3.</b> OGK_500 kirişinin ve IPN profillerle karşılaştırılması .....	161
<b>Çizelge 5.4.</b> Ondülin gövdeli çelik ve kompozit kirişlerin nihai yük taşıma kapasitelerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması .....	162



## 1. GİRİŞ

Çelik taşıyıcı sistemler betonarme sistemlere oranla belirli üstünlükler sergilerler. Yüksek yük taşıma kapasiteleri ve tasarımlarının hafif olması sebebiyle asgari düzeyde deprem yüklerine maruz kalmaları bu üstünlüklerinin başında gelir. Çeliğin malzeme özelliği olarak çekme ve basınç mukavemetlerinin eşit olması itibarı ile, çekme mukavemeti daha düşük malzemelerle yapılamayan yapısal sistemler için iyi bir çözüm yolu olarak düşünülebilirler. Çelik I-kesitli kirişlerde başlıklar gelen dış yükleri karşılarken profilin gövde kısmı ise yüklerden dolayı oluşan basınç gerilmelerini taşır ve kiriş içinde oluşan kesme kuvvetlerini iletir. 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 kirişin stabilitesinin kaybolmasına ve büyük deformasyonlara neden olur. Gövde kesiti ince dalgalı çelik bir levhanın aynı malzeme özelliklerine sahip alt ve üst başlık görevi gören iki çelik plaka ile birleştirilmesi şeklinde geliştirilerek tasarlanan Ondülin Gövdeli Kirişler (OGK) stabilite kaybına ve büyük deformasyonlara engel olurken, uygulanan yük kombinasyonları altında kirişin plastik limit noktasına gelmeden rijitlik kaybına bağlı burkulmasını engelleyerek kesme kuvvetine ve yerel etkilere karşı kirişin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Kiriş gövdesinin bu özel yapısı ile kiriş öz ağırlığının azalması ve yük taşıma kapasitesinin artması sağlanarak ekonomik kazanç elde edilmektedir. 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 döşemelerde ve normal kuvvet etkisine maruz kolon eleman olarak etkin bir şekilde kullanılabilirler. Bu kirişlerin kompozit yapı sistemleri olarak da sunulabilir avantajları olmasına rağmen, davranışları ve tasarımları ile ilgili hem ülkemizde hem de diğer ülkelerde henüz kapsamlı bir teknik standart mevcut değildir.

Ondülin gövdeli çelik kirişlerde kiriş gövdesinin trapezoid, sinüsoidal ve zigzag geometrisine bağlı olarak kirişin taşıyabileceği kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım sağlar. Elde edilen ilave dayanım kiriş gövdesinin inceltmesiyle malzeme tasarrufunda kullanılabilmesi gibi tasarıma betonarme bir döşeme eklenip Ondülin Gövdeli Kiriş (OGK) ile beraber çalışması sağlanarak eğilmeye karşı çok daha dayanıklı kompozit kirişler de üretilebilir. Elde edilecek bu kompozit kirişte güçlü ekseninde eğilme etkisi altında basınca çalışan kiriş başlığının yanal burkulması da kiriş boyunca engellenmiş olur. Bu şekilde optimum tasarlanan Ondülin Gövdeli Kompozit Kiriş (OGKK) hem dayanım açısından hem de maliyet bakımından büyük avantajlar sağlar.

Ülkemizde mühendislik uygulamalarında optimizasyon hemen hemen hiç kullanılmamaktadır. Halbuki, yapı optimizasyonu ile elemanları hazır profil listelerinden seçilen çelik yapıların en düşük ağırlıkla tasarlanması, dolayısıyla en düşük maliyetle inşa edilmesi mümkündür. Bu tez çalışması üç ana bölümden oluşmaktadır; ilk bölümde, dalgalı gövdeli kirişlerin yeni optimizasyon yöntemleri kullanılarak minimum ağırlığa sahip olacak şekilde optimum boyutlandırılması yapılmıştır. Bunun için yapma profil olan ondülin gövdeli kirişlerde gövde yüksekliği, kalınlığı ve dalgalı gövdenin tepe noktaları arası mesafenin yanı sıra başlık genişliği ve kalınlığı tasarım değişkeni olarak kabul edilmiştir. Bu tasarım davranış ve geometrik sınırlayıcılar altında kiriş ağırlığını minimum yapacak optimum değerleri elde edilmiştir. Formülasyonu oluşturulmuş yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü son zamanlarda geliştirilmiş optimizasyon teknikleri olan av arama ve ateşböceği algoritması yöntemlerinin adaptasyonu ile elde

edilmiş ve bu şekilde aynı zamanda bu stokastik yöntemlerin yapıya ilk uyarlamaları gerçekleştirilerek bu iki yöntemin minimum yapı elemanı ağırlığının bulunması sürecinde sergilediği performanslar karşılaştırılmıştır. Tezin ikinci ve esas aşaması olan deneysel süreçte ise; ilk kısımda optimizasyonu yapılan ondülin gövdeli çelik kirişlerin tekil yük, iki noktadan yükleme ve yayılı yükler altındaki dayanımları hidrolik güç ünitesi basınç silindirinine sahip yükleme çerçevesi kullanılarak testler yapılmıştır. Eleman bazında yapılan çelik kiriş testlerinden sonra dalgalı gövdeli kirişler kompozit olarak tasarlanan ve moment aktarmayan kompozit döşemelere etkiyen yük altındaki davranışları incelenerek nihai yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Kompozit döşemenin optimum boyutlandırılmasında çelik kirişlerin tasarımında göz önüne alınan değişkenlerin yanı sıra beton kalınlığı ve bağlantı elemanları ilave tasarım değişkenleri olarak dikkate alınmıştır. Tezin üçüncü ve son kısmında ise, dalgalı gövdeli çelik kiriş numunelerinin gövde levhası burkulma analizleri ve taşıyabilecekleri kritik yüklerin hesabı sonlu eleman programı kullanılarak hesaplanıp farklı gövde kalınlığına ve boyuna sahip ondülin gövdeli her kiriş için kaydedilen sonlu elemanlar analiz sonuçları deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Ondülin gövdeli çelik kiriş sistemlerinin tasarımları için BS EN1993-1:2005 (Annex-D, Eurocode-3) ve DIN-18-800 Teil-1 şartnamelerinde öngörülen tasarım kısıtları esas alınmıştır. Kompozit sistemler için bu şartnamelere ek olarak BS-8110'de öngörülen tasarım kısıtları esas kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında yük altındaki göçme durumları standart I-kesitli çelik profillerden farklılıklar gösteren ve tasarımları basit analiz yöntemleri ile yapılamayan ondülin gövdeli çelik kirişlerin optimum boyutlandırılmalarının nasıl yapılması gerektiği ve ülkemizde uygulanan yapılarında tercih edilmelerinin sağlayacağı avantajlar vurgulanmıştır.

### 1.1. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması genel olarak altı ana bölümden oluşmaktadır.

Bölüm 1'de tez çalışması kapsamında yapılan optimum boyutlandırma, deneysel ve sayısal araştırmaların hangi genel amaçları taşıdığı ve ayrıca çalışmanın hangi kapsamda yapılacağı genel perspektiften anlatılmıştır.

Bölüm 2'de yapılan kapsamlı literatür taramasında stokastik optimizasyon tekniklerinin arasından bu çalışmada çelik kirişlerin minimum ağırlıklı tasarımlarında kullanılan Av Arama ve Ateş Böceği algoritmaları, Ondülin Gövdeli Kirişler ve bu kirişlerin trapezoidal, sinüsoidal ve zigzag gibi farklı gövde tasarımları hakkında yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Bölüm 3'ün başlangıcında yapılan optimum boyutlandırılmanın nasıl yapıldığı ardından tez çalışmasının deneysel süreçte mevcut laboratuvar imkanlarında gerçekleştirilen deneysel sürecin nasıl gerçekleştirildiği ve son olarak da Sonlu Elemanlar Analiz paket yazılımında (*ANSYS Workbench v18.1*) yapılacak olan sayısal çalışmada kullanılan materyal ve metot detaylı olarak anlatılmıştır.

Bölüm 4'te olasılıksal optimizasyon algoritmalarından elde edilen minimum ağırlıktaki tasarım sonuçları ve bu tasarımlar dikkate alınarak üretilen deney numunelerinin farklı yükleme tipleri altında vermiş oldukları deneysel sonuçlar verilmiştir. Devamında tez çalışmasının son kısmında Sonlu Elemanlar (SE) paket

programıyla yapılan deneysel çalışmanın simülasyonundan elde edilen veriler yer almaktadır.

Bölüm 5'te tezin literatürdeki yeri açıklandıktan sonra sayısal, deneysel ve sonlu elemanlar çalışmalardan elde edilen sonuçlar sırasıyla tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak Ondülin Gövdeli Çelik Kirişlerin (OGK) yapı tasarımında maliyet ve mukavemet açısından değerlendirmesi yapılmıştır.

Bölüm 6'da tez çalışması sürecinde elde edilen sonuçlar detaylarıyla verilmiş ve OGK'ların çelik yapı uygulama alanında yaygınlaşmasına yönelik düşünceler aktarılmıştır.





## 2. KAYNAK TARAMASI

### 2.1. Yapı Optimizasyonu

Son dönemlere kadar yapı optimizasyonu da dahil olmak üzere çeşitli mühendislik optimizasyonu uygulamalarında, geleneksel olarak nitelendirilen Matematiksel Programlama (MP) ve Optimumluk Kriteri (OK) yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktaydı. Ancak bu metotların tasarım değişkenlerini sürekli kabul etmesi esasına dayanan türeve bağlı matematiksel çözüm algoritmaları, gerek metotların büyük yapı sistemlerine uygulamasını güçleştirmekte ve gerekse önceden belirlenen hazır kesitlere göre boyutlandırma gerektiren mühendislik yapılarının gerçeğe uygun tasarımları için ideal sonuç oluşturamamaktaydı. Bu tekniklerin uygulanmaları ile birlikte yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü matematiksel programlama yöntemleri (Hestenes vd. 1969; Venkayya vd. 1973) 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 zekâsı (Perez ve Behdinan 2007), erimiş metallerin soğutulma işlemi (Kirkpatrick vd. 1989), harmoni arama (Lee ve Geem 2004) en iyinin hayatta kalması (Goldberg 1989), karınca kolonisi (Dorigo ve Stützle 2004) gibi doğadaki evrimsel prensiplerin bilgisayar ortamında simüle edilmesi esasına dayalı olarak işleyen bu bulgusal yöntemler, ayrık çözüm üretebilirler ve başlangıç noktasına bakılmaksızın global optimuma yakın çözümler yakalayabilirler. Bu teknikler, amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların türevlerine ihtiyaç duymadığı gibi, deterministik kurallar yerine olasılığa dayalı arama yollarını kullanırlar. Tasarım mühendisleri son yıllarda alışılmışın dışında kalan etkili ve güçlü yöntemlerden esinlenerek birçok optimum boyutlandırma algoritması geliştirmişlerdir. Stokastik optimizasyon yöntemleri, geleneksel metotlara göre şu ayrıcalıkları ve üstünlükleri gösterirler:

- Bulgusal metotlar oldukları için algoritmaları doğal olayların gözlenmesi ve optimizasyon ile ilişkilendirilmesi ile kurulmuştur. Örneğin, av arama (hunting search) metodunda; avcının avının çevresinde oluşturduğu kuşatma çemberini yavaşça daraltarak yakalama olgusu, ateşböceği algoritmasında (firefly algorithm); yanıp sönmeye özellikleri sayesinde ateşböceklerinin birbirlerine doğru hareket ederek sürü halinde hareket ederek verimli arama alanı oluşturmaları ve yapay arı kolonisi yönteminde ise akıllı bal arılarının yiyecek bulma sürecinde sürü içinde yaptıkları davranışlar olgusundan esinlenilmiştir.
- Stokastik optimizasyon yöntemleri, türev gibi arama işlemini lokal optimumda sonlandıracak matematiksel algoritmalarından kaçındıklarından, optimum çözümü yakalama güvenilirlikleri daha yüksektir.
- Tasarım değişkenlerinin sürekli olma zorunluluğu yoktur; ayrık tasarım değişkenleri ile çalıştırılabilirler. Özellikle bu husus yapılar açısından optimum çözümün pratik uygulanabilirliği açısından daha bir önem arz etmektedir.

Formülasyonları çelik ondulün gövdeli kirişler için oluşturulmuş yapısal optimizasyon problemlerinin çözümü ve en ekonomik tasarımları yeni optimizasyon teknikleri olan ve yapıya ilk uyarlamaları gerçekleştirilerek referans çalışma olarak av arama (Oftadeh vd. 2010) ve ateşböceği algoritması (Yang 2011) yöntemlerinin

adaptasyonu ile elde edilmiş ve bu şekilde aynı zamanda bu stokastik yöntemlerinin yapıya ilk uyarlamaları gerçekleştirilerek iki yöntemin minimum ağırlığının bulunması sürecinde sergilediği performanslar çözüm hızı ve optimum çözüme yakınsamadaki becerileri açısından kıyaslanmıştır.

### 2.1.1. Av arama yöntemi

Av arama (AA) yöntemi diğer metaheuristik yöntemlerde olduğu gibi doğadan ilham alınarak geliştirilmiştir. Doğada etobur olarak nitelendirilen hayvanlardan bazıları toplu halde avlanırlar. Kurt, yunus ve aslan örneklerinde olduğu gibi avlanma esnasında avlarının çevresini adım adım sarar ve meydana gelen çemberi yavaş yavaş daraltarak avlarını yakalarlar. Avın çemberin dışına çıkması durumunda pozisyonlarını güncelleyerek tekrar saldırırlar. Oftadeh, vd. doğadaki etobur grupların bu davranışlarından ilham alarak ve bu davranışları optimizasyon bileşenlerine benzeterek 2010 yılında av arama algoritmasını (AAA) geliştirmişlerdir. 2010 yılında yayınlanan bu çalışmada yeni algoritmanın bazı benchmark problemleri üzerinde denemeleri yapılarak av arama yönteminin hem optimum sonuca yakınsama hem de algoritmanın performansı açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Daha sonra av arama yöntemi mühendislik alanındaki birçok optimizasyon probleminin çözümünde kullanılmıştır (Oftadeh vd. 2010).

Kulluk (2013) AA yöntemini harmoni arama (HA) yöntemi ile birleştirerek elde ettiği hibrit algoritmayı yapay sinir ağlarının eğitimi için kullanmıştır. Geliştirilen algoritma benchmark problemleri üzerinde denenmiş ve elde edilen sonuçlar ve algoritmanın çözüm hızı açısından HA, AA, suni arı kolonisi (SAKA), genetik algoritmalar (GA<sub>s</sub>) gibi yaygın kullanılan optimizasyon teknikleriyle kıyaslanmıştır. Geliştirilen algoritmanın daha üstün bir performans sergilediği ortaya konulmuştur.

Agharghor ve Riffi (2015) yeni bir olasılıksal arama metodu olan AAA'nı popüler optimizasyon problemlerinden biri olan gezici satış temsilcisi probleminin üzerinde denemesini yapmıştır. Bu problemde birçok şehre gidecek olan gezici bir satış temsilcisinin en kısa yoldan tüm şehirleri nasıl ziyaret edeceği araştırılmaktadır. Araştırmacılar bahsi geçen problem üzerinde AAA'nda kullanılacak olan en uygun optimizasyon parametrelerini bulmuş ve bu optimizasyon yönteminin gezici satış temsilcisi problemini GA, Karınca Kolonisi Algoritması (KKA), Sürü Zekâsı yöntemi (SZ) ve HA yöntemlerinden daha kısa sürede çözdüğünü ve optimum sonuca daha çok yakınsadığını göstermiştir.

Turan (2016) nehir akış tahmini için bulanık sistem yöntemini kullanmıştır. Kullanılan bu yöntemin içerdiği parametrelerin tahmininde ateş böceği algoritması (ABA), AAA ve SAKA yöntemleri kullanılmıştır. Bu algoritmaların yakınsama hızları ve performansları kıyaslanmıştır. Sonuçlar SAKA'nın bu problem için daha üstün performans sergilediğini göstermiştir.

Erdal vd. (2017) ondülin gövdeli kompozit kirişlerin (OGKK) tasarımında AA yöntemini kullanarak bu algoritmanın yapı elemanı tasarımındaki ilk örneklerinden birini vermiştir. Minimum kiriş ağırlığının bulunması amaçlanan bu tasarım probleminden elde edilen sonuçların günümüz koşullarında uygulanabilirliği de düşünülerek problem ayrık değişkenli olarak ele alınmıştır. Matematiksel olarak oldukça basit olan bu algoritmanın

optimum boyutlandırma hesaplamada etkili olduğu gösterilmiştir.

Şeker vd. (2017) iki katlı ve dört katlı düzlemsel çelik çerçeve yapılarındaki farklı tiplerdeki kolon kiriş bağlantılarının optimum boyutlandırmalarını yapmak için SZ ve AA tekniklerini kullanmışlardır. Geliştirilen algoritmalarla yarı rijit ve rijit bağlantıların tasarımı yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapıldığında her iki algoritmadan alınan optimizasyon sonuçlarının birbirine yakın olduğu ifade edilmiş. Ancak SZ yönteminin optimum boyutlara ulaşmada daha hızlı sonuca ulaştığı gözlemlenmiştir.

Doğan vd. (2018) rijit ve yarı rijit bağlantılı üç farklı düzlemsel çerçeve sistemlerin optimum boyutlandırmasını AA yöntemi kullanarak gerçekleştirmiştir. Optimizasyon probleminden elde edilen tasarımın uygulanabilirliği de hesaba katılarak LRFD-AISC'den (Load and Resistance Factor Design, American Institute of Steel Construction) seçilmiş standart I kesitli çelik kirişler kullanılarak tasarım havuzu oluşturulmuş ve algoritma tasarım sürecince tasarım değişkenleri değerlerini bu havuzdan seçmiştir. Böylelikle algoritma içinde ayrık değişken sistemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmadan aynı çerçeve sistemi için rijit bağlantılı sistemin tasarımının yarı rijit bağlantılı çerçeve sisteme göre daha ağır olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca AA tekniğinin rijit ve yarı rijit çerçeve sistemler üzerinde etkili bir şekilde kullanılabilirliği de ortaya çıkmıştır.

Nayak vd. (2018) güç sisteminin optimizasyonu yapmak için AAA tekniğini tekrardan modifiye etmişlerdir. Problemi hem mevcut av arama tekniğiyle hem de kendi geliştirdikleri yeni algoritma ile çözüp sonuçları karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmanın sonucunda modifiye ettikleri AAA'nın daha iyi sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir.

### 2.1.2. Ateş böceği yöntemi

Ateş böceği algoritması (ABA) 2009 yılında Xin-She Yang tarafından doğadaki ateş böceklerinin aralarındaki sosyal ilişkiden esinlenilerek geliştirilen nümerik optimizasyon tekniklerinin alt kollarından biri olan olasılıksal optimizasyon tekniklerindedir. Doğada binlerce ateş böceği türü vardır. Her bir tür kendine özgü farklı miktarlarda ve farklı yanıp sönme ritminde ışık saçar. Bu canlıların ışık saçmalarının arkasında iki ana sebep vardır. Bunlardan birincisi üremek için karşı cins ateş böceğini, ikincisi ise potansiyel avlarını kendilerine çekmektir. Ateşböceği algoritmasında ise tüm ateş böcekleri eşeysiz olarak kabul edilmiştir. Bunların erkeklik ya da dişilikleri yoktur. Ateş böceklerinin cazibeleri parlaklıklarıyla, parlaklıkları ise amaç fonksiyonundan elde edilen değerlere göre belirlenir. Bir ateşböceği her iterasyonda etrafındaki en parlak ateş böceğine doğru rasgele hareket eder. Eğer ortamdaki en parlak ateş böceği kendisi ise rasgele bir yöne yine rasgele bir miktarda hareket eder. ABA oluşturulurken bu üç ana kural benimsenmiştir. Yang 2009 yılında yayınladığı makalede Michalewicz fonksiyonunu ABA tekniği, GA<sub>s</sub> ve SZ gibi optimizasyon algoritmalarıyla çözümlenerek geliştirdiği bu yeni algoritmanın global optimumu yakalamada ne denli üstün olduğunu göstermiştir (Yang, 2009). Bu algoritma inşaat mühendisliği alanında optimum boyutlandırma için birçok çalışmada kullanılmıştır.

Gandomi vd. (2011) ABA'nın inşaat mühendisliğindeki ilk uygulamalarından birini gerçekleştirmiştir. Çalışmada algoritma sürekli ve ayrık değişkenli olarak ayrı ayrı

ele alınan kaynaklı kiriş tasarımı, basınçlı tank tasarımı, sarmal basınç yayı tasarımı, betonarme kiriş tasarımı, kademeli ankastre kiriş tasarımı ve araba yandan çarpma tasarımı olmak üzere altı farklı klasik yapısal optimizasyon problemine uygulanmıştır. Algoritmanın yapısal optimizasyon problemlerinde uygulanabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca literatürdeki geçmiş çalışmalar da göz önüne alınarak ABA'nın SZA, GA<sub>s</sub>, benzetimli tavlama (BZ) ve HA yöntemlerinden daha etkin çalıştığı sonucuna varılmıştır.

Miguel ve Miguel (2012) dinamik sınırlayıcıları dikkate alarak kafes yapıların şekil ve boyut optimizasyonunda ABA ve HA tekniklerini kullanmıştır. Bu lineer olmayan dinamik optimizasyon probleminin yapının düğüm noktası koordinatları ve çubuk kesit alanları olmak üzere iki farklı tip tasarım değişkeni vardır. Sonuçlar göstermiştir ki, çalışılan dört tasarım örneğinin üçünde literatürdeki diğer çalışmalardan daha iyi sonuçlar alınmış kalan bir tanesinde de oldukça yakın bir tasarım elde edilmiştir.

Miguel vd. (2013) ABA kullanarak kafes sistemlerin boyut, şekil ve topoloji optimizasyonlarını yapmıştır. Kafes sistemin toplam ağırlığı amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Tasarım sınırlayıcıları gerilme, kinematik stabilite ve deplasman koşulları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Sonuçlar ABA'nın karmaşık değişkenli optimizasyon problemlerinin çözümü için uygun olduğunu göstermiştir.

Cheng ve Hoang (2015) şev stabilitesi probleminin çözümü için Swarm-Optimized Fuzzy Instance based Learning (SOFIL) yöntemini ve bu çözüm yönteminin içerdiği katsayıların tahmininde ABA'nı kullanmışlardır. Sonuç olarak geliştirdikleri algoritmanın en iyi şev stabilite tahminlerini verdiğini ileri sürmüşlerdir.

Chou vd. (2015) geosentetik desteklenmiş zemin yapılarının donatı gerilme yüklerinin tahmininde ABA'nı kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar geleneksel tahmin metodlarıyla ve on beş adet duvar vaka çalışmasından elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda geliştirilen yöntem ile yüksek doğrulukta alınan verilerin hata oranlarının %10'un altında olduğu gözlemlenmiştir.

Gandomi vd. (2015) mühendisler için tasarımı oldukça önemli olarak bilinen istinat duvarlarının tasarımı üzerine çalışmışlardır. Başlangıçta kendilerinden önce geliştirilmiş olan Hızlandırılmış Sürü Zekası Algoritması (HSZA), SZ, AB ve Guguk Kuşu Algoritması (GA) tekniklerinin iki farklı benchmark problemi üzerinde değerlendirilmiştir. Bu maksatla ACI-318-05 prosedürü de dikkate alınarak ve doğrulanmış algoritmalar kullanılarak istinat duvarlarının optimum boyutlandırma elde edilmiştir. Tüm algoritmalar değerlendirildiğinde GA yöntemi SZ yöntemi ile benzer sonuçlar vermiştir. ABA ise bu çalışma için diğer algoritmalara kıyasla daha kötü bir performans göstermiştir.

Gholizadeh (2015) çelik yapıların performansa dayalı optimum sismik tasarımlarını yapmak için modifiye edilmiş ABA ve yeni bir yapay sinir ağı kullanmıştır. Çalışmada üç, altı ve on iki katlı düzlemsel çelik çerçeve sistemleri birkaç performans seviyesi için AISC-LRFD ve FEMA şartnameleri de dikkate alınarak test edilmiştir. Nümerik sonuçlar yakınsama oranları ve minimum ağırlığa göre kıyaslandığında modifiye edilen ABA'nın klasik ABA'ya göre daha etkili olduğunu göstermiştir.

Gocic vd. (2015) su kaynaklarını daha iyi yönetebilmek ve tarım gibi alanlarda

daha etkin kullanımını sağlamak için evopatranspirasyon tahminlerini güçlendirmeyi amaçlamışlardır. Bunun için 1980-2010 yılları arasındaki verileri genetik programlama (GP), destek vektör makinesi-ateş böceği algoritması (DVM-ABA), yapay sinir ağları (YSA) ve destek vektör makinesi-dalgacık (DVM-D) ile analiz edilmiştir. Buna göre DVM-D ve DVM-ABA diğer yöntemlere göre daha yüksek korelasyon katsayısı vermiştir.

Chou and Ngo (2016) akıllı şebeke sistemlerinden toplanan tüketim verilerinin optimizasyona dayanan yapay öğrenme sistemi modellerini yapmışlardır. ABA'nın da kullanıldığı modellerden kayda değer doğrulukta veriler elde edilmiştir.

Hoang ve Pham (2016) şev stabilitesi probleminin çözümü için ABA'nın avantajlarıyla En Küçük Kareler Destek Vektörü Sınıflandırması (EKKDVS) yöntemini birleştirmiştir. 168 adet gerçek vaka verisi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmayla diğer değerlendirme yöntemlerine göre %4 daha doğru sınıflandırma yapılmıştır.

Miguel vd. (2016) titreşim kontrolünde kullanılan ayarlı kütle sönümleyici ve çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerinin optimum boyutlandırmalarını yapmışlardır. Bu iki sönümleyici türünün tasarımında ABA kullanılmıştır. Sonuçlar çoklu ayarlı kütle sönümleyicilerin kullanımının yapıdaki yatay deplasmanları yaklaşık %10 oranında düşürdüğünü ve klasik analitik tekniklerin nümerik teknikler kadar doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Souza vd. (2016) iletim hattı kule yapılarının boyut, şekil ve topoloji optimizasyonlarını yapmışlardır. Bunun için yapıları önceden belirlenmiş farklı topolojilerde iki ana modüle ayırmışlardır. Elde edilen optimum boyutlandırmanın uygulanabilir de olması da düşünülerek modüllerin temeli mevcut tasarımlara ve prototip testlerine dayanmaktadır. Optimizasyon sürecinde şekil ve boyut optimizasyonları topoloji optimizasyonu ile eş zamanlı olarak çalıştırılmıştır. İlk yapı sekiz farklı yükleme durumu altında optimize edilmiştir. İkinci yapıya ise kondüktör kablosunun kopma senaryosu ve rüzgâr yükü hipotezi uygulanmıştır. Bu çalışmada Geri İzleme En-İyileme Algoritması (GİEİA) ve ABA kullanılmıştır. GİEİA'nın kafes yapıların optimum boyutlandırmalarında ilk uygulamaları gerçekleştirilmiş ve bu algoritmanın ABA'dan daha iyi performans sergilediği ileri sürülmüştür.

Mejlej vd. (2017) değişken rijitlikteki kompozit malzemedan üretilmiş bir otomobil parçasının optimum boyutlandırmasında minimum ağırlık ve maksimum rijitliği amaç fonksiyonu olarak kullanmışlardır. Bu iki amaç fonksiyonuna sahip optimizasyon probleminde fiber göçmesi, matris çatlağı ve delaminasyon başlangıcı sınırlayıcı olarak kabul edilmiştir. Tüm algoritmalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında GA<sub>s</sub> ve ABA'nın ön plana çıktığı gözlemlenmiştir.

Pedro vd. (2017) çelik ve betondan oluşan kompozit I kesitli kirişin optimum boyutlandırmasını yapmışlardır. Minimum malzeme maliyetinin elde edilmesinin amaçlandığı bu optimizasyon probleminin çözümü için başlangıçta Geri İzleme Algoritması (GİA), ABA, GA<sub>s</sub>, Emperyalist Yarışmacı Algoritması (EYA) ve Grup Arama Algoritması (GAA) kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ise en iyi performans gösteren GİA algoritması Sonlu Elemanlar (SE) yöntemi ile güçlendirilerek tekrar çalıştırılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında yapı maliyeti %7,43 düşerken çalışmanın

ikinci kısmında bu değer %9,17'e kadar varmıştır.

Savkovic vd. (2017) tek girişli köprü vincinin ana giriş kutu kesiti tasarımını yapmak üzere Yarasa Algoritması (YA), Guguk Kuşu Algoritması (GKA) ve ABA'nı kullanmıştır. Giriş ağırlığını minimumda tutmak amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Dayanım kriteri, lokal plaka stabilitesi, giriş yanal stabilitesi, rijitlik ve dinamik rijitlik tasarım sınırlayıcılarını oluşturmuştur. Optimizasyon problemine birçok sınırlayıcı konulmasına rağmen algoritmalar düzgün bir şekilde çalışmışlardır. Optimum boyutlandırma için kullanılan tüm metotlardan elde edilen sonuçlarda malzemenin ve buna bağlı olarak maliyetten ciddi miktarlarda (%16-39) tasarruf elde edilebildiği görülmüştür. Diğer olasılığa dayalı arama algoritmaları arasından en etkili çalışan algoritma ABA olmuştur.

Chou ve Ngo (2017) çok boyutlu yapısal tasarım problemlerinin çözümünde daha etkin bir algoritma geliştirmek amacıyla mevcut ABA'nı geliştirmişlerdir. Modifiye edilen ABA'nın performansı bir seri benchmark problemi üzerinde değerlendirilmiş ve sonuçlar klasik ABA ve yaygın olarak kullanılan diğer optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Deneme sonuçları geliştirilen ABA'nın üç boyutlu yapısal optimizasyon problemleri üzerinde en iyi performansı sergilediğini göstermiştir.

Erdal (2017) gövde yüksekliği artırılmış çelik girişlerin optimum boyutlandırmasında ABA'nı kullanmıştır. Aynı ölü ve hareketli yükler altında ve aynı mesnet koşullarında 6 m'lik ve 10 m'lik sinüsoidal boşluklu, dairesel boşluklu ve petek boşluklu olmak üzere toplamda altı farklı giriş tipi ABA üzerinde test edilmiştir. Tasarım sınırlayıcıları için BS-5950 şartnamesindeki kıstaslar dikkate alınmıştır. Gövde yüksekliği artırılmış çelik giriş üretiminde kullanılacak olan standart I girişlerin kesiti, boşluk geometrisinin boyutları, toplam boşluk sayısı tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Optimizasyondan elde edilen tasarımlar karşılaştırıldığında ABA'nın sinüsoidal boşluklu girişlerin tasarımında hem optimum sonuca daha hızlı yakınsadığı hem de daha düşük ağırlıkta tasarımlar verdiği gözlemlenmiştir.

Acevedo vd. (2018) bir optimizasyon problemi olarak yapılarıdaki hasar tespitini ele almışlardır. Yapının dinamik karakterini belirlemek için Sonlu Elemanlar Analiz (SEA) yazılımı kullanılmıştır. Seçilen optimizasyon probleminin çözümü yapının hasar durumunu değerlendirmek için ABA kullanılmış ve hasar durumunun sistemin rijitliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar algoritmanın farklı hasar konfigürasyonları altında hasar bölgesini ve hasar oranını tespit edebildiğini göstermiştir.

Aydoğdu vd. (2018) piyasaya yönelik kullanılabilir olan optimum çatı aşığı tasarım yazılımı geliştirmişlerdir. Yazılımın içeriğinde ABA kullanılmıştır. Visual Basic programlama dilinde yazılım kodlanırken elde edilecek tasarımın uygulanabilir olması da düşünülerek TS498-1997 (Türk Standardı)'na uygun olarak tasarım sınırlayıcıları tanımlanmıştır. Tasarım havuzu ise yine aynı sebeple TS910'da tanımlanan profillerle oluşturulmuştur. Geliştirilen yazılım mevcut bir yapıya uygulandığında elde edilen gerçekçi sonuçlar yazılımın bu tarz yapılara rahatlıkla uygulanabileceğini göstermiştir.

Brajevic (2018) sınırlandırılmış mühendislik problemlerinin optimum çözümü için ABA'nı geliştirmiştir. Geliştirilen algoritma yirmi dört farklı benchmark problemine ve ayrıca yaygın kullanılan kaynaklı giriş, basınç tankı, basınç ve gerilmedeki yay, hız

düşürücü, sarmal yay, betonarme kiriş, ankastre kiriş, dişli takımı ve üç çubuklu kafes gibi dokuz farklı mühendislik problemine uygulanmıştır. Tüm deneme sonuçları geliştirilen algoritmanın mevcut ABA'ndan daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Frans vd. (2018) yaptıkları çalışmada 7 m yüksekliğe sahip bir istinat duvarının 4 farklı dış yük altında optimum boyutlandırma için ABA kullanılmıştır. Çalışmada istinat duvarının devrilme dengesi, kayma dengesi ve duvarın altındaki toprağın yük taşıma kapasitesi dikkate alınmıştır. Optimum boyutlandırmalar incelendiğinde 5 kN/m<sup>2</sup> ve 10 kN/m<sup>2</sup>'lik yükler altında istinat duvarının dikdörtgen 20 kN/m<sup>2</sup> ve 40 kN/m<sup>2</sup> yükler altında ise yamuk kesitli olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ABA'nın istinat duvarlarının optimum boyutlandırmaında başarılı bir şekilde çalışmıştır.

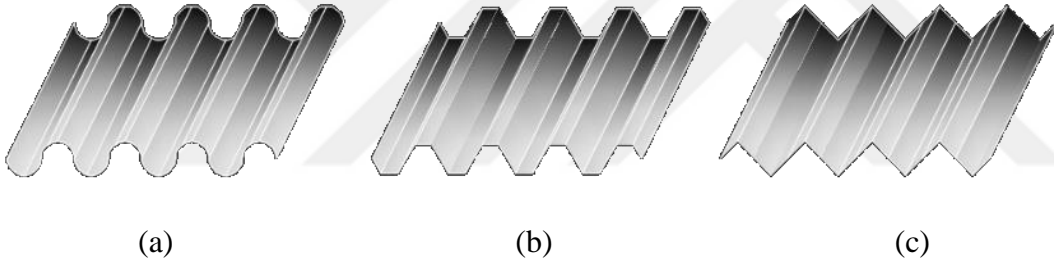
Vaez ve Qomi (2018) betonarme perde duvarın donatı tasarımı ve ağırlık optimizasyonunu yapmışlardır. Problem tanımlanırken amaç fonksiyonu donatı dağılımı ve duvar boyutlarına bağlı olan duvarın maliyetini minimize edecek şekilde alınmıştır. Tasarım değişkenleri ayrık değişken ve sürekli değişken olarak iki farklı şekilde de incelenmiştir. Optimum boyutlandırılmış perde duvarın sağlaması gereken şartlar ve sınırlayıcılar için ACI-31811 şartnamesi dikkate alınmıştır. Problem ABA, SZ, Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) ve Karga Arama Algoritması (KAA) kullanılarak ayrı ayrı çözülmüştür. Problem sürekli değişkenli olarak ele alındığında %5 daha ekonomik bir tasarım elde edildiği ileri sürülmüştür.

Wahid vd. (2019) akıllı binalardaki enerji verimliliği için ABA'nı GA'dan faydalanarak geliştirmişlerdir. Öne sürülen yeni algoritma ABA, GA, SAKA ve KKA ile akıllı binalarda enerji tüketim optimizasyonu ve kullanıcı konfor yönetimi problemleri üzerinde sıcaklık, ışık, hava kalitesi, minimum toplam enerji tüketimi ve maksimum kullanıcı konforu açısından test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde denemesi yapılan tüm algoritmalarla ciddi oranda enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür. ABA ve GA'nın birleştirilmesiyle geliştirilen yeni algoritmanın klasik tüm yöntemlerden daha iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

## 2.2. Ondülin Gövdeli Kirişler

Çelik yapı tasarımlarında yapının güvenliğinin yanında maliyeti de büyük önem arz etmektedir. Tasarımcılar tarafından özellikle geniş açıklıklı yapılarda mümkün mertebede kiriş ağırlıkları azaltılmak ve buna karşılık ihtiyaç duyulan taşıma gücünün sağlanması için kiriş rijitlikleri artırılmak istenmektedir. Bu durumda akla ilk gelen çözüm çelik yapılarda kullanılan I kesitli kirişlerin yüksekliklerini artırarak kiriş atalet momentlerini yükseltmek ve buna bağlı olarak çelik kirişlerin mukavemet/ağırlık oranını en üst seviyede tutmaktır. Bu durumda da aşırı yüklerden dolayı ince ve düz gövdelerde oluşacak basınç gerilmeleri kirişin stabilitesinin kaybolmasına ve büyük deformasyonlara neden olur. Çelik kirişlerin genel çalışma prensiplerine bakıldığında kiriş başlıklarının kiriş eksenine boyunca oluşan normal kuvveti, kiriş gövdesinin ise kiriş boyunca yük aktarımını sağlamak amacıyla kiriş içinde oluşan kesme kuvvetlerini taşıdığı kabul edilir. Kiriş yüksekliği artırıldığında gövde narinleşerek aktarmakla yükümlü olduğu kesme kuvvetleri aktaramaz duruma gelmektedir. Bu da kesme kuvvetlerinin etkisinde burkulmalara ve buna bağlı olarak yük taşıma kapasitesine ulaşmadan ani göçmelere sebep olmaktadır. Tasarım mühendisleri bu durumun engellenmesi için farklı yollar

denemişlerdir. Bunların arasından en yaygın kabul gören teknik I kesitli çelik kiriş gövdelerinin belirli aralıklarla berkitme levhalarıyla güçlendirilmesidir. Berkitme levhalarıyla güçlendirmek kirişin global stabilitesi açısından güzel sonuçlar vermiştir. Fakat bu durumda da berkitme levhaları kiriş gövdesini yalnızca belirli noktalardan desteklemesi kiriş gövdesinde oluşan lokal burkulmaları engellemede yetersiz kalmıştır. Kiriş gövdesini güçlendirmek için izlenebilecek bir diğer yol ise gövdenin ondülin forma sokulmasıdır. Aynı malzemeden imal edilen iki çelik levhanın arasına dik bir şekilde dalgalı ince bir levhanın yerleştirilmesi şeklinde tasarlanan Ondülin Gövdeli Kirişler (OGK) gövdenin kiriş güçlendirilmesini sağlayarak stabilite kaybına ve büyük deformasyonlara engel olurken, uygulanan yük kombinasyonları altında kirişin plastik limit noktasına gelmeden rijitlik kaybına bağlı burkulmasını engelleyerek kesme kuvvetine ve yerel etkilere karşı kirişin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Kiriş gövdesinin dalgalı yapısı ile kiriş yük taşıma kapasitesinin artması ve öz ağırlığının azalması sağlanmış ve böylece kiriş maliyetleri düşürülmüştür. Gelişmiş ülkelerde son yıllarda etkin bir şekilde kullanılmaya başlanan bu kirişler ülkemizde yaygın olarak tercih edilen uzay kafes ve makas sistemlere alternatif olarak geniş açıklıklarda, kat kirişleri olarak döşemelerde ekonomik bir çözüm olarak kullanılabilirler. Ondülin gövdeli kirişlerde dalgalı gövde yapısı araştırmacılar tarafından farklı geometrilere incelenmiştir. Bunlardan en öne çıkanlar trapezoidal, sinüsoidal ve zigzag gövde formdaki kirişlerdir. (Şekil 2.1)

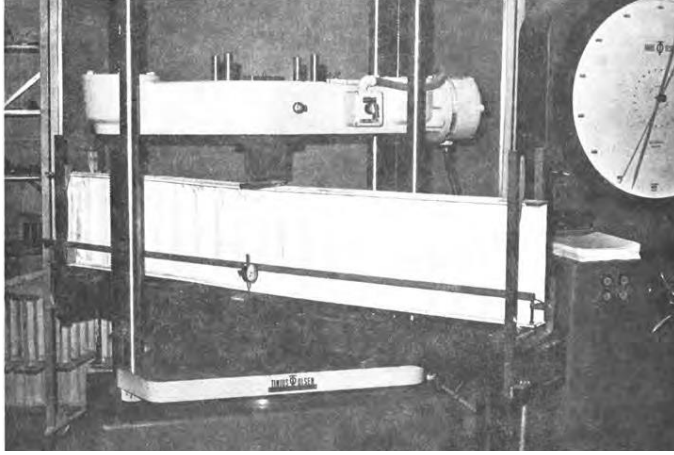


**Şekil 2.1. a) Sinüsoidal; b) Trapezoidal; c) Zigzag gövde yapısı**

### 2.2.1. Trapezoidal gövdeli kirişler

Ondülin gövdeli kirişlerin ilk örneklerinden biri olan Trapezoidal Gövdeli Kirişler (TGK) trapezoidal formdaki ince bir levhanın kiriş gövdesi olarak kabul edilip kiriş başlığı görevi gören iki levha arasına dik bir şekilde konumlandırılarak tasarlanmıştır. İlgili literatür incelendiğinde TGK ile ilgili ilk çalışmaların 1960'larda NASA tarafından yapıldığı görülmektedir (Sherman ve Fisher 1971). Devamında TGK'ler hakkında mevcut birçok bilimsel çalışma göze çarpmaktadır.

Sherman ve Fisher (1971) tarafından yapılan deneysek çalışmada statik yükler altındaki TGK'lerin kiriş gövde-başlık bağlantıları için kullanılan kaynağın uzunluğunu en aza indirmek planlanmıştır. Bu amaçla üç farklı gövde et kalınlığına sahip numunelerle 25 test yapılmıştır. Sonuçlar gövde-başlık birleşim bölgelerinde sadece kiriş eksenine paralel olan kaynakların gerekli olduğunu ve diyagonal kaynakların kirişin mukavemeti ve rijitliği üzerinde çok az ya da hiç etki etmediğini göstermiştir. Çalışmada kullanılan test düzeni Şekil 2.2'de verilmiştir.

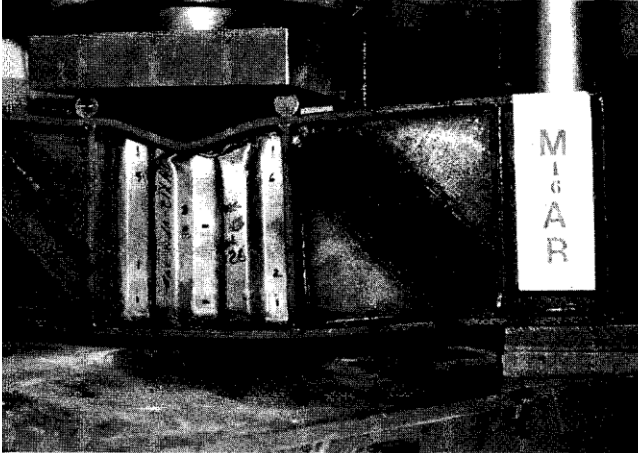


**Şekil 2.2.** Sherman ve Fisher (1971) test düzeni

Linder ve Huang (1994) dış yükler altındaki TGK'in nihai limit durumunda kiriş başlıklarında ek çarpılma gerilmelerinin ortaya çıktığını ileri sürmüştür. Kirişin basınca çalışan başlığında burkulmaya sebep olan bu durumun giderilmesi için farklı burkulma katsayılarının hesaba katılması gerektiğini belirtmiştir. Çalışmada kiriş başlıklarında oluşan normal kuvvetin trapezoid formdaki gövdenin etkisiyle başlık kesiti boyunca düzgün dağılmadığına ve ayrıca bu durumun kirişin geometrisine bağlı olarak da değişiklik gösterdiğine vurgu yapılmıştır.

Elgaaly vd. (1996) bir dizi TGK testi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testlerin sonucunda tüm kirişlerin gövde burkulmasından kaynaklı göçtüğü gözlemlenmiştir. Deneyleri yapılan tüm kirişlerin ABAQUS yazılımı kullanılarak SEA'leri yapılmıştır. Analizlerden oldukça tatmin edici sonuçlar almışlardır. Burkulma gerilmesi denklemiyle kiriş gövdesinin maruz kaldığı kesme kuvvetinin yüksek doğrulukta hesaplanabildiğini göstermişlerdir. Ayrıca burkulma gerilmesi akma gerilmesinin %80'inden büyük olduğu durumlarda, inelastik burkulma gerilmesinin (inelastik burkulma gerilmesinin verdikleri yarı ampirik denklemle hesaplandığında) gövdenin akma gerilmesini geçmemesi gerektiğini ileri sürmüşlerdir.

Elgaaly, Seshadri ve Hamilton (1997) TGK'leri iki noktadan yükleyerek saf eğilme etkisindeki performanslarını incelemişlerdir. Kiriş başlıkları akma gerilmesine ulaştıktan sonra basınç etkisindeki kiriş başlığı dikey olarak burkulmasıyla göçme meydana gelmiştir. Sonuçlar kiriş gövdesinin trapezoid yapısının kirişin moment taşıma kapasitesine dikkate değer bir katkısının olmadığını göstermiştir. Tüm deneylerin SE modelleri oluşturulmuş ve yapılan analizlerden testlerle yüksek doğrulukta uyuşan sonuçlar alınmıştır. Çalışmada uygulanan test düzeni Şekil 2.3'te verilmiştir.



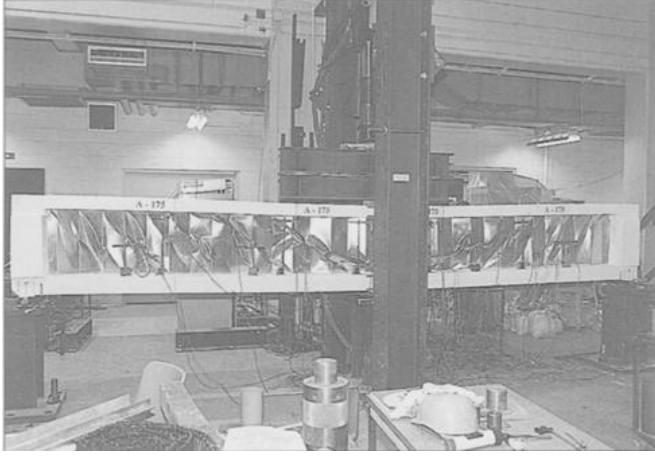
Şekil 2.3. Elgaaly ve Hamilton (1997) test düzeni

Elgaaly ve Seshadri (1997) tarafından 5 farklı çizgisel ve bölgesel tipteki yükleme 4 farklı profil üzerinde test edilmiştir. Yapılan testlerin SEA'leri de yapılarak sonuçlar kıyaslanmıştır. Örtüşen tüm bu sonuçlar dikkate alınarak TGK'ler için basit bir tasarım denklemi geliştirilmiştir.

Elgaaly ve Seshadri (1998) TGK'leri SEA yazılımında ince kabuk eleman olarak modellemişlerdir. Modeller kesme, düzgün eğilme ve bölgesel basınç yüklemesi altında incelenmiştir. Hem deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar hem de SEA'lerinden alınan sonuçlar incelenmiştir. SEA'nden elde edilen göçme modu ve hesaplanan nihai yük taşıma kapasitesi sonuçları test sonuçlarına iyi derecede uyum göstermiştir.

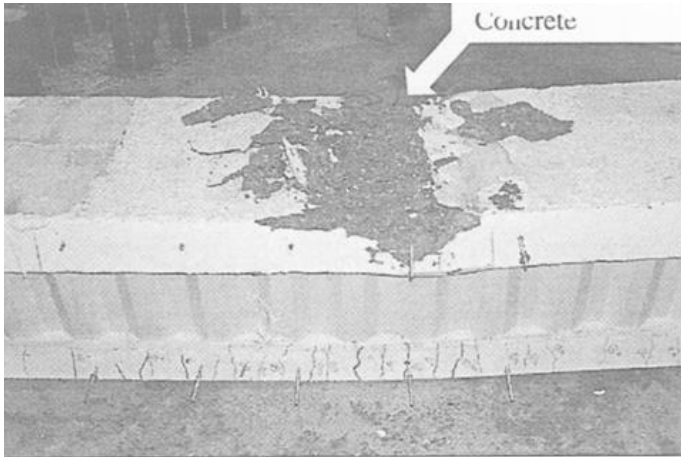
Machindamrong (2003) yükleme durumunda Trapezoidal Gövdeli Kompozit Kirişlerde (TGKK) oluşan kesme kuvveti ve deplasmanların tahmininde kullanılmak üzere diferansiyel denklemler sunmuştur. Teorik hesaplamaların ardından bahsi geçen kirişlerin SEA'leri de yapılarak sonuçlar kıyaslanmıştır. Bu şekilde TGKK'ler için sunulan denklemlerin doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Metwally ve Loow (2003) farklı gövde formlarına sahip öngermeli kompozit I kirişlerin kesme ve eğilme davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir (Şekil 2.4). Deneysel sonuçlarla desteklenen analitik çalışmalar ondülin gövde yapısının yüksek kesme kuvveti dayanımı ve düşük malzeme kullanımı için seçilebileceğini göstermiştir. Gövde büküm açısının ise ihmal edilebilir seviyelerde kirişin davranışına etki ettiğini ortaya konulmuştur.



**Şekil 2.4.** Metwally ve Loow (2003) test düzeni

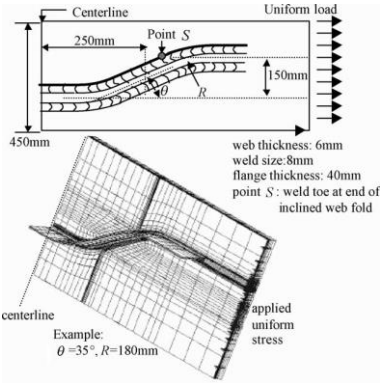
Mo vd. (2003) trapez gövdeli kompozit kutu köprü kirişlerinin deneysel ve analitik çalışmalarından elde ettikleri verileri yayınlamışlardır. 4 adet numune üzerinde yapılan çalışmada histeresis çevrimi, süneklik faktörü, harcanan enerji, göçme modu gibi parametreler incelenmiştir. Yapılan tüm testlerde öngermeli kompozit kirişler açıklık ortasından betonun ezilmesinden dolayı göçtüğü gözlemlenmiştir (Şekil 2.5). Deneysel çalışmadan elde edilen süneklik faktörünün 4,70-5,19 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Kirişlerin sismik performansları yeterli bulunmuştur. Son olarak da bu tarz kirişler için geliştirilen analitik modelden yola çıkılarak yapılan tahminlerin deney sonuçlarıyla örtüştüğü tespit edilmiştir.



**Şekil 2.5.** Mo vd. (2003) kompozit kutu kirişin göçme durumu

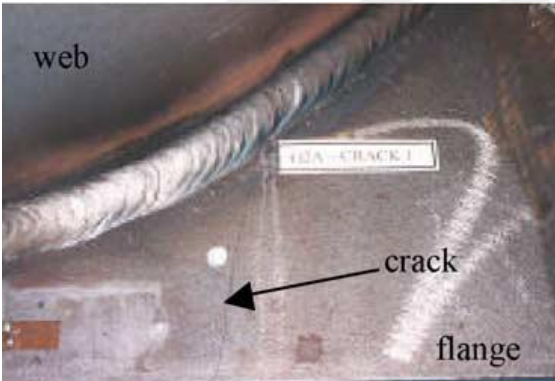
Anami ve Sause (2005) SEA ve çatlak ilerleme analizi ile TGK'lerin başlık-gövde birleşimindeki kaynağın yorulma dayanımı incelemiştir. Kirişlerin kaynak bölgelerinin en çok Şekil 2.6'da verilen S noktasından zorlandığı ve göçmenin bu noktadan başladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kaynak bölgesinin yorulma dayanımını

tahmin etmek için basit bir metot geliştirmişlerdir.



Şekil 2.6. Anami ve Sause (2005) TGK birleşiminin SE modeli

Anami vd. (2005) gövde oluk geometrisi ve başlık geometrisinin kaynak gerilmeleri üzerindeki etkisini hem büyük ölçekli deney numuneleri üzerinde yapılan testlerle hem de analitik olarak incelemiştir. Çalışmada kiriş üzerinde sabit eğilme momentinin etkidiği bölge araştırılmıştır. Kaynaklı bölgede kıvrımlar boyunca birçok çatlak oluşmuştur (Şekil 2.7). Parametrik SEA göstermiştir ki gövdedeki trapezoidal formun açısı ve büküm noktalarının eğriliği kaynak üzerindeki gerilme dağılımına en çok etki eden parametrelerdir.



Şekil 2.7. Anami vd. (2005) kaynak bölgesinde oluşan çatlak

Gil vd. (2005) köprülerde kullanılacak olan TGK'lerin kesme kuvvetlerinden kaynaklanan burkulmaya karşı mukavemetini incelemiştir. Bu amaçla dış yükler altında elastik ve plastik durumlarda lokal, global ve interaktif burkulma davranışlarını gösterecek şekilde kiriş tasarımları yapılmıştır. Tasarlanan bu kirişlerin testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). Geometrik parametrelerin kiriş üzerinde kesme kuvvetlerinden kaynaklı burkulmaya etkisi de ayrıca incelenmiştir. Test sonuçlarını desteklemek üzere lineer olmayan geometri ve malzeme tanımları kullanılarak burkulma analizleri yapılmıştır. Tüm sonuçlar verilen 3 farklı kesme kuvvetlerinden kaynaklanan burkulma denklemlerinin doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir.



**Şekil 2.8.** Gil vd. (2005) kiriş numunesinin deformasyonu

Sayed Ahmet (2005) TGK'lerin göçme modlarından biri olan yanal burulmalı burkulma durumunu incelemiştir. Yanal stabiliteyi bozacak kritik moment kapasiteleri SEA ile nümerik olarak belirlenmiştir. Standart I profillerinin hesabında kullanılan bazı denklemlerin TGK'ler için de kullanılabilir olup olmadığı incelenmiştir. Sonuç olarak TGK'lerin yanal burulmalı burkulmaya karşı dirençlerinin standart I kesitli kirişlere nazaran %12-37 daha fazla olduğu görülmüş ve standart kirişlerin kritik moment hesabında kullanılan denklemlerin TGK için düşük sonuçlar verdiği ileri sürülmüştür.

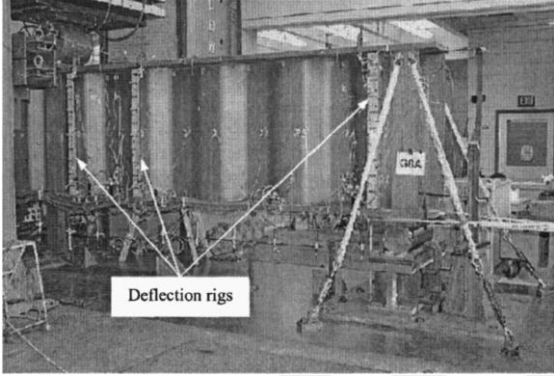
Dabon ve Elamary (2006) kiriş başlığının burkulmaya karşı narinliğinin TGK'lerin davranışına etkisini deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Deney için hazırlanan numune serisi düz / ondulün gövdeli ve yarı kompakt / kompakt olmak üzere 4 farklı basit kirişten oluşmaktadır. Parametrik çalışma yapmak ve yapılan testleri simüle etmek için SEA yapılmıştır. Başlık berkitmesinin kalınlığı, genişliği ve başlık kalınlığı parametrik çalışmada tasarım değişkenleri olarak alınmışlardır. Kompakt olmayan kirişlerde TGK'lerin aynı narinlikteki düz gövdeli kirişlere göre kapasitelerinin %38 daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 2.9).



**Şekil 2.9.** Dabon ve Elamary (2006) TGK göçme durumu

Driver vd. (2006) literatürde o zamana kadar köprü yapılarında kullanılanlara kıyasla ufak boyutlardaki deney numuneleri ile çalışıldığını ve buna bağlı olarak

geometrik kusurların OGK'ler üzerinde ne denli etkili olduğunun net olarak ortaya konulmadığını ileri sürmüştür. Bu eksikliği gidermek için 1500 mm yüksekliğinde 2 adet TKG tasarlanmıştır. Tasarlanan bu numunelerin üretimleri ve testleri yapılmıştır (Şekil 2.10). İlk numunede kesme gerilmesi akma gerilmesinin %91'ine ikincisinde %85'ine ulaştığında aniden gövde burkulması sebebiyle göçmüştür. Eğilmenin kirişin kesme dayanımı üzerinde neredeyse hiçbir etkisinin olmadığı görülmüştür. Testleri yapılan TKG'lerin SEA'leri de yapıldığında makul sonuçlar elde edilmiştir. SEA ve deneysel veriler değerlendirildiğinde kesme dayanımının geometrik kusurlar karşısında oldukça hassas olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.10. Driver vd. (2006) deney düzeni

Ibrahim vd. (2006) berkitme levhalarının çelik kirişlerin yorulma ömrünü kısalttığını belirterek TKG'lerin bu konudaki performanslarını farklı gerilim aralıklarında araştırmıştır. Deneysel numuneleri kirişin gövde ve çekme başlığını birbirine bağlayan kaynak birleşiminde başlayan yorulma çatlakları sebebiyle göçmüştür (Şekil 2.11). Çelik kiriş gövdesini trapezoid forma sokmanın uzun yorulma ömrü sağlamada etkili bir yol olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.11. Sherif vd. (2006) yorulma çatlakları

Ibrahim vd. (2006b) tekrarlı yükler altında testleri yapılan TGK'lerin SEA'lerini yapmışlardır. Testlerden elde edilen verilerle uyumlu olan sonuçlar TGK'lerin tekrarlı yükler altında da SEA'nin yapılabildiğini göstermiştir. Daha önceki deneysel çalışmada (Sherif vd. 2006) da görüldüğü üzere gerilme yığılması trapezoid gövdenin katlama çizgisinin dibinde oluşmuştur. Çekmeye çalışan başlıktaki normal gerilme başlığın taşıyabileceği en yüksek değere katlama çizgisinin kıvrımının bittiği yerde ulaşmıştır. Bu durum gerilme yığılmasının kirişin lokal olarak çekme başlığında meydana gelmesinde ana etmen olarak açıklanmıştır.

Abbas vd. (2007) klasik çelik I kirişler için geliştirilen teorilerin yalnız başına TGK için yetersiz kaldığını savunarak düzlem içi yükler altında TGK'lerin başlık eğilme transferlerini araştırmıştır. Bu kapsamda daha önceki çalışmalarda testleri yapılan TGK'lerin SEA'leri yapılmıştır. Düzlem içi yükler altında TGK'lerin başlık eğilme transferlerini hesaplamak için teorik bir yöntem olarak fiktif yük metodu verilmiştir. Teoriden elde edilen sonuçları doğrulamak için deneysel veriler kullanılmıştır. Özellikle kirişin sabit kesme kuvvetlerine çalıştığı bölgelerinde teorik sonuçlarla uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Teorik ve deneysel verilerin karşılaştırmasından elde edilen sonuçları desteklemek için deneyi yapılan kiriş numunelerinin SEA'leri de yapılarak sonuçlar hem teorik hem de deneysel verilerle kıyaslanmıştır.

Tahir vd. (2008) yarı rijit bağlantı kullanılarak birleştirilmiş tam ölçekli TGK'lerin yapısal davranışını incelemişlerdir. Çalışmada yarı rijit bağlantılar tasarlanırken EC3 (Eurocode) şartnamesindeki kıstaslar göz önüne alınmıştır. TGK'ler üretilirken kiriş başlıkları için S355 trapezoid formlu gövde için ise S275 sınıfı çelik malzeme kullanılmıştır. Testleri yapılan her iki numunede de göçme kiriş açıklığının ortasında kiriş başlığının burkulmasıyla meydana gelmiştir (Şekil 2.12). Bu durum bağlantı noktalarında herhangi bir göçme modu gerçekleşmeden önce gözlemlenmiştir.



**Şekil 2.12.** Tahir vd. (2008) birleşim bölgesi deformasyonu

Yi vd. (2008) TGK'lerin kesme kuvvetlerinden kaynaklanan burkulma durumlarını etkileşimli kesme burkulması, global burkulma ve lokal burkulma olmak üzere üç ana başlık altında tanımlamışlardır. Çalışmalarında bir seri SEA'leri yapılarak geometrik parametrelerin etkileşimli kesme burkulması üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelemenin ardından sonuçlar değerlendirilerek TGK'lerin etkileşimli kesme burkulması dayanımını veren bir denklem sunulmuştur.

Denan vd. (2009) TGK'lerin majör ( $I_x$ ) ve minör ( $I_y$ ) atalet momentlerinin hesabı üzerine çalışmışlardır. Bu kapsamda 24 adet kiriş numunesi elastik eğilme altında incelenmiştir (Şekil 2.13). Sonuçlar minör atalet momentinin TGK'lerde standart düz gövdeli I kesitli kirişlere göre %1,28 ile %6,57 arasında daha fazla olduğunu ve buna karşılık majör atalet momentinin %11,5 ile %16,54 arasında daha düşük olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.13. Denan, Saad ve Osman (2009) majör ekseninde elastik eğilme testi

Moon vd. (2009) TGK'lerin kesme mukavemetine dayalı tasarımı üzerine çalışmışlardır. Öncelikle global kesme burkulması denklemlerini denklem içi katsayılarını bulmak için tekrardan gözden geçirilmiştir. Etkileşimli kesme burkulması ve oluklu gövdelerin kesme burkulması parametreleri birinci dereceden etkileşimli kesme burkulması denklemlerine dayanılarak bulunmuştur. Elastik olmayan burkulma dayanımı kesmeli burkulma parametrelerinden elde edilen burkulma eğrisi vasıtasıyla belirlenmiştir. Tasarım denklemlerini tahkik etmek üzere bir seri test gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.14). Deneylelerden elde edilen veriler ile geliştirilen denklemlerin uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.14. Moon vd. (2009) gövde burkulma durumu

Nguyen vd (2010) düzgün dağılımlı moment etkisindeki TGK'lerin yanal

burkulmalı burulma mukavemetleri hesaplamışlardır. Nümerik denklemler ve metodlar kullanarak çarpılma katsayısı ve kesme merkezinin yeri hesaplanmıştır. Daha sonra sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalardakilerle kıyaslanmıştır. Farklı boyutlardaki gövde formuna sahip ve farklı açıklıklardaki bir seri TGK'in SEA'leri yapılarak geliştirilen denklemler doğrulanmıştır. Ayrıca ondülün gövde yapısının yanal burkulmalı burulma açısından çelik kirişin davranışına etkisi de incelenmiştir.

Baser vd. (2011) çelik TGK üzerine betonarme döşeme de koyarak TGKK'ler tasarlamışlardır. Tasarımı yapılan bu kirişlerin SEA'leri yapılarak nihai yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Kiriş gövde narinliği, gövde paneli boy oranı, ondülün formun derinlik oranı ve gövde boşluğu boyutu gibi parametreler incelenmiştir. SEA'lerinden göçme mekanizması ve yük deplasman eğrisi incelenerek TGK'lerin kesme yükü taşıma kapasitelerinin hesabı için yaklaşık bir yöntem sunulmuştur.

Kim vd. (2011) 24 farklı KTGK'in sonlu elemanlar yöntemiyle yaptıkları analizlerini değerlendirerek akerdeon etkisinin tahmini için basit bir yaklaşım sunmuştur. Buna ek olarak ön germeli KTGK'lerin eğilme davranışları irdelenmiştir.

Kim ve Lee (2011) bir önceki çalışmada (Kim vd. 2011) geliştirilen KTGK'lerin öngermeli ve öngermesiz olarak tam ölçekte testlerini yapmışlardır (Şekil 2.15). Test sonuçları beton kullanılarak kompozit forma getirilmemiş çelik kirişlerde akerdeon etkisiyle kiriş alt ve üst başlığında ön gerilmeler önemli ölçüde artmıştır. Betonun da kullanımıyla kompozit hale getirilen kirişlerin eğilme mukavemetleri ve rijitliklerine bakıldığında öngermesizlere nazaran üstün performans sergilemişlerdir. Tendonlardaki gerilmeler de dahil olmak üzere SEA ve test sonuçlarının birbirlerini yakaladıkları gözlemlenmiştir.



**Şekil 2.15.** Kim ve Lee (2011) yatay kesme göçmesi durumu

Sause ve Braxtan (2011) TGK'lerin kesme kapasitelerinin tahmininde kullanılmak üzere kendilerinden önce geliştirilen denklemleri derlemişlerdir. Ayrıca konuyla ilgili 100'den fazla test de bu kapsamda incelenmiştir. Geçmiş çalışmalarda TGK'lerin kesme kapasitelerinin hesabı için sunulan 3 farklı denklem, kendi geliştirdikleri denklem ile 22 deneysel veri üzerinden değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Mevcut literatürde yer alan denklemlerin deney sonuçlarıyla uyumadığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık TGK'lerin kesme dayanımının tahmini için

bahsi geçen çalışmada geliştirilen denklemin daha doğru tahmin sonuçları verdiği ileri sürülmüştür.

Kövesdi vd. (2012a) bazı köprü yapılarındaki kirişlerin karmaşık dağılımlı moment, kesme kuvveti ve normal kuvvet gibi yüklere maruz kalmasını dikkate alarak TGK'lerin bahsi geçen yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Büyük ölçüde 12 adet kiriş numunesinin eğilme momenti ve kısmi yükleme altında hem nümerik hem de deneysel çalışması yapılmış ve sonuçlar doğrulanmıştır (Şekil 2.16). Sonuçlar değerlendirilerek TGK'ler için etkileşim denklemi yazılmıştır. Bu denklem literatürde konuyla ilgili diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen denklemlerle beraber incelenmiş ve hangi durumlar için hangi denklemin kullanılmasının daha uygun olduğuna dair bilgiler verilmiştir.



**Şekil 2.16.** Kövesdi vd. (2012a) test düzeni

Kövesdi vd. (2012b) TGK'lerin başlıklarındaki gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. TGK gövdesinin oluklu yapısından dolayı eğilme momentlerini aktarırken kiriş başlıklarında ek normal gerilme dağılımları oluşturur. Bu gerilmeler kiriş gövdesinin geometrisiyle doğrudan ilgilidir. Oluşan ek normal gerilmeler kirişin yük taşıma kapasitesini etkilediği için oldukça önemlidir. Çalışmada deneysel verilere dayanarak TGK'in SEA yapılmıştır. Bu kirişlerin moment taşıma kapasitelerinin hesabına yönelik bazı katsayılar verilmiş ve TGK'lerin taşıyabileceği yalın eğilme momenti hesaplanırken kiriş gövde etkisinin ihmal edilebileceği gözlemlenmiştir.

Abraham (2013) TGK'lerin yanal burkulmalı burulma davranışlarından kaçınmak için ekonomik bir çözüm olan beton dolgulu TGK'leri davranış ve göçme modu açısından incelemiştir. Trapezoid formdaki gövdenin etkisini incelemek için düz gövdeli ve trapezoid gövdeli beton dolgulu kirişler tasarlanmış ve bu kirişlerin iki noktadan yükleme altında testleri yapılmıştır (Şekil 2.17). Yük taşıma kapasitesi açısından sonuçlar karşılaştırıldığında beton dolgulu kirişlerde gövdenin 150 mm derinlikli trapezoid formda tasarlanmasının sonuçları olumlu yönde %20-25 oranında etkilediği, 200 mm derinlikte tasarlanmasının ise yaklaşık %100 etkilediği gözlemlenmiştir. Maksimum deformasyonda ise trapezoid gövde kullanımının sonuçları %4-8 oranında azalttığı belirlenmiştir.



**Şekil 2.17.** Abraham (2013) beton dolgulu kiriş testi

Arunkumar vd. (2013) soğuk şekillendirilmiş dudaklı 1'i düz ve 4'ü trapezoid formdaki gövdelere sahip olmak üzere toplamda 5 adet çelik kirişin iki noktasal yük altında deneysel çalışmasını yaptıktan sonra (Şekil 2.18) SE yazılımı kullanarak bu deneyleri simüle etmişlerdir. Sonuçlar TGK'lerin eğilme kapasitesinin standart kirişlere nazaran daha yüksek olduğunu ve çelik kiriş gövdesinde kesme gerilmelerinden kaynaklı meydana gelen göçmelerin gövdenin trapezoid forma getirilmesiyle giderilebileceğini göstermiştir.

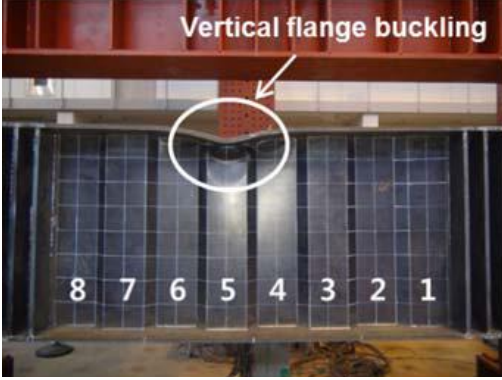


**Şekil 2.18.** Arunkumar, Sampathkumar ve Sukumar (2013) TGK göçme durumu

Hering vd. (2013) geniş açıklıkları geçmek için kullanılması planlanan çelik kirişlerde farklı gövde formlarının etkisini araştırmak üzere berkitmeli standart çelik kirişlerle TGK'leri karşılaştırmışlardır. TGK'lerin yük taşıma kapasitesi maliyet oranına bakıldığında yapı içerisinde berkitmeli kirişlere göre daha iyi performans sergilediği sonucuna varılmıştır.

Lho vd. (2014) çok narin gövdeli TGK'lerin eğilme kapasitelerini ve eğrilik limitlerini araştırmak için tam ölçekli numunelerle deneyler yapmıştır (Şekil 2.19). Tüm numuneler başlığın akma değerinin ulaşmasının ardından düşey yönde burkulması sonucu meydana gelmiştir. Yapılan tüm deneylerin SE yazılımı kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları baz alınarak modifiye edilmiş maksimum narinlik

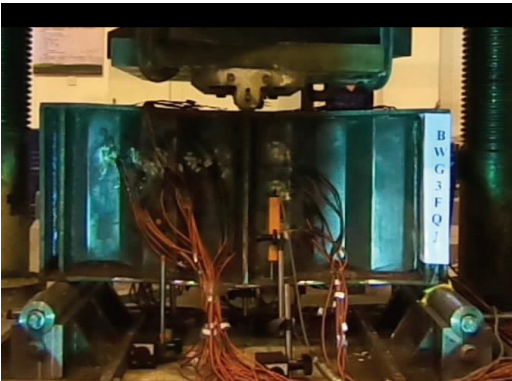
oranı limiti önerilmiştir. Deney sonuçlarıyla da eşleşen nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar yardımıyla maksimum gövde narinlik oranı limiti standart düz gövdeli kirişlerinkine göre 1,65-2,35 defa daha fazla olabileceği görüşüne varılmıştır.



Şekil 2.19. Lho vd. (2014) düşey gövde burkulması

Shanmugam vd. (2014) yatay eğrilikli kompozit kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesi üzerine çalışmış ve nihai kesme mukavemetlerinin tahmini için bir teknik önermişlerdir. Çalışmada kiriş yatay eğriliği, betonarme döşeme ile çelik kirişin beraber çalışabilirliği, gövde boşlukları ve gövdenin ondülin formu gibi parametreler dikkate alınmıştır. Önerilen metodun doğruluğu SEA'leri vasıtasıyla değerlendirilmiş ve TGKK'lerin kesme mukavemetlerinin tahmininde kabul edilebilir seviyede doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Cao vd. (2015) H kesitli TGK'lerin kesme kuvvetleri altında davranışlarını incelemek üzere bir dizi testler yapmışlardır (Şekil 2.20). Testlerde kirişlerin lokal ve global burkulmadan dolayı göçmüştür. Yapılan testlerin malzeme testleri de yapıldıktan sonra SEA'leri de yapılarak sonuçlar yük-deplasman, yük-birim şekil değiştirme ve kesme kapasitesi açısından karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışma gövde et kalınlığı artırıldıkça kirişin kesme kapasitesinin de ortalama %45 oranında artırdığını göstermiştir.



Şekil 2.20. Cao vd. (2015) deney düzeneği

Liv vd. (2015) TKG'lerin basınca çalışan başlığının lokal stabilitesi üzerine deneysel ve teorik araştırmalar yapmıştır. Öncelikle dönmesi gövde tarafından engellenen bir kiriş başlığı kurgulanmıştır. Bu başlığın kritik burkulma gerilmesinin hesabı için bir denklem elde edilmiştir. Sonra türetilen bu teorik modeli doğrulamak için SEA'leri ve gerilmeye çalışan başlık, kiriş açıklığı ve ondülin gövdenin basınç başlığının lokal burkulmasını araştırmak üzere parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın deneysel sürecinde 3 grup OGK üzerinde çalışılmış ve yine deneysel çalışmayı (Şekil 2.21) desteklemek amacıyla bu kirişlerin SEA'leri de yapılmıştır. Başlangıç kusurlarının kritik burkulma gerilmesini %28 oranında küçülebileceği ve kalıntı gerilmelerin %14 oranında azalmasına yol açabileceği saptanmıştır. Ayrıca kiriş başlığı için düzeltme katsayısı önerilmiştir.



**Şekil 2.21.** Liv vd. (2015) deney düzeneği

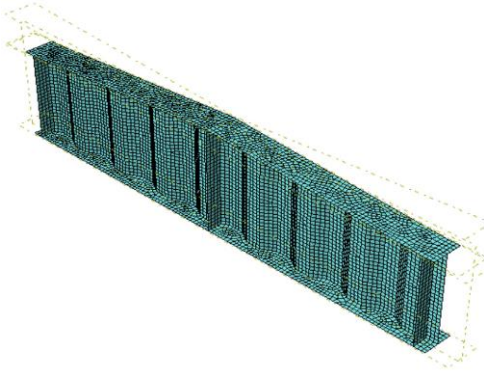
Cheng ve Yao (2016) kompozit kutu kirişlerin deformasyon tahminleri için minimum potansiyel enerji metoduna dayanan basitleştirilmiş bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yöntemin geçerliliğini değerlendirmek üzere 2 farklı trapezoidal gövdeli kompozit kutu kirişin SEA'i yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında düşey kirişlerin düşey deformasyonlarının tahmini için geliştirilen yöntemin uygulamada ön tasarım aşamasında kullanılabileceği ileri sürülmüştür.

Jager vd. (2016) bileşik yükler altındaki TKG'lerin stabilite problemlerini incelemek istemiş ve bu kapsamda bahsi geçen kirişlerin deneysel çalışmalara dayalı numerik modelini oluşturmuşlardır. Deneysel aşamada 11 adet numunenin moment, kesme kuvveti ve yanal kuvvetin farklı kombinasyonları altında test edilmiştir (Şekil 2.22). Deneysel çalışmanın ardından geliştirilen nümerik modelde eşdeğer geometrik kusurlar ile doğrusal olmayan geometrik ve malzeme ayarları kullanılmıştır. Kombine edilmiş yükler altında bu tip kirişlerde eşlenik geometrik kusurlar için ilk normal mod (eigenmode) şekli önerilmiştir. Kusur hassaslığı analizinde (imperfection sensitivity analysis) kullanılacak değerlerle ilgili tavsiyeler verilmiştir.



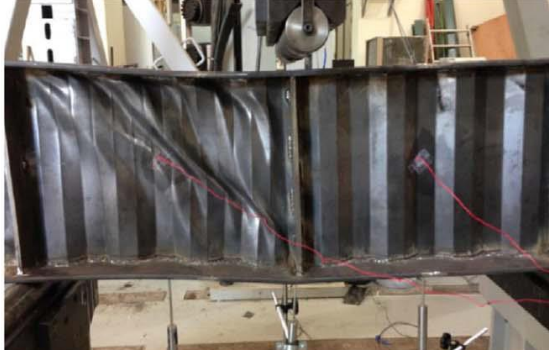
**Şekil 2.22.** Jager vd. (2016) deney düzeneği

Elkawas vd. (2017) yüksek dayanımlı çelikten üretilmiş değişken kesitli TGK'lerin kesme etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışlarını incelemek için numerik bir çalışma yapmışlardır. Literatürde erişilebilen bazı TGK verileri doğrusal olmayan SEA'lerini doğrulamak için kullanılmıştır. Daha sonra SE yazılımı kullanılarak kesme yükleri altında parametrik çalışma yapılmıştır (Şekil 2.23). Tüm analizlerde kiriş başlıklarındaki kesme kuvveti sıfıra yakın çıktığından dolayı kesme kuvveti hesabında kiriş başlıklarının ihmal edilebileceği görülmüştür. Kesmeden kaynaklı göçmeler tüm numunelerde değişken kesitli kirişin en kısa gövdeye sahip olduğu kısmın yakınlardaki gerilme yığılması sebebiyle meydana gelmiştir.



**Şekil 2.23.** Elkawas vd. (2017) SE modeli

Leblouba vd. (2017) TGK'lerin kesme kuvvetlerinden kaynaklanan burkulma durumunu ve kiriş üzerindeki gerilme dağılımını incelemişlerdir. Kirişlerin kesme kuvvetlerine tepkilerini araştırmak için 5 adet numune üzerinde tek noktadan yüklem koşulları altında testler yapılmıştır. Deneyleri yapılan kirişler lokal, global ve etkileşimli burkulma modlarında göçmüştür (Şekil 2.24). Daha sonra SEA'leri yapılan kirişlerin nihai yük taşıma kapasitelerine gelene kadar kesme kuvvetlerinin gövde boyunca düzgün dağıldığı gözlemlenmiştir. Burkulma analizleri için geometrik kusurların gövde et kalınlığı kadar alındığında sonuçların laboratuvarında yapılan test sonuçlarıyla uyduğu dile getirilmiştir.



**Şekil 2.24.** Leblouba vd. (2017) TGK gövde burkulması

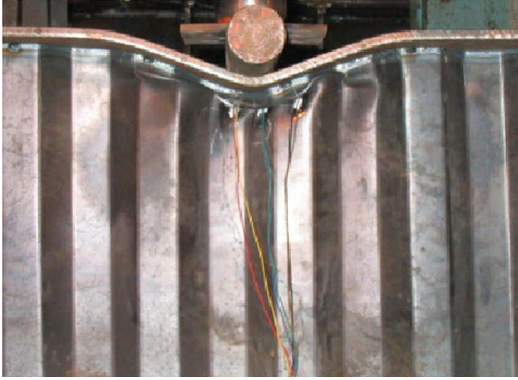
Aggarwal vd. (2018) TGK'lerin lokal kesme burkulması davranışlarını irdelemek için farklı gövde geometrilerine sahip ankastre kirişlerin elastik eigenvalue burkulma analizlerini SE yazılımı kullanarak yapmışlardır. Gövde kalınlığı, panel genişliği ve gövde yüksekliğinin lokal kesme burkulma katsayısı üzerindeki etkisi toplamda 90 model üzerinde incelenmiştir. Tüm analizler gerçekleştirildiğinde lokal kesme burkulma katsayısı 5,34-8,98 arasında hesaplanmıştır. Analiz sonuçları ayrıca gövde paneli genişliği/gövde derinliği oranı artırıldıkça ya da gövde kalınlığı azaldıkça bahsi geçen katsayının da arttığını göstermiştir.

Divahar ve Joanna (2018) farklı derinlik/kalınlık oranına sahip soğuk şekillendirilmiş TGK'lerin yanal burkulmalı burulma durumlarını araştırmak için deneysel çalışma yapmışlardır. Deneylerin doğrusal olmayan grafik çözümleri de yapılarak burkulma momenti direnci incelenmiştir. Farklı derinlik/kalınlık oranına sahip soğuk şekillendirilmiş  $0^0$ ,  $30^0$  ve  $45^0$  trapezoid açılara sahip 20 adet deney numunesinin testleri gerçekleştirilmiştir. Her seriden iki noktadan yükleme altında 2 adet testi yapılan numunelerin analizleri de yapılmıştır. Bu çalışmada TGK'lerin yanal burkulmalı burulmaya karşı düz kirişlere göre daha fazla direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Kollar ve Kövesdi (2018) kendilerinden önce birçok çalışmada TGK'lerin çalışıldığı ve bu kirişlerin başlangıç geometrik kusurları ve artık gerilmelerden kaynaklı bazı noksanlıklara sahip olduğunu dile getirmişlerdir. Bu sebepler TGK'ler üzerindeki artık gerilme dağılımını araştırmak için SEA kullanılarak kirişlerin üretim aşamalarından biri olan kaynak aşamasının simülasyonu yapılmıştır. Geliştirilen SEA'nden alınan veriler kaynak esnasında gerinim pullarından alınan verilerle doğrulanmıştır. Sonuçlar TGK'lerde artık gerilme dağılımının standart düz gövdeli kirişlerden çok farklı olduğunu göstermiştir. Ek olarak kiriş gövde yüksekliğinin 1/200'ü kadar eşlenik geometrik kusurların araştırmada kullanılan kirişler için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Li, Zhang ve Li (2019) farklı genişliklerde uygulanan düzgün yük dağılımı altında TGK'lerin lokal taşıma kapasitelerini araştırmak üzere 9 adet test yapmışlardır (Şekil 2.25). Test numunelerinin gövde akması, devamında gevrek gövde burkulması ve buna bağlı olarak da plastik göçme davranışına geçtikleri gözlemlenmiştir. Bu kirişlerin nihai taşıma kapasiteleri düz gövdeli kirişlerden daha yüksek çıkmıştır. Deneyleri yapılan kirişleri simüle etmek için yapılan SEA'lerinde gövde kalınlığı, gövde malzeme

mukavemeti, başlık kalınlığı ve başlık malzeme mukavemetinin kirişin lokal taşıma kapasitesine direkt etki ettiği buna karşın gövde yüksekliğinin belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

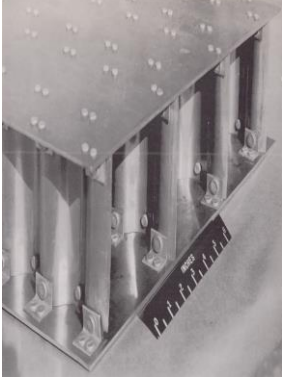


Şekil 2.25. Li, Zhang ve Li (2019) TGK gövde burkulması

Leblouba vd. (2019) TGK'lerin kesme mukavemetlerinin tahmininde kullanılan matematiksel modellerin kapsamlı bir analizini yapmışlardır. Ellerinde mevcut deneysel verilere daha fazla deney sonucu ekleyerek 144 numune testi üzerinde çalışmışlar ve yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirilen modelin literatürde mevcut olan birçok matematiksel modele göre daha iyi performans gösterdiği saptanmıştır.

### 2.2.2. Sinüsoidal gövdeli kirişler

Ondülin gövdeli kirişlerin (OGK) yaygın olarak kullanılan bir diğer alt dalı olan Sinüsoidal Gövdeli Kirişler (SGK) soğuk şekillendirmeye maruz bırakılan ince bir levhanın gövde olarak kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Literatürde konuyla alakalı göze çarpan ilk çalışmanın 1956'larda NACA (ABD Ulusal Havacılık Danışma Komitesi) tarafından yayınlandığı görülmektedir. Bu çalışmada Fraser (1956) 2 tip gövde başlık bağlantısı tasarlayarak 9 adet 3 hücreli gövdeleri sinüsoidal formda Alüminyum malzemeden imal edilmiş kirişlerin testlerini gerçekleştirmiştir (Şekil 2.26). Deneylerin sonucunda SGK'lerin kanal tipi çok gövdeli kirişlerden daha etkili çalıştığı ortaya konulmuştur.



**Şekil 2.26.** Fraser (1956) TKG gövde burkulması

Li vd. (2000) malzeme tasarrufu sağlamak için SGK'lerin burkulma mukavemetini veren bir denklem geliştirmişler ve bu denklemi desteklemek amacıyla bahsi geçen kirişlerin teorik analizlerini yapmışlardır. Yapılan analizler SGK'lerin yapısal parametrelerini optimize etmeyi teşvik eden teorik bir temel oluşturmuştur.

Khalid vd. (2004) yumuşak çelik malzemeden üretilen OGK'lerin tek noktadan yükleme altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yatay ve dikey eksenlerde sinusoidal oluklu tasarımları yapılan kiriş numuneleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir (Şekil 2.27). Dikey oluklu gövde tasarımı tekil yükleme altında yatay oluklu ve düz tasarımlardan %13,3 ile %32,8 arasında daha fazla yüke mukavemet göstermiştir. Aynı şekilde dikey oluklu test numuneleri eğilme kapasitesi açısından da daha iyi sonuçlar vermiştir. Hiçbir testte kaynak yırtılması sergilemeyen numunelerden elde edilen veriler OGK'lerde gövde büküm açısının artırılmasıyla bu kirişlerin moment taşıma kapasitelerinin artırılabilirliğini göstermiştir. Tasarımda kullanılan en büyük büküm açısıyla tasarım yapılması durumunda dikey SGK'lerin harcanan çelik malzeme miktarının %13,6 düşürülebileceği belirtilmiştir.



**Şekil 2.27.** Khalid vd. (2004) dikey SGK göçme sonrası görünüm

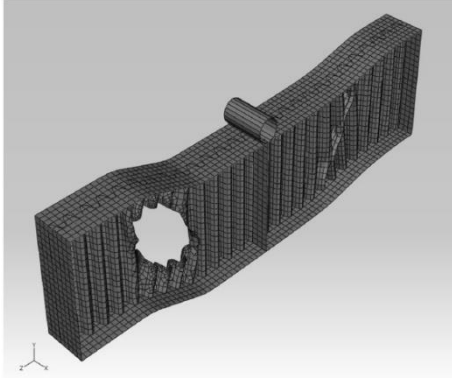
Abbas vd. (2006) düzlem içi gerilmeler altında OGK'lerde meydana gelen kesit gerilmeleri ve eğilme momenti ile kesme kuvvetlerinden kaynaklanan bileşke gerilmeleri

araştırmışlardır. OGK'lerin yalnızca geleneksel kiriş teorisi kullanılarak analiz edilemeyeceği ortaya çıkarılmıştır. Bunun için standart düzlem içi gerilmeler altında SGK'ler için çözümler türetilmiştir.

Gönen (2007) içerisinde 10 t'luk vinç de içeren mevcut bir endüstri yapısını geleneksel geniş başlıklı ve SGK profilleri ile tasarlayarak sonuçlar karşılaştırmıştır. Sinüsoidal gövdeli profiller kullanılarak tasarlanan yapının periyod değerleri standart düz gövdeli profillerle yapılan tasarıma kıyasla oldukça düşük olduğu ve bu açıdan SGK kullanımının yapı deplasman sınırlamasına olumlu yönde katkı sağladığı saptanmıştır. Elde edilen yeni tasarımın ağırlıkça daha düşük olduğu ve bu sebeple deprem güvenliği ve maliyet açısından daha iyi bir seçenek olduğu vurgulanmıştır.

Eldip (2009) köprü yapılarının tasarımlarında kullanılması planlanan SGK'ler için kesmeli burkulma mukavemetine etki eden geometrik parametreler üzerine çalışmıştır. Yapılan SEA'lerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak lokal, global ve etkileşimli burkulma parametrelerinin hesabına gerek duymayan bir kesmeli burkulma denklemi sunulmuştur. Kirişlerin kesmeli burkulma kapasitelerinin maksimize edilmesi amacıyla bir diğer denklem daha sunulmuştur. Sunulan denklemlerin yayınlanan deneysel çalışmalarla tutarlı olduğu görülmüştür.

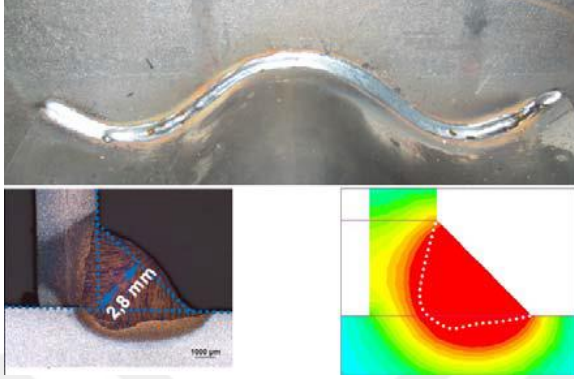
Kıymaz vd. (2010) yeni bir fikir olarak gövde boşluklu SGK'lerin enine yük taşıma kapasiteleri üzerine çalışmışlardır. Boşluk geometrisinin sinüsoidal formdaki kiriş gövdesine etkisini araştırmak amacıyla 2 m uzunluğunda, gövde boşlukları kiriş merkezine 50 cm olacak şekilde farklı boşluk, farklı kasnak ve dalgalı form geometrisine sahip bir dizi kirişin SEA'leri yapılmıştır (Şekil 2.28). Bu çalışmada dikkate alınan tüm geometriler için gövde boşlukları SGK'in kapasitesini %15'den %50'ye kadar azaltmıştır.



**Şekil 2.28.** Kıymaz vd. (2010) gövde boşluklu SGK'in SE modeli

Pasternak ve Kubienc (2010) SGK'lerin gövde başlıklarının montajı esnasında uygulanan kaynaklama işlemlerinin kirişin yük taşıma kapasitesine etkisini araştırmak için 7 m uzunluğundaki iki noktasal yük altında simetrik bir kirişin deneysel çalışmasını yaptıktan sonra kaynaklama simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.29). Simülasyondan kaynaklama esnasında ortaya çıkan ısının kaynak yapılan noktanın etrafında 4 mm çaplı alana etki ettiği gözlemlenmiştir. Laboratuvarında gerinim pullarından

alınan veriler başlık kesitinde özellikle de kaynaklama bölgesinde yüksek mertebede doğrusal olmayan bir gerilme dağılımının olduğunu göstermiştir. İlgili şartnamelerde gövdenin soğuk şekillendirilerek ondülin forma getirilmesi esnasında malzeme akma gerilmesinin yükselmesinin ve kaynaklama aşamasında kiriş başlıklarında ortaya çıkan yüksek normal gerilmelerin dikkate alınmadığı vurgulanmıştır.



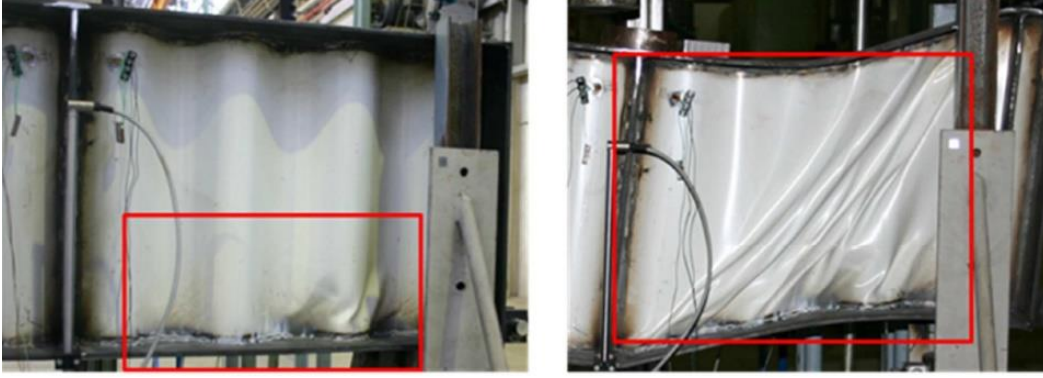
Şekil 2.29. Pasternak ve Kubienec (2010) SGK kaynak simülasyonu

Pimenta vd. (2012) OGKK'lerin ve bunların birleşimlerinin güvenilirliğe dayalı tasarımını irdelemek üzere deneysel çalışmanın ardından (Şekil 2.30) SE modelleri geliştirilmiş, teorik modeller oluşturulmuş, güvenilirlik analizleri yapılmış ve mevcut yürürlükteki güvenlik seviyeleri kontrol edilmiştir. Önerilen tasarım modellerinin yapısal mühendislik uygulamalarındaki mevcut görüşle tutarlı olduğu bulunmuştur.



Şekil 2.30. Pimenta vd. (2012) kiriş göçme modu

Bartholome ve Pasternak (2013) sinüsoidal, dikdörtgensel, düz ve bal peteği kabartmalı gibi farklı gövde formlarına sahip bir seri kiriş tasarımlarının kesme kuvvetleri etkisinde SEA'lerini yapmışlardır. Bunlardan birkaçının laboratuvarında testleri de yapılmıştır (Şekil 2.31). Sandiviç elemanların rijitliği düz olanlardan daha yüksek çıkmıştır. Kabartmalı gövdeli kirişlerin burkulma davranışları kabartmaların oryantasyonuna bağlı olarak değişmiştir. Nihai yük taşıma açısından en yüksek değerler SGK'lerden elde edilmiştir.



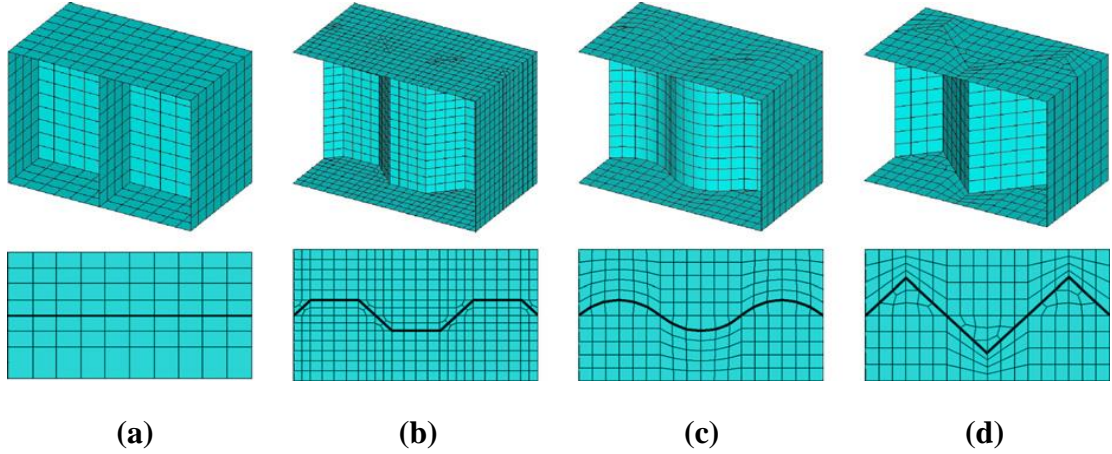
(a)

(b)

**Şekil 2.31.** Pasternak ve Bartholome (2012) SGK'lerin **a)** Lokal, **b)** Global göçme modu

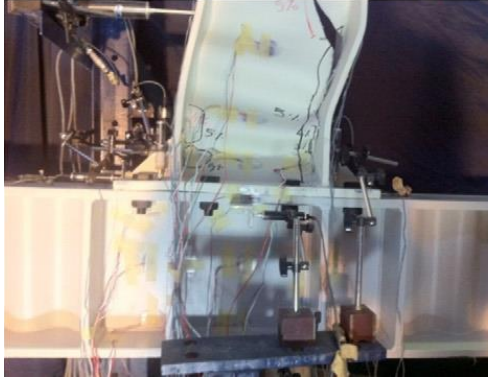
Chen vd. (2013) H kesitli dairesel kemer kirişlerin gövde tasarımlarında sinüsoidal formda levhalar kullanmışlardır. Yayınlanan çalışmada bu kirişlerin fabrikasyon süreci detaylandırılmış ve düzlem içi dengesi kabuk elemanlar kullanılarak oluşturulan modeller üzerinden SE metoduyla incelenmiştir. Yapılan SEA'lerinden elde edilen veriler değerlendirilerek kiriş başlıkları için genişlik kalınlık oranı limiti belirlenmiştir.

Shahmohammadi vd. (2013) tasarımlarında perde duvar elemanlarının kullanıldığı yapılarda deprem esnasında üzerine gelen sismik enerjiyi dağıtmak amacıyla sıklıkla kullanılan betonarme bağlantı kirişlerine alternatif olarak çelik bağlantı kirişlerini önermişlerdir. Çalışmalarında berkitmeli, zigzag, trapezoidal ve sinüsoidal gibi farklı gövde tasarımlı bir dizi çelik kirişin SE modellerini oluşturmuşlardır (Şekil 2.32). Gövde formu, gövde kalınlığı, ondülin sayısı ve ondülin açısı gibi nicelikler dikkate alınarak 160 adet SE modelinin doğrusal elastik burkulma ve doğrusal olmayan analizleri ANSYS SE yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Literatürdeki bazı yaygın tipteki bağlantı kirişi deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Aynı gövde kalınlığına sahip tüm modeller aynı kesme kuvvetinde akma noktasına ulaşmıştır. Fakat, düz ve trapezoidal gövdeli kirişlerin nihai kesme taşıma kapasitesi sinüsoidal ve zigzag gövde modellerinden daha yüksek çıkmıştır.



**Şekil 2.32.** Shahmohammadi vd. (2013) kullanılan **a)** düz; **b)** trapezoidal; **c)** sinüsoidal; **d)** zigzag gövde modelleri

Aydın vd. (2014) SGK'lerin moment aktaran kolon-kiriş birleşimlerinin davranışını deneysel metotla incelemişlerdir. Uygulamalar dikkate alınarak türetilen ve tam ölçekli tasarlanan farklı panel bölgelerine sahip deney numunelerinin tekrarlı yükler altında testleri yapılmıştır (Şekil 2.33). Yapılan testlerin SE modelleri *ABAQUS* SE yazılımı kullanılarak ve yapıdaki doğrusal olmayan etkileşimler dikkate alınarak simüle edilmiştir. Panel bölgesinin lokal davranışı ve numunenin genel davranışının incelenmesi üzerine panel bölgesinin düz plaka ile tasarlandığı durumda numunenin daha dengeli bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir.



**Şekil 2.33.** Aydın vd. (2014) kolon-kiriş birleşimi göçme modu

Hajsadeghi vd. (2014), Shahmohammadi vd. (2013) yılında berkitmeli, üçgensel, trapezoidal ve sinüsoidal gövde formlu bağlantı kirişleri üzerine yapmış oldukları SE çalışmasını detaylandırarak bu kirişlerin tekrarlı yükler altında enerji sönümleme kapasitelerini de araştırmışlardır. Gövde kalınlığını artırmak OGK'lerin enerji yutma kapasitesini oldukça artırmıştır. Birbirine çok yakın sonuçlar veren farklı tipteki gövde formlarına sahip OGK'lerin düz gövdeli bağlantı kirişlerine göre yüksek dönme kapasiteleri ve enerji yutma kapasiteleriyle tasarımcılar için daha iyi bir alternatif

olabileceği ortaya çıkmıştır.

Aydın vd. (2015) moment aktaran uç bağlantıya sahip SGK'lerin moment-dönme eğrilerini incelemiştir. Bu araştırmada toplamda 4 adet numune testi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.34). Gövde formunun sinüs açısı artırıldığında plastik eğilme direnci ve maksimum eğilme momentinin arttığı gözlemlenmiştir. Dahası SGK'lerin sünekliğinin diğer modellerden düşük olmasına karşın bu kirişlerin enerji dağıtma performansları daha yüksek olmuştur. Sonuç olarak endüstrideki kullanımı düşünüldüğünde SGK'lerin alternatiflerinden daha iyi olduğu kanısına varılmıştır.



Şekil 2.34. Aydın vd. (2015) SGK deney düzeneği

Pimenta vd. (2015) yanal burulmalı burkulma etkisindeki SGK'lerin güvenilirliğe dayalı tasarımlarını araştırmışlardır. Bu kapsamda ilk olarak bu kirişlerinin mukavemetini belirlemek amacıyla bir dizi testler yapılmış (Şekil 2.35), ardından elde edilen verileri doğrulamak için bu testler SEA yazılımında simüle edilmiş, mukavemet tahminleri için teorik model oluşturulmuş, belirsizliklerin değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir program oluşturulmuştur. Ardından birinci dereceden güvenilirlik yöntemi (FORM) kullanılarak güvenlik analizleri yapılarak mevcut uygulamadaki güvenlik seviyeleri bulunmuştur. Sunulan değerlendirmelerin mevcut şartnamelerdeki görüşlerle aynı doğrultuda oldukları belirlenmiştir.



Şekil 2.35. Pimenta vd. (2015) SGK göçme durumu

Guo vd. (2015) sinüsoidal gövde formuyla güçlendirilmiş mafsallı uçlu I kesitli dairesel kemer elemanların global düzlem içi göçme ve bölgesel gövde göçme mekanizmasını ve bu kemerlerin mukavemetlerini araştırmışlardır. Farklı göçme modlarını nümerik olarak açıklayabilmek için düzgün dairesel yükleme ve düzgün düşey yükleme dikkate alınmıştır. Kiriş gövdenin kesme gerilmelerinden dolayı göçmesinin ani bir şekilde gerçekleştiği dikkate alınarak SGK'lerin nihai kesme yükü taşıma kapasitelerini veren bir denklem geliştirilmiştir. Geliştirilen tüm denklemlerin SEA ile sağlanması yapılmıştır.

Vacha vd. (2016) yüksek sıcaklıklarda SGK'lerin termal ve mekanik özelliklerinin tayini için 2 tip test yapmışlardır. Birinci testlerde farklı boyut oranlarına sahip kirişlere standart yangın sıcaklığı ve bunlardan birine yük uygulanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde tam ölçekli çelik-betonarme kompozit kirişler de deneysel çalışmaya dahil edilmiştir. Eleman düzeyinde yapılan testler kiriş başlık ve gövde kalınlık oranının kiriş kesitindeki sıcaklık gelişimine etki ettiğini ortaya çıkarmıştır. Gerçek bina çapında yapılan test de termal perspektiften benzer sonuçlar vermiştir.

Aydın vd. (2016) pratikteki tasarım türlerine alternatif olarak berkitme levhalarının arasına çarpraz elemanların konulduğu ve panel bölgesinin sinüsoidal formda olan kolon-kiriş birleşim detayı deneysel ve SE tekniği kullanılarak incelenmiştir (Şekil 2.36). Düzlem gövde levhası ya da çarpraz eleman kullanımının her ikisinin de rijit düğüm noktası oluşturulmasında etkili olduğu sonucuna varılmıştır.



**Şekil 2.36.** Aydın vd. (2016) SGK göçme durumu

Guo vd. (2016) mafsallı uçlu dairesel çelik sinüsoidal gövdeli kemerlerin düşey düzgün yayılı yükler altında global düzlem içi elasto-plastik davranışlarını araştırmak üzere bir dizi test yapmışlardır (Şekil 2.37). Testlerden elde edilen verileri doğrulamak ve numunelerin düzlem içi elasto-plastik davranışlarını daha iyi gözlemlemek amacıyla SEA'yi yapılmıştır. Yapılan bazı SEA'lerinde kemerlerdeki göçme kesme kuvvetlerinden kaynaklanarak kemerin gövdesinde oluşmuştur. Sonuçlar derlenerek düşey düzgün yayılı yüke maruz kalan bu kemerlerin global düzlem içi mukavemetlerini veren bir denklem geliştirilmiştir.



**Şekil 2.37.** Guo vd. (2016) kemer testi deney düzeneği

Olivera vd. (2016) sürekli SGKK'lerin yanal burkulmalı burulma davranışları için elastik kritik momentini belirlemek üzere çalışmışlardır. 45 adet SGKK'in SE yazılımında modelleri oluşturularak burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. SEA'lerinden elde edilen sonuçlar kirişlerin elastik kritik momentini belirlemek için sunulan prosedürün uygun olduğunu göstermiştir.

Razia vd. (2016) farklı eğrilikte ondülin formlara sahip SGK'lerin nihai yük taşıma kapasitelerini SOLID-185 tipi elemanlar kullanarak SE tekniğiyle hesaplamışlardır. Gövdenin ondülin forma sokulmasının kirişin yük taşıma kapasitesini %18,41 oranında artırabileceğini ayrıca kirişin eğilme kapasitesinin de bu yolla artırılacağı görülmüştür. Bu çalışmada SGK'lerin ondülin formunun optimize edilmesinin gerekliliği üzerine durulmuştur.

Satheshkumar ve Arunkumar (2016) soğuk şekillendirilmiş SGK'lerin gövde genişliği ya da bir diğer ifade ile gövdenin sinüsoidal eğrisinin yüksekliğinin kiriş davranışı üzerine etkilerini araştırmak için SEA'leriyle çalışmışlardır. Çalışmada başlangıçta kiriş başlık kalınlığı, gövde kalınlığı ve genişliği sabit tutulmuştur. Devamında ondülin formun derinliği artırılarak analizlere devam edilmiştir. Çalışmada tüm modeller kiriş başlığının bölgesel burkulmasından ve eğilmeden kaynaklı göçmüştür. Gövdenin sinüsoidal forma sokulması kirişte oluşacak gövde burkulmalarını elemine etmiştir. Sonuçlarda bu çalışma için ondülin derinliği 50 mm'ye kadar artırıldığında rijitliğin %45,27'ye kadar arttığı, 60 mm'ye çıkarıldığında ise sadece %5,85 arttığı verilmiştir. Ayrıca gövde olukları sıklaştıkça kirişin rijitliğinin arttığı da belirtilmiştir.

Shlyakhin ve Lukin (2016) Zigzag Gövdeli Kiriş (ZGK) ve SGK'lerin parametrik çalışmasını SEA'leri ile gerçekleştirmişlerdir. Parametrik çalışmada ondülin gövde formu tipi ve geometrik nicelikler göz önüne alınmıştır. Aynı elastikiyetteki ZGK ve SGK karşılaştırıldığında zigzag gövde formu kirişlerin sinüsoidal gövdelerine göre %60-100 civarında daha yoğun çalıştığı belirtilmiştir.

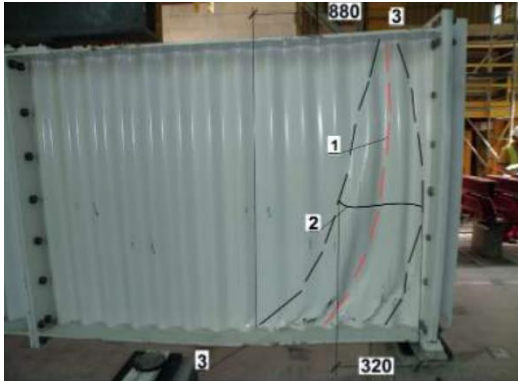
Jiao vd. (2017) sinüsoidal formdaki soğuk şekillendirilen çelik bir levhayı kiriş başlığı görevi gören iki ahşap levha arasına montajını yaparak kompozit yapıda bir kiriş elde etmişlerdir. Geliştirilen kompozit kirişin yanal burkulmalı burulma mukavemeti tahmini için geliştirilen denklemler deneysel ve nümerik analizler vasıtasıyla

doğrulanmıştır. Düz gövdeli kompozit kirişlerden minimum %17,7 daha fazla burkulma yükü taşıyan kirişlerin parametrik çalışması da yapılarak bu kirişlerin optimum boyutlandırmaları elde edilmiştir.

Lopes vd. (2017) SGK'lerin düzgün dağılımlı eğilme momenti, artan dağılımlı eğilme momenti ve düzgün dağılımlı yük gibi farklı yüklemeler altındaki durumları için elastik kritik yükü hesaplamışlardır. TKG'ler hakkında yapılan geçmiş çalışmalardan faydalanılarak SGK'lerin çarpılma ya da burulma katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra ODK'lerin SEA'lerini yaparak elde edilen sonuçlar ışığında düzgün dağılıma sahip olmayan eğilme durumları için tasarım denklemleri geliştirmişlerdir.

Zhang vd. (2017) çelik yapılarda sinüsoidal ondülin gövde kullanımını bir üst seviyeye taşımaya amaçlayarak yeni tip depreme dayanıklı prefabrike sinüsoidal gövdeli kiriş-kolon bağlantı noktası geliştirmişlerdir. 55 adet SE modelleriyle yapılan çalışmada sinüsoidal gövde formunun geometrisi, kaplama plakasının kalınlığı, başlık kaplama plakasının malzeme özellikleri ve bulon çapı gibi birçok tasarım parametresi dikkate alınmıştır. Tasarlanan kolon-kiriş bağlantı noktasının nihai taşıma kapasiteleri ve akma yüklerinin tahmini için SEA'lerinden elde edilen sonuçlarla tutarlı bir tasarım teorisi geliştirilmiştir.

Basinski (2018) iki noktadan yükleme altındaki SGK'lerin gövde burkulmalarını incelemek üzere deneysel (Şekil 2.38) ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Tam ölçekli numunelerin kullanıldığı deneysel çalışmaya ve etkileşimli burkulma kavramına dayanarak tasarım kesme burkulması değerinin bulunması için bir çözüm önerilmiştir.



**Şekil 2.38.** Basinski (2018) SGK gövde burkulması

Gorecki vd. (2018) daha önceden laboratuvarında testleri yapılan iki noktadan yükleme altında çalışan SGK'lerin nümerik çalışmasını yaparak kiriş gövdesinin her iki yüzeyindeki gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Analizlerin sonucuna bakıldığında eğilme momentinin kiriş başlıkları tarafından taşındığı ve normal gerilmenin kiriş kesiti boyunca eşit dağılmadığı gözlemlenmiştir.

Riahi vd. (2018) kiriş gövdelerinde burkulma mekanizmasını daha iyi

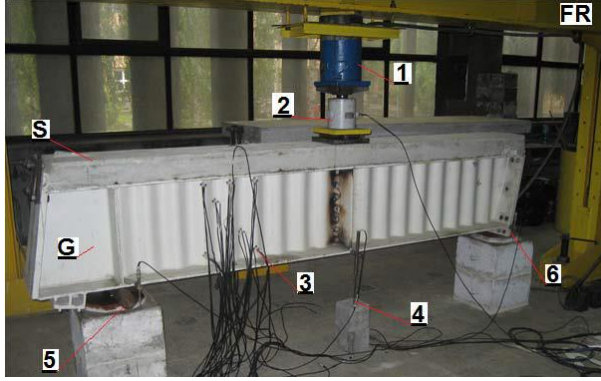
anlayabilmek için tek noktadan yükleme altında standart düz, trapezoidal, sinüsoidal ve zigzag gövde formlardaki gerilme dağılımlarını incelemek amacıyla bir dizi test yapmıştır. Bu gerilme dağılımlarının sadece deneysel çalışmalardan elde edemeyeceği düşünülerek test numunelerinin SE modelleri de oluşturulmuştur. Mevcut çalışmadaki nümerik analizlerde kesmeye maruz kalan kiriş gövdelerinin akma gerilmesine ulaşılması ya da gövde burkulmasından kaynaklı göçtüğü ve meydana gelen gövde burkulmalarında kiriş başlıklarının bir katkısının olmadığı görülmüştür. Ayrıca gövde burkulması öncesinde kesme gerilmelerinin kiriş gövdelerinde düzgün homojen bir şekilde dağıldığı ve etkileşimli gövde burkulmasında malzeme elastikiyetinin ve akma dayanımının herhangi bir etkisinin olmadığı ortaya çıkmıştır.

Zubkov vd. (2018) kiriş başlık geometrisinin sabit tutarak ve gövde yüksekliği, kiriş açıklığı ile tekil yükün etkilediği alanın genişliğini gibi parametrelerin SGK'lerin nihai yük taşıma kapasitelerine etkisini araştırmak üzere deneysel çalışmalar yapmışlardır (Şekil 2.39). Yapılan deneylerde gövdenin zarar gördüğü ana kadar kirişin deformasyonu ve yük taşıma kapasitesi arasında lineer bir ilişkinin varlığı göze çarpmıştır. Kirişlerin gövdesi akma gerilmesine ulaştıklarında başlıklardaki gerilmeler bu değerlerin %60 ila %90'ı kadarına ulaşabilmiştir. Başlık ve gövde eksenleri arasındaki eksantisitenin SGK'lerin nihai yük taşıma kapasitelerine önemli derecede etki ettiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 2.39.** Zubkov vd. (2018) iki noktadan yükleme deney düzeni

Gremza ve Basinski (2019) SGK'lerin Eurocode 4'te verilen kıstasları dikkate alarak betonarme bir döşemeyle birleştirilmesi şeklinde tasarladıkları SGKK'lerin gövde kesme dayanımlarını incelemek amacıyla testler yapmışlardır (Şekil 2.40). Bu kapsamda betonarme döşemeli ve döşemesiz olarak üretilen SGK'lerin deneysel sonuçları karşılaştırıldığında tüm kirişlerin gövde stabilitesini kaybederek aynı modda göçtükleri gözlemlenmiştir. Deneysel ve analitik sonuçlar değerlendirilerek bu tip döşemeli kirişlerin gövde kesme dayanımı tahmini için bir çözüm sunulmuştur.



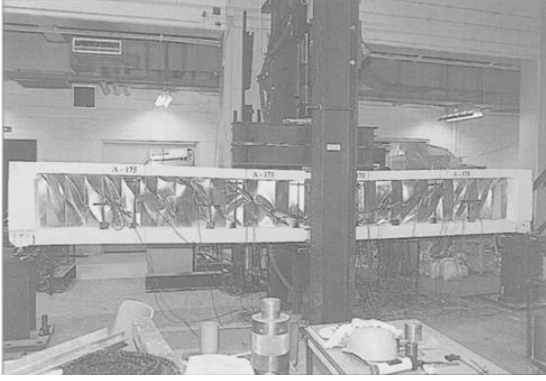
**Şekil 2.40.** Gremza ve Basinski (2019) döşemeli kiriş deney düzeni

Lin vd. (2019) SGK'lerin yapısal davranışlarını incelemek ve bu kirişlerin optimum boyutlandırmalarına ulaşmak amacıyla bir seri yapma I kesitli profiller ve SGK'lerin nümerik çalışmasını yapmışlardır. Aynı kapasitedeki yapma I kesitli profilin gövdesinin sinüsoidal formdaki bir gövde ile değiştirmesinin tasarımcıya %20'lere kadar malzeme tasarrufu sağlayabileceği öngörülmüştür. İlave olarak bu gövdelerinin kullanılmasıyla kiriş gövde yüksekliğinin de düşürülebileceği görülmüş ve bu şekilde bina kat yüksekliklerinin de artırılabilirliğinin üzerinde durulmuştur.

### 2.2.3. Zigzag gövdeli kirişler

Zigzag Gövdeli Kirişler (ZGK) diğer ondülin gövde formları arasından daha yeni yeni araştırmacıların ilgisini çekmeye başlamıştır. *Üçgensel Gövdeli Kiriş* olarak da adlandırılan bu kirişler hakkında literatürde sınır sayıda çalışma vardır. Bunlardan birkaçını inceleyecek olursak;

Metwally ve Loov (2003) öngermeli betonarme başlıklar ve zigzag formda gövdeden tasarladıkları kompozit kirişlerin teorik ve deneysel çalışmasını yapmışlardır (Şekil 2.41). Deneysel süreçte çalışmanın teorik bölümünde minimum hacim amaçlanarak tasarlanan kirişlerin iki noktadan testleri yapılmıştır. Yapılan testlerde etkili bir şekilde çalışan ZGK'lerin gövde formu açısındaki küçük farklılıklara karşı mukavemet açısından fazla hassas olmadıkları gösterilmiştir.



**Şekil 2.41.** Metwally ve Loov (2003) kompozit kiriş deney düzeni

Denan ve Hashim (2011) çelik ZGK'lerde ondülin açısının kirişin eğilme davranışına etkisini araştırmak üzere üç boyutlu SEA'leri yapmışlardır. Bunun için 2 adet düz gövdeli yapma kiriş ve 2 adet TGK 3 m, 4 m ve 4,8 m açıklıklara sahip olacak şekilde yaygın SE yazılımlarından biri olan LUSAS'ta modellenmiştir. Modellerden  $45^0$  ve  $75^0$  zigzag açılarıyla tasarlanan TGK'ler hem yatay hem de düşey eksenlerde eğilmeye karşı daha çok mukavemet göstermişlerdir.

Denan vd. (2012) ZGK'lerin burulma davranışlarını yapma I profillerinki ile karşılaştırmışlardır. Kiriş uzunluğu, gövde kalınlığı, gövde derinliği ve gövdenin zigzag açısı gibi parametreler dikkate alınarak toplamda 37 kiriş SEA paket yazılımında modellenmiştir. Sonuçlar ve analizler ZGK'lerin normal düz gövdeli kirişlere nazaran burulmaya karşı dirençlerinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Denan ve Mustar (2012) ZGK'lerde dairesel gövde boşluklarının yanal burkulmalı burulma üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla 7 m, 5 m ve 3 m açıklıklı 40 mm, 60 mm ve 80 mm çaplarında dairesel gövde boşluklu bir dizi ZGK'in nümerik analizlerini yapmışlardır. Ayrıca gövde boşluksuz kirişlerin de analizleri sonuçları karşılaştırmak üzere yapılmıştır. Daha büyük gövde boşluğuna sahip kirişlerin yanal burkulmalı burulma dayanımının daha düşük olduğu fakat küçük boşluk çapına sahip kirişlerin TGK'in yanal burkulmalı burulma dayanımına çok az etkidiği gözlemlenmiştir.

Denan ve Omer (2012 c) ZGK'ler ve bu kirişlere tekabül eden düz gövdeli kirişler için civatalı kiriş-kolon birleşimlerinin SEA'lerini yaparak bunların moment-eğrilik diyagramlarını üzerinden göçme modlarını incelemişlerdir. Malzeme plastisitesinin de dikkate alındığı bu çalışmanın sonucunda ZGK'lerle yapılan kırık-kolon birleşimlerinin moment taşıma kapasitelerinin düz gövdeli kirişlere göre daha yüksek olduğu nümerik olarak gösterilmiştir.

Denan vd. (2013) farklı gövde kalınlıklarındaki düz ve zigzag formlu gövdelere sahip çelik kirişlerin SE modellerini geliştirerek bahsi geçen eşdeğer kirişlerin gövde burkulması davranışlarını karşılaştırmışlardır. Kiriş başlıklarının sabit, kiriş gövde kalınlıklarının değiştiği bir dizi nümerik analizin sonucunda kirişlerin burkulma kapasitelerinin her iki tip kiriş için de gövde et kalınlığıyla birlikte arttığını göstermiştir. Farklı olarak ZGK'lerde bu artışın çok daha üst seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.

Denan ve Hashim (2013) hem zayıf ekseninde hem de güçlü ekseninde farklı açıklıklara ve geometrilere sahip ZGK'lerin eğilme davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir (Şekil 2.42). Yapılan testlerde ZGK'ler zayıf eksenli eğilmede düz gövdeli kirişlere göre daha iyi bir performans sergilemelerine rağmen kuvvetli eksenindeki rijitlikleri daha düşük olmuştur. Analiz sonuçları ZGK'lerin eğilme rijitliklerinin düz gövdeli kirişlerin kuvvetli yöndeki atalet momentinin %79,4'ü kadar olduğunu göstermiştir.



**Şekil 2.42.** Denan ve Hashim (2013) eğilmeye maruz kalan ZGK

Denan vd. (2015) yapı tasarımında ekonomik bir çözüm olarak gördükleri gövde boşluklu ZGK'lerin SEA'lerini yaparak bu kirişlerin güçlü ekseninde eğilme davranışlarını belirlemişlerdir. Nümerik bulgular gövde boşluklu ZGK'lerin yaptıkları deformasyonun boşluksuz olarak tasarlanan kirişlere göre 1mm'den daha az olduğunu ortaya çıkarmıştır. Gövde boşluklu gövde kullanılarak yapılan tasarımların boşluklu ZGK'lerle aynı yükü taşıyabilecekleri belirlenmiştir.

Mathe ve Parthasarathi (2015) beton dolgulu düz ve TGK'ler tasarlayarak bu kirişlerin deneysel çalışmasını yapmışlardır (Şekil 2.43). Bu şekilde düz gövdeli yapma I kirişlere yük taşıma kapasitesi daha yüksek olan yeni bir alternatif vermek amaçlanmıştır. 150 mm gövde derinlikli tasarımlar dolgulu kirişlerin gövdelerinde zigzag formun kullanılması yapı elemanına %25-30 ilave nihai yük taşıma kapasitesi ve ayrıca %40-50 oranlarında fazladan toplam deformasyon kapasitesi sağlamıştır. Deprem bölgelerine yapılacak olan binalar için bahsi geçen kompozit kirişlerin kullanılabilmesi açıklanmıştır.



**Şekil 2.43.** Mathe ve Parthasarathi (2015) beton dolgulu ZGK eğilme testi

Denan vd. (2016) ZGK'lerin burulma davranışlarını belirlemek için düz ve zigzag gövde formlarındaki bir dizi çelik kiriş numunesini deneysel yolla incelemişlerdir (Şekil 2.44). En yüksek burulma momenti yüklemesinde alınan deneysel sonuçlar teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Aynı burulma yükünde tüm ZGK'ler düz gövdeli yapma kirişlere göre %1,1 ile %16,8 aralığında daha fazla direnç göstermişlerdir.



**Şekil 2.44.** Denan vd. (2016) ZGK burulma testi

Revathi vd. (2016) SE paket yazılımı ABAQUS kullanarak bazı parametrik değişimlerin OGK'lerin eğilme davranışları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ondülin derinliği, gövde yüksekliği ve açıklık parametrelerinin etkisinin araştırıldığı çalışmada iki noktasal yük altındaki toplamda 20 model hem teorik hem de nümerik olarak analiz edilmiştir. Tüm kirişler basınca çalışan kiriş başlığındaki bölgesel burkulma ve burulmalı burkulma sebebiyle göçmüştür. Trapezoid ve zigzag formlardaki gövde yapıları kirişlerin eğilme kapasitelerini artırmıştır. Bunların içinden zigzag formun eğilme kapasitesine katkısının trapezoidten daha fazla olduğu görülmüştür.

Sumathi ve Chandra Babu (2017) zigzag (

Şekil 2.45), trapezoidal ve düz gövde formlarındaki bir seri kirişin teorik ve deneysel çalışmasını yaparak bu kirişlerin nihai yük taşıma kapasiteleri ve göçme

modlarını incelemiştir. Ondülin gövde kullanımı kirişlerin burulmalı burkulma davranışına karşı dirençlerini ve buna bağlı olarak kiriş kapasitelerini büyük ölçüde artırmıştır. Kirişlerin nihai yük taşıma kapasiteleri kıyaslandığında standart düz kiriş gövdesi yerine trapezoidal formlu gövde kullanımı %18, zigzag gövde formu kullanımı ise %31,8 oranında eğilmeye karşı ilave dayanım sağlamıştır.



**Şekil 2.45.** Sumathi ve Chandra Babu (2017) ZGK deney elemanı

Son olarak, Kudryavtsev (2019) ZGK'lerin özellikle geniş açıklıklı kirişlerde yaygın bir göçme modu olan yanal burkulmalı burulma davranışını nümerik olarak incelemiştir. Farklı gövde ondülin sıklığı ve kiriş açıklığına sahip olan SE modelleri bu alanda aygın olarak kullanılan paket yazılımlarından biri olan ABAQUS kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde oluklu gövde yapısına sahip kirişlerin yanal burkulmalı burulmaya karşı daha dayanıklı olduklarını göstermiştir. Avrupa ve Rusya şartnamelerinin ZGK'lerin burkulma dirençlerinin hesabında iyi olamadıkları belirtilmiştir.

Bu bölümde trapezoid, sinüsoidal ve zigzag gövde formundaki kirişler için özetlenen literatürdeki tüm çalışmalar incelendiğinde, listelenen tüm çalışmaların sabit parametreler dikkate alınarak yapıldığı gözlemlenmektedir. Bu tez çalışmasında ise OGK türlerinden biri olan SGK'lerin ve bu kirişlerin betonarme döşeme ile birleştirilmesi şeklinde tasarlanan OGKK'lerin av arama ve ateş böceği algoritmaları gibi yeni nesil farklı iki tür optimizasyon yöntemi kullanılarak ilk defa optimum boyutlandırılması yapılmış ve bu iki algoritmanın minimum ağırlık hesaplamada ve yakınsama hızında karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca elde edilen optimum boyutlandırılmalı çelik ve kompozit kirişlerin deneysel ve sonlu eleman analizi çalışmaları da yapılarak bu kirişlerin farklı yük koşulları altındaki davranışları da incelenmiştir. Araştırmanın sonucunda yeni çelik yönetmeliğinde (Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, 2016) yer almayan bu kirişlerin uygulamada yaygınlaştırılması hakkında öneriler verilmiştir.



### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Optimizasyon

Optimizasyon belirli amaçlar doğrultusunda, belirli şartlar altında bir problemin en uygun çözümünü bulma yöntemidir. Matematiksel yolla geliştirilen bu tekniğin birçok türü vardır. Optimizasyon temelde amaç fonksiyonu, tasarım değişkenleri ve sınırlayıcılar olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Bu tez çalışmasında yapı elemanlarından biri olan ondülin gövdeli çelik kirişlerin (OGK) ağırlığı minimum olacak şekilde, kiriş geometrik parametreleri tasarım değişkeni olarak alınmış ve ilgili şartnamelerdeki geometrik ve davranış sınırlayıcıları dikkate alınarak optimizasyon yapılmıştır. Bu işlem yapılırken doğadan esinlenilerek tasarlanan av arama ve ateş böceği isimli iki farklı optimizasyon algoritması kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Av arama yöntemi

Av arama (AAA) yönteminin arkasında uzanan mantık doğada avcı özelliği ile ön plana çıkan aslan ve kurt gibi hayvanların grup halinde hareket ederek avlarını yakalama işlemidir. Avlanma şekilleri farklı olsa bile avlarının çevresinde kuşatma çemberi oluşturmaları ve sonrasında bu çemberi yavaşça daraltarak avlarını yakalamaları bu yöntemin olgusunu oluşturmaktadır. Grup içinde yer alan avcılar bazı stratejileri kullanarak avlarını çevreler ve yakalarlar. Örneğin kurtlar kendilerinden çok daha büyük ve hızlı hayvanları bu tarz bir avlanma yöntemi ile yakalayabilirler. Önce bir av seçilir ve daha sonra avlanma gurubu ona doğru adım adım yaklaşarak avlanmayı gerçekleştirir. Avcılar kokularının av tarafından fark edilmesi riski nedeniyle rüzgârda durmaktan sakınırlar. Bu avcılardan her biri bir yapısal optimizasyon problemi için aday bir çözüm oluşturur. Hayvanların av bulup yakalamaları için bir araya gelmeleri işlemine benzer olarak optimum boyutlandırma işlemi optimum çözümü bulmayı hedefler. Her iterasyonda avcılarının pozisyonu güncellenerek amaç fonksiyonunun iyileştirilmesi hedeflenir. Bir avcı gurubu, grup boyutunu temsil eden ve önceden belirlenmiş sayıda avcıdan oluşur. 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 (Oftadeh, Mahjoob ve Shariatpanahi 2010) 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. Ancak kiriş levhalarının hazır et kalınlığı tablolarından seçildiği optimum çelik yapı boyutlandırma problemlerinde bu kabulün yapılması mümkün değildir. Bunu yapabilmek ise ancak tamsayı değerlerinin seçimiyle mümkün olabilir. Bu çalışmada gerçek sayılardan tamsayı elde etmek üzere ikinci yöntem olan yuvarlama işlemi kullanılmıştır.

##### 3.1.1.1. Tamsayı değişkenleri için av arama optimizasyon yöntemi

Tamsayı değişkenli optimum boyutlandırma problemi aşağıdaki gibi tasvir edilebilir.

$$\begin{aligned}
& \text{Min. } f(x_i), \quad i = 1, \dots, n \\
& g_j(x_i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m \\
& x_i \in X, \quad X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_q\}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

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.

Av arama optimizasyon yöntemi avcı gurubunu temsil eden ve amaç fonksiyonu arama uzayı içinde rastgele seçilmiş olan avcılardan ibarettir. Av arama optimizasyon yöntemi temelde sürekli değişkenler için üretilmiştir. Tekniği tamsayı değerleri ile kullanabilmek için bazı değişiklikleri uygulamak gerekmektedir.

Öncelikle tamsayı değerlerini içeren  $X$  kümesindeki  $x_i$  değerleri artan sayılar şeklinde sıralanır. Daha sonra bu sayıların satır numaraları tasarım değişkeni olarak atanır. Örneğin 272 adet değer içeren tasarım setindeki 1 ile 272 arasındaki satır numaraları ana tasarım değişkenleridir. 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.

Birinci adım: 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 ( $Ra_{maks}$ ,  $Ra_{min}$ ), yakınsama oranı parametreleri  $\mu$  ve  $\varphi$  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.

İkinci adım: Av gurubunun oluşturulması. Gruptaki avcılar ( $HGS$ ) sayısına bağlı olacak şekilde her bir grup için çelik kesit satır numarası ( $I_i$ ) atamak suretiyle rastgele üretilirler.

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

Üçüncü adım: Lidere doğru hareket. Bu adımda avcılarının yeni pozisyonları ( $MML$ ) dikkate alınarak üretilir.

$$I_i = I_i + r(MML)(I_i^L - I_i) \quad i = 1, \dots, n \tag{3.3}$$

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

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

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

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

$$I_i = I_i^L \pm r(I_{maks} - I_{min})\mu(-\varphi(EN)) \quad (3.6)$$

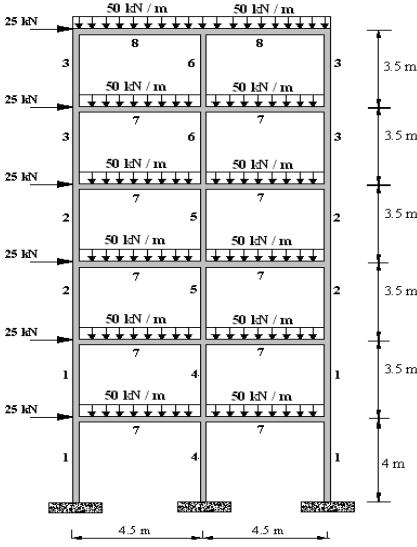
Altıncı adım: Sonuçlandırma Bu adım iterasyon döngüsünün tamamlanma adımıdır. Süreç maksimum iterasyon sayısı kadar devam ettirildikten sonra sonlandırılır.

### 3.1.1.2. Sınırlayıcıların kontrolü

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 avcıların üretilmesi aşamasında hata payı büyük tutulur, avcıların üretilmesi işlemi tamamlanıp iterasyonlara geçildikten sonra adım adım küçültülerek son değeri olan 0.001'e ulaştırılır ve bu değer ile iterasyona devam edilir.

### 3.1.1.3. Tasarım örneği

Şekil 3.1'de gösterilen altı katlı iki açıklıklı çelik çerçeve av arama yönteminin ondülün gövdeli kirişlere uygulanmasından önce boyutlandırma örneği olarak dikkate alınmıştır. Çerçeve sekiz farklı grup altında toplanmış olan otuz adet elemandan oluşmaktadır. Maksimum katlar arası öteleme 1.17cm ve en üst kattaki maksimum deplasman 7.17cm olarak sınırlandırılmıştır. Altı katlı ve iki açıklıklı olan bu çelik çerçeve av arama yönteminin yanı sıra parçacık küme algoritmalarıyla çözülmüştür.



Şekil 3.1. Altı katlı ve iki açıklığa sahip düzlem çelik çerçeve

Çizelge 3.1'de iki tekniğe ait çözümler verilmiştir. Av arama ile elde edilen sonucun parçacık küme yöntemine göre %14,36 daha hafif tasarım olduğu buradan anlaşılmaktadır. Av arama yöntemi parçacık küme algoritmasına oranla minimum ağırlığı hesaplarken analiz sayısı daha fazla olmasına rağmen daha iyi bir yakınsama grafiği göstermiştir.

Çizelge 3.1. Altı katlı ve iki açıklıklı çelik çerçeve için optimum boyutlandırma

Grup No	Eleman Türü	Av Arama	Parçacık Küme
1	Kolon	<b>W24x55</b>	W21x50
2	Kolon	<b>W18x35</b>	W12x35
3	Kolon	<b>W8x24</b>	W8x28
4	Kolon	<b>W16x45</b>	W18x60
5	Kolon	<b>W16x36</b>	W18x60
6	Kolon	<b>W14x30</b>	W14x48
7	Kiriş	<b>W18x35</b>	W18x40
8	Kiriş	<b>W18x35</b>	W18x46
Ağırlık (kg)		<b>6451</b>	7532
Maksimum Analiz Sayısı		<b>9280</b>	6890

### 3.1.2. Ateşböceği algoritması yöntemi

Stokastik sayısal optimizasyon yöntemlerinden biri olan ateş böceği yöntemi, çok modellenli fonksiyonları optimize etmek için önerilen popülasyon tabanlı sezgisel bir algoritmadır. Ateş böceği sürü optimizasyon yöntemi, ateş böceklerinin sosyal davranışları gözlemlenerek ve taklit edilerek geliştirilmiştir. Bu yöntemi kullanmanın temel amacı tüm yerel maksimumları yakalamayı sağlamaktır. Çok modellenli fonksiyon optimizasyon problemlerinde, ateş böceği sürü optimizasyonu ve önceki yaklaşımlar arasındaki en önemli fark, birden çok zirveyi verimli bir şekilde yerleştiren sürüdeki bireylerin kullandığı dinamik karar alanıdır. Sürüdeki her bir birey komşularını seçmek

için karar alanını kullanmaktadır ve komşularından aldığı sinyal gücüyle hareketlerini belirlemektedir. Ateş böceğinin eşlerini veya avlarını çekmek için kullandığı ışığının yanıp sönmeye neden olan ışık üreten hücreler oksijen ve "lusiferaz" adlı bir kimyasalla reaksiyona giren "lusiferin" adlı bir kimyasaldır. Bir ateş böceği ne kadar parlak olursa diğer ateş böcekleri için o kadar çekici olmaktadır. Ateş böceği algoritması, tropikal iklim bölgelerindeki ateş böceklerinin sosyal davranışlarını baz alan bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma diğer sürü zekâsı tabanlı algoritmalarla birçok benzerliği bulunmasına rağmen kavram ve uygulamada daha basittir. Bir ateş böceğinin ışıklarını yakıp söndürmesinin birinci amacı, diğer ateş böceklerini çekmek için bir sinyal sistemi olarak kullanmasıdır. Araştırmacılar, yanıp sönen ışıkların ateş böceğine, arkadaşlarını bulmada, olası avlarını çekmede ve avcılarından kendilerini korumada yardımcı olduğunu düşünmektedirler. Algoritmanın adlandırılması, algoritmanın oluşturulmasında model alınan ateş böceklerinden gelmektedir. Ateş böceklerinin tek cins olması ve birbirlerini çekmeleri algoritmanın temelini oluşturur.

Ateş böceği algoritmasında, verimli optimum çözümler elde etmek için, verilen bir optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu, ateş böceği sürüsüne parlak ve daha çekici yerlere gitmede yardım eden yanıp sönen ışık ya da ışık şiddeti ile ilişkili olmaktadır. 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. Yani bir ateş böceği ne kadar parlak olursa diğer ateş böcekleri için o kadar çekici hale gelmektedir. 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, ateş böceği sürüsüne parlak ve daha çekici yerlere gitmede yardım eden yanıp sönen ışık ya da 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. Her ateş böceği kendine ait bir pozisyona sahiptir. Ateş böceği algoritmasında, her bir ateş böceği ilk olarak rastgele konumlara yerleştirilir. Bu başlangıç konumu denklemi (3.7)'de verilmiştir.

$$x_i^0 = X_{min} + r(X_{maks} - X_{min}) \quad (3.7)$$

$r$  değerinin tespiti için 0 ile 1 arasındaki sayılar içinden rastgele seçme uygulamasından faydalanılır.  $X_{min}$  1 e eşittir ve  $X_{maks}$  değişken seti içindeki toplam değer sayısıdır.

İkinci adım: Ateş böceklerinin değerlerinin belirlenmesi: Tasarım uzayında her  $x_i^t$  konum değeri için  $f(x_i^t)$  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  $a_i^t$  ve ateş

böceğinin global optimum konumu  $a_g^t$  güncellenir.

Dördüncü adım: Her bir Ateş böceğinin konumunun güncellenmesi: Her bir ateş böceğinin konumu güncellenir. 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 (3.8) (Yang 2013) yardımıyla hesaplanır.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha_t \varepsilon_i^t \quad (3.8)$$

Buradaki  $x_i^{t+1}$  ifadesi  $i$ 'nci ateş böceğinin  $t + 1$ 'nci adımdaki konumunu belirtmektedir.

---

**begin**

*Amaç fonksiyonu  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$*

*Ateş böceklerinin başlangıç popülasyonu  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$*

*$x_i$  deki ışık şiddeti  $I_i$   $f(x_i)$  tarafından belirlenir.*

*$\gamma$  ışık emme katsayısı*

**while** (o andaki iterasyon sayısı =  $t <$  maksimum iterasyon)

**for**  $i = 1 : n$  (bütün ateş böcekleri  $n$ )

**for**  $j = 1 : i$  (bütün ateş böcekleri  $n$ )

**if** ( $I_j > I_i$ )

*$L$ 'evy flights vasıtasıyla  $j$  den  $i$  ye doğru hareket eder.*

**end if**

*$\exp[-r^2]$  aracılığıyla  $r$  mesafesiyle çekicilik değişir.*

*Yeni sonuçları değerlendirme ve ışık şiddetini yenileme*

**end for**  $j$

**end for**  $i$

*Ateş böceklerinde kademe ve mevcut en iyiyi bulmak*

**end while**

*İşlem sonrası sonuçlar ve görselleştirme*

**end**

---

**Şekil 3.2.** Ateş böceği optimizasyon algoritması

Ateş böceği algoritmasında, iki önemli husus vardır. Bunlar; ışık şiddetinin değişimi ve çekiciliğin formülasyonudur. Kolaylık olması açısından ateş böceğinin kendi çekiciliğini kodlanmış amaç fonksiyonu ile ilişkilendirilmiş parlaklıkla belirlediği varsayabilir. Ateş böceklerinin aralarındaki mesafe, parlaklığı azalttığı için cazibeyi de azaltmaktadır. Bu değer birçok uygulamada Gaussian formu kullanılarak tahmin edilebilir.



61 elemandan oluşan çelik ızgara sisteminin minimum ağırlık tasarımı Tablo 2’de verilmiştir. Ateş böceği algoritması 28121 iterasyon sonucunda birinci grup için W150×13.5, ikinci grup için W150×13.5, üçüncü grup için W410×46.1, dördüncü grup için W410×38.8, beşinci grup için W250×17.9, altıncı grup için W250×17.9, yedinci grup için W1500×13.5 ve sekizinci grup için ise W250×17.9 kesitlerini seçerek ızgara sistem ağırlığını 453.14 kg olarak bulmuştur. Bulunan ağırlıkta ızgara sistemde belirlenen düğüm noktalarında oluşan maksimum deplasman 2.2 mm, dayanım sınırlayıcısı oranı ise 1.00 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, dayanım sınırlayıcılarının tasarım örneği için daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 2’de üç farklı yöntem için elde edilen minimum ağırlıklar kıyaslandığı zaman partikül küme yöntemi 486.12 kg ağırlık ile en kötü performansı sergilemiştir. Harmoni arama yöntemi partikül küme yönteminden %6.84 daha hafif olacak şekilde 454.98 kg ağırlık bulmuştur. Ondülin gövdeli kirişlerin optimum boyutlandırılmasında kullanılan ateş böceği algoritması ise 453.14 kg ile partikül küme yönteminden %7.28 daha hafif 61 elemanlı çelik ızgara sistemi boyutlandırılmasındaki en optimum yöntem olarak öne çıkmıştır.

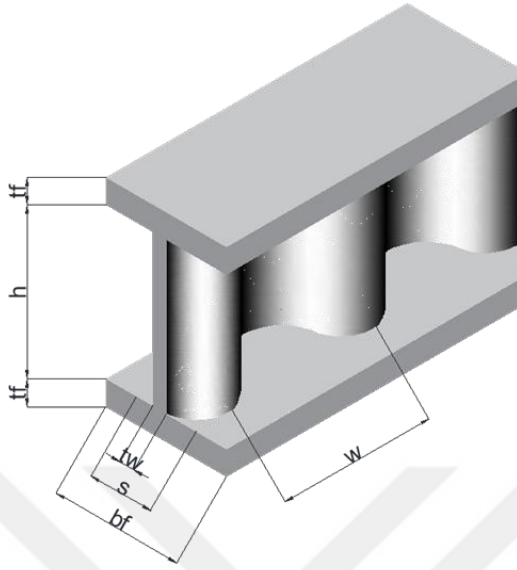
**Çizelge 3.2.** 61 elemanlı konsol ızgara sisteminin optimum boyutlandırması

Yöntem	Optimum W-kesiti		$\delta_{\max}$ (mm)	Maximum Dayanım Oranı	Minimum Ağırlık (kg)
	Grup No.				
Partikül Küme (PSO)	1	W250X25.3	1.6	0.83	486.12
	2	W250X25.3			
	3	W410X60			
	4	W410X46.1			
	5	W250X17.9			
	6	W250X17.9			
	7	W130X28.1			
	8	W310X21			
Harmoni Arama (HS)	1	W150X13.5	2.1	1.00	454.98
	2	W150X13.5			
	3	W410X46.1			
	4	W410X38.8			
	5	W310X21			
	6	W200X15			
	7	W150X13.5			
	8	W250X17.9			
Ateş Böceği Algoritması (FFO)	1	W150X13.5	2.2	1.00	453.14
	2	W150X13.5			
	3	W410X46.1			
	4	W410X38.8			
	5	W250X17.9			
	6	W250X17.9			
	7	W1500X13.5			
	8	W250X17.9			

### 3.1.3. Optimum boyutlandırma probleminin matematiksel modeli

Geometri ve notasyonları Şekil 3.4’te detaylı olarak gösterilen minimum ağırlıklı

sinüs eğrisi fonksiyonlu çelik ondülin gövdeli kirişlerin optimum boyutlandırılması probleminde tasarım değişkenleri aşağıdaki gibi alınır:



**Şekil 3.4.** Tasarım değişkenlerinin OGK üzerinde gösterimi

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

Tanımlanan değişken kümesinde,  $I_1$  çelik alt ve üst başlık plakasının genişliğinin,  $I_2$  çelik flanş plakasının kalınlığının,  $I_3$  çelik ondülin gövdenin kalınlığının,  $I_4$  gövdenin sinüs eğrisi şeklinde dalga boyunun ve  $I_5$  ise gövde derinliğinin sıra numarasını tanımlar. Amaç, OGK'in ağırlığını minimize etmektedir. Çelik sinüs eğrisi fonksiyonlu ondülin gövdeli kirişin ağırlığı  $W_{CWB}$  olarak gösterilirse, amaç fonksiyonu denklem (3.14) gibi olacaktır.

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

Burada,  $\rho_s$  çeliğin özgül ağırlığını,  $b_f$  başlık genişliğini,  $t_f$  başlık 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 boyutlandırmasında 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 (3.16) sağlayacak şekilde ifade edilmiştir.

$$333mm \leq h \leq 1500mm \quad (3.15)$$

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

$$120mm \leq b_f \leq 450mm \quad (3.17)$$

$$6,0mm \leq t_f \leq 30,0mm \quad (3.18)$$

### 3.1.3.1. Dalgalı gövde bölgesi için davranış sınırlayıcıları

Sinüs eğrisi fonksiyonlu çelik ondülin gövdeli kirişlerin burkulma katsayılarının düşük olmasının yanı sıra lokal ve global eğilmeler arasındaki etkileşimin dalgalı gövdede oluşmaması yüzünden bu kirişlerin gövde kısmının taşıma kapasitesi için literatürdeki trapez formlu kirişlerden farklı tasarım sınırlayıcıları dikkate alınır. Dalgalı gövde plakaların rijitlikleri için;

$$D_x = \frac{E w t^3}{12 s} \text{ ve } D_y = \frac{E I_y}{w} \text{ olmak üzere } D_x \leq D_y \quad (3.19)$$

Dalgalı gövdenin enine burkulması için;

$$\tau_{EG} = \frac{162}{5 t_w h^2} \sqrt{D_x D_y^3} \quad (3.20)$$

Dalgalı gövdenin narinlik parametresi için;

$$\lambda_{GN} = \sqrt{\frac{f_y}{\sqrt{3} \tau_{EG}}} \quad (3.21)$$

Dalgalı gövdenin burkulma katsayısı için;

$$K_B = \frac{1}{(\lambda_{GN})^{1,5}} \quad (3.22)$$

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

$$V_{TK-MAKS} = \frac{K_B f_y h t_w}{\sqrt{3}} \quad (3.23)$$

Dalgalı gövde için. (3.24) eşitsizliğindeki sınırlayıcı; yük etkisiyle oluşacak ( $P_v$ ) kiriş kesitinin maksimum enine yük taşıma kapasitesi  $V_{TK-MAKS}$  aşmamasını sağlar.

$$V_{TK-MAKS} - P_v \leq 0 \quad (3.24)$$

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.

$$V_D = \gamma_F V \leq V_{RD} \quad (3.25)$$

### 3.1.3.2. Alt ve üst başlık bölgeleri için davranış sınırlayıcıları

Çelik sinüs eğrisi fonksiyonlu ondülin gövdeli kirişlerin normal kuvvet altında başlık (flaş) bölgelerinde oluşacak taşıma kapasitelerini hesaplamak amacıyla çekme ve basınç gerilmeleri ayrı ayrı dikkate alınır. Flaşların izin verilen çekme gerilmesi

aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$\sigma_{ALLOW} = \frac{N_{T-MAKS}}{b_f t_f} \quad (3.26)$$

Basınç gerilmesi için flanşın burkulma riski de dikkate alınarak yük etkisi altında flanşda oluşacak lokal burkulma ile kiriş ekseninde oluşacak enine burkulma ayrı ayrı hesaba katılır. Yerel burkulma etkisinde elastik limit gerilmesi aşağıdaki ifade ile belirtilir.

$$\sigma_{EL} = \frac{4000}{(b_f t_f)^2} \quad (3.27)$$

Burada gövdenin elastik uzama etkisini hesaba katabilmek için, flanş genişliği dalgalı gövde yüksekliğinin yarısı kadar azaltılıp plaka şeridinin genişliği ( $b$ ) hesaplanır. Bu değer eşitlik (3.28)'de belirtilen akma koşulları dikkate alınarak formülize edilmiştir.

$$f_y = 240 \text{ MPa için } b \geq 12,9 t_f \quad (3.28)$$

$$f_y = 355 \text{ MPa için } b \geq 10,5 t_f$$

Sonuç itibariyle flanşlardaki normal kuvvet eşitlik (3.29)'deki gibi alınır.

$$N_{NORMAL} = \sigma_{EL} b_f t_f \quad (3.29)$$

Alt ve üst flanşların kritik boyutları belirlenirken normal kuvvet yük taşıma kapasitesi dikkate alınır. Burada,  $A$  flanşların toplam kesit alanını,  $A_G$  tek bir flanşın kesit alanını,  $z$  ise flanşların ağırlık merkezleri arası mesafeyi ifade eder.

$$N_G = N_{NORMAL} \frac{A_G}{A} \pm \frac{M}{z} \quad (3.30)$$

Flanşlarda meydana gelebilecek yanal burkulma eşitlik 3.31 ile hesaplanır.

$$\tau_{EG} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \sqrt{E f_y} \frac{b_f^2 t_f}{k_c c} \quad (3.31)$$

Bu eşitlikte,  $k_c$  basınç kuvvet faktörünü,  $c$  yanal destekler arası mesafeyi ifade eder. Basınç gerilmesi durumunda flanşın yük taşıma kapasitesi yukarıda gösterilen (3.27-31) eşitliklerin arasından minimum olanına göre hesaplanır.

### 3.1.4. Ondülin gövdeli kiriş için bilgisayar uygulamaları

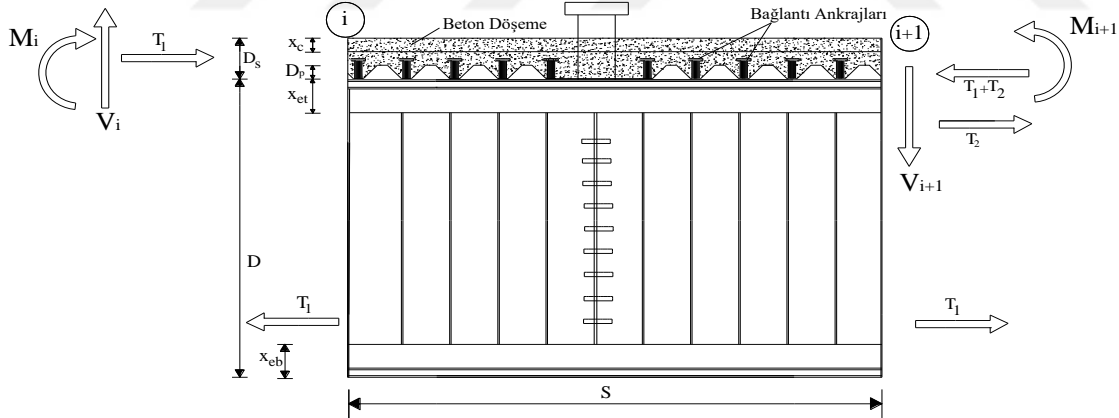
OGK'lerin optimum boyutlandırma problemlerinin çözümü amacıyla bilgisayar programlama dillerinden faydalanılmıştır. Stokastik optimizasyon tekniklerinin minimum ağırlığı bulma işleyişi içerisinde var olan iterasyonlar hazırlanan kodlar ile otomatik hale getirilmiştir. Windows ortamında derlenen *VISUAL FORTRAN*

programlama dilinden faydalanılarak üretilen programların bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

- ⇒ 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.
- ⇒ Optimum boyutlandırma, çelik yapılar için şartnamelerce öngörülen tahkikler göz önüne alınarak gerçekleştirilebilir:
  - Eğilme ve aksel gerilme tahkikleri
  - Kiriş gövde burkulması
  - Maximum deplasman tahkiki
  - Narinlik oranı tahkiki
  - Kaynak hesabı
  - Kesme gerilmesi tahkiki

### 3.1.5. Ondülin gövdeli kompozit kiriş tasarımı

Minimum ağırlıklı ondülin gövdeli kompozit kirişlerin optimum boyutlandırılma probleminde çelik kirişler için elde edilen optimum parametre değerleri aynen alınmış olup bunlara ilave olarak Şekil 3.5'te gösterildiği gibi beton kalınlığı ve bağlantı ankrajları sayısı da tasarım değişkeni olarak kabul edilmiştir. Bu yöntemle optimum boyutlandırılan OGK'lerin yapı içerisindeki davranışları hem deneysel olarak hem de nümerik olarak incelenmiştir.



Şekil 3.5. Sinüsoidal gövdeli kompozit kirişe etkiyen iç kuvvetler

Betonun basınç gerilmesine, alt başlığın çekme gerilmesine maruz kaldığı durum olarak ifade edilen pozitif moment altında sinüs eğrisi fonksiyonlu ondülin gövdeli kompozit kirişlerin tasarım moment direnci  $M_{RD}$  aşağıdaki gibi belirlenir. Bu tez çalışması kapsamında sadece tam kompozit kesitler incelenecektir.

Farklı yüklemeler altında eleman bazında yük taşıma kapasiteleri hesaplanmış olan çelik OGK\_330, OGK\_415 ve OGK\_500 kirişleri için EC4, BS-5950 Part-3, Bölüm

3-1 koşullarına göre etkin döşeme uzunlukları ve bağlantı ankrajları (stud çivisi) hesapları yapılmıştır.

$$b_{eff} = \frac{l_0}{4} = \frac{470 \text{ cm}}{4} = 117,5 \text{ cm} \quad (3.32)$$

$$R_S = 0,95 f_y A_a \quad (3.33)$$

Yukarıdaki eşitliklerde;  $b_{eff}$  etkili beton genişliğini,  $l_0$  kiriş açıklığını ifade eder.

$$R_C = 0,45 f_{cu} b_{eff} h_c \quad (3.34)$$

Eşitlik (3.34)'da;  $R_c$  beton basınç kuvvetini,  $h_c$  beton döşeme ile OGK arasında bağlantısacın üstündeki beton kalınlığını,  $A_a$  ise çeliğin alanını,  $h$  çelik kesitin yüksekliğini,  $h_p$  sacın tırnaklarındaki beton kalınlığı tanımlar. Plastik nötr eksen çelik kirişin üst flanşında ise moment;

$$M_{pl,Rd} = R_S \frac{h}{2} + R_C \left( \frac{h_c}{2} + h_p \right) \quad (3.35)$$

Eşitlik (3.36), (3.37) ve (3.38)'de; ondülin gövdeli kompozit kiriş testleri için gerekli stud çivilerin hesapları bulunmaktadır. Bu eşitliklerde;  $f_u$  stud çivilerinde kullanılan çeliğin maksimum çekme gerilmesini,  $h$  bağlantı ankrajı yüksekliğini,  $d$  stud çivisinin çapını,  $\gamma_v$  güvenlik katsayısını ve  $\alpha$  ise sabit katsayı olarak ifade edilir.

$$P_{Rd} = 0,29 a d^2 \frac{\sqrt{f_{ck} E_C}}{\gamma_v} \quad (3.36)$$

$$P_{Rd} = 0,8 f_u \frac{\pi d^2}{4 \gamma_v} \quad (3.37)$$

$$\alpha = 0,2 \left( \frac{h}{d} + 1 \right) \leq 1 \quad (3.38)$$

Eşitlik (3.35) yük taşıyan kompozit kirişlerdeki bağlantı ankrajlarına gelen toplam kesme kuvvetini hesaplamak için kullanılır. Bu eşitlikte  $A_p$  çelik profil kesit alanını,  $B_S$  döşeme genişliğini,  $d_s$  çelik profil ile betonarme döşemenin ağırlık merkezleri arası mesafeyi,  $L_V$  kesme açıklığını ifade etmektedir. Burada  $m_p$  ve  $k_r$  ise ampirik parametrelerdir. OGKK'ler tam kompozit olarak tasarlandığı için bu parametreler dikkate alınmamıştır.

$$V_s = \frac{B_S d_s}{1,25} + \left( \frac{m_p A_p}{B_S L_V} + k_r \sqrt{f_{cu}} \right) \quad (3.39)$$

Şekil 3.6a ve b bağlantı ankrajlarının yapı sektöründeki uygulamasını göstermektedir. Yapı sektöründe bağlantı ankrajları kendi özel tabancası kullanılarak uygulanmaktadır. Bu cihaz yüksek amperlerde milisaniyeler içinde montaj yapmaktadır.

OGKK testlerinde laboratuvar koşulları göz önüne alınarak bağlantı ankrajlarının çelik kiriş üst başlığına kaynaklanmasında sanayi tipi kaynak makinesi kullanılmıştır. Bu sebeple OGKK'lerin fabrikasyon sürecinde tasarımdan elde edilen bağlantı ankraji sayısından daha fazla bağlantı ankraji kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.6. a) Bağlantı ankraji uygulaması; b) Bağlantı ankraji

### 3.2. Deneysel Çalışma

Belirli koşullar ve yükler altında minimum ağırlığı verecek şekilde optimum boyutlandırılan sinüsoidal gövde formuna sahip çelik ve kompozit OGK'lerin kapasiteleri hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar ortamında nümerik olarak incelenmiştir. Fabrikasyon süreci sonucunda üretimleri yapılan OGK'lerin yapı laboratuvarında farklı yükleme koşulları altında tekrarlı testleri yapılmıştır. Bir sonraki bölümde ise deneysel ortamda testler sonucu yük taşıma kapasiteleri belirlenen bu kirişlerin sonlu elemanlar analizleri *ANSYS-Workbench* programı ile birebir modelleri oluşturularak simülasyonları yapılmıştır.

#### 3.2.1. Ondülin gövdeli kirişlerin kapasitelerinin belirlenmesi

##### 3.2.1.1. Ondülin gövdeli kirişlerin fabrikasyon süreci

Stokastik yöntemlerle optimizasyonu yapılan ondülin gövdeli kirişlerin fabrikasyon sürecinde ilk olarak düz ince sac şeklindeki gövde CRM (Computer Rolling Machine) yöntemi ile sinüs fonksiyonu şeklinde dalgalı soğuk haddeli ince bir gövdeye dönüştürülmesi planlanmıştır (Şekil 3.7a). İkinci aşamada düz çelik plaka şeklindeki alt ve üst flanşlar ile dalga şeklindeki oluklu gövde her iki taraftan full penetrasyonlu kaynakla birleştirilmesi (Şekil 3.7b) şeklinde yapılması planlanmıştır.



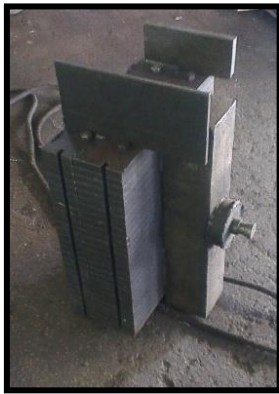
(a)



(b)

**Şekil 3.7.** a) CRM yöntemi ile gövdenin dalgalı hale getirilmesi ve; b) Başlıklar ile kaynaklanması

Optimizasyon sonucunda belirlenen geometrik ölçülere sahip olan kirişlerin ülkemizde bu kalınlıktaki sacları istenilen CRM yöntemi ile dalgalı forma getirebilen tek firma olan Zeman Çelik Yapı İnşaat Sanayi ve Ticaret AŞ'den temin edilmesi planlanmıştır. Fakat, yukarıda adı geçen firmanın CRM cihazını bazı aksaklıklardan dolayı Lüksemburg'a göndermesi ve üretimine orada devam etmesi nedeniyle projemizin sınırlı bütçesi göz önüne alınarak yerel imkânlarla ondülin gövdeli kirişler için kalıp tasarımı yapılmıştır. Gövdelerin optimum boyutlandırma sonuçlarından elde edilen geometrik ölçülerde ondülin forma getirilmesi işi Antalya Sanayi Sitesi'nde faaliyet gösteren Bilge Makine AŞ'ye yaptırılmıştır. Bilge Makine AŞ'ye yaptırılan ısıl işlem görmüş kalıbın fotoğrafları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8.** Gövdenin ondülin forma getirilmesi için hazırlanan kalıp

Yaklaşık 6 metre uzunluğundaki düz levhalar mukavemet özelliklerini kaybetmeden yukarıda resimleri gösterilen ısıl işlem görmüş kalıp cihazı ile dalgalı forma getirilmiştir.



(a)

(b)

**Şekil 3.9. a) Gövdenin ondülin forma getirilmesi; b) Elde edilen ondülin gövde**

Düz çelik gövde ondülin forma getirilirken dalgalı formun sinüs eğrisine fonksiyonuna hesaplarda olduğu gibi uygun olmasına dikkat edilmiştir. Kaynak işlemleri sırasında kirişin gövdesinde eğilme olmaması için her iki parçayı birbirine tutturacak sabitleyiciler kullanılmıştır. Altı metre uzunluğunda düz levhalar organize sanayi sitesinde yukarıda kalıp tasarım şekilleri gösterilen şekilde işlenerek belirtilen ölçülerde sinüs eğrisi şeklinde ondülin hale getirilmiştir. (Şekil 3.9).

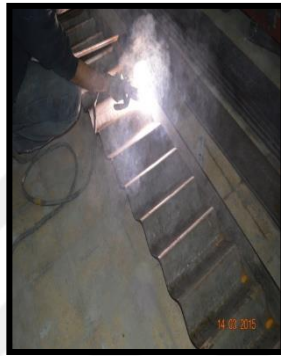
Hazırlanan ondülin formdaki gövde levhalarını yerden yükseltmek amacıyla tezgah üzerine konulmuştur. Böylece kaynakla birleştirilmek üzere yanlarına dikilecek olan başlıkların geometrik merkezi ile ondülin gövdenin merkezi çakıştırılmıştır. Kaynak esnasında kaynağın çekmesinden dolayı gövde flanşın ekseninden kaymaması için mingenelerle birbirine tutturulmuş ve gövdenin sinüs eğrisinin tepe ve çukur noktalarına her iki noktalarına simetrik noktasal kaynaklar atılmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra kaynak makinesi 150 Amper'e ayarlanarak ve 4 mm'lik elektrotlar (kaynak ucu) kullanılarak ondülin gövdeli çelik kirişlerin full penetrasyonlu kaynakla birleşim işlemi tamamlanmıştır. Birleşim işlemi tamamlanan çelik kirişlerin fazlalıkları taşlama işlemine tabi tutularak düzeltilmiştir. Kaynağı ve taşlaması yapılan kirişlerin paslanmaması ve deneyleri yapılacak olan bu kirişlerin göçme modlarının daha rahat gözlemlenebilmesi amacıyla antipas boya ile boyanmıştır. Ondülin gövdeli çelik kirişlerin laboratuvar ortamındaki üretim süreci içinde olan sabitleme puntolama full penetrasyonlu kaynak süreçleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

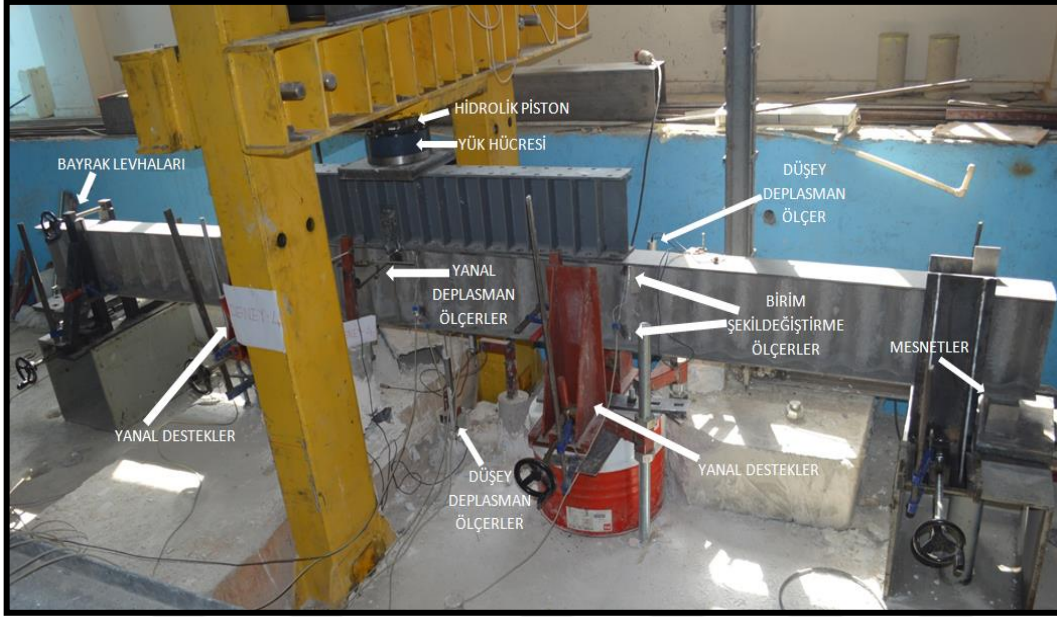


(d)

**Şekil 3.10.** a) Gövde ve başlıkların mengenerlerle birbirine tutturulması; b) Noktasal kaynakların atılması; c) Full penetrasyon kaynaklama; d) Antipas boya ile boyanması

### 3.2.1.2. Ondülin gövdeli kirişlerin eleman bazında testleri

OGK'ların uzunlukları bu kirişlerin açıklıkları geçebilme potansiyelleri düşünülerek 5 metre olarak alınmıştır. Kirişlerin üzerinde yapılan bu testlerin deneysel amaç taşıması için her bir kiriş için en az iki tekrar yapılacak şekilde testlere başlanmıştır. Bu kapsamda, ondülin gövdeli çelik kirişler için optimizasyon programından elde edilen sonuçlara göre değişkenlik gösterecek şekilde gövde yükseklikleri 300 mm, 415 mm ve 500 mm olan; gövde kalınlıkları farklı üç farklı yapma kirişin eleman bazında tekil yük altında altı (6), iki noktasal yük altında altı (6) ve yayılı yük altında altı (6) olmak üzere toplamda on sekiz (18) farklı eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Yapılacak olan deneylerde ince ve narin gövde kısmından dolayı oluşabilecek yanal burkulmayı önlemek amacıyla belirli aralıklarla yanal destek payandaları Şekil 3.11'deki örnek test düzeneğinde görüldüğü üzere yerleştirilmiştir.



Şekil 3.11. Yanal desteklenmiş ondülin gövdelerin kiriş test düzeneği

### OGK\_330 Üzerinde Tekil Yükleme Durumu

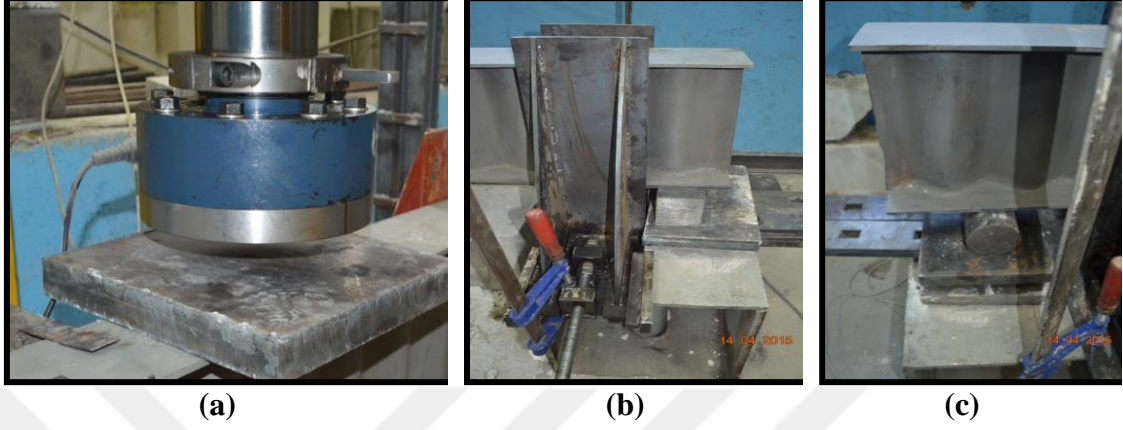
Ondülin gövdeli çelik kirişlerin tekil yük altında yanar destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeni Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Ondülin gövdelerin kiriş test tekil yükleme durumu

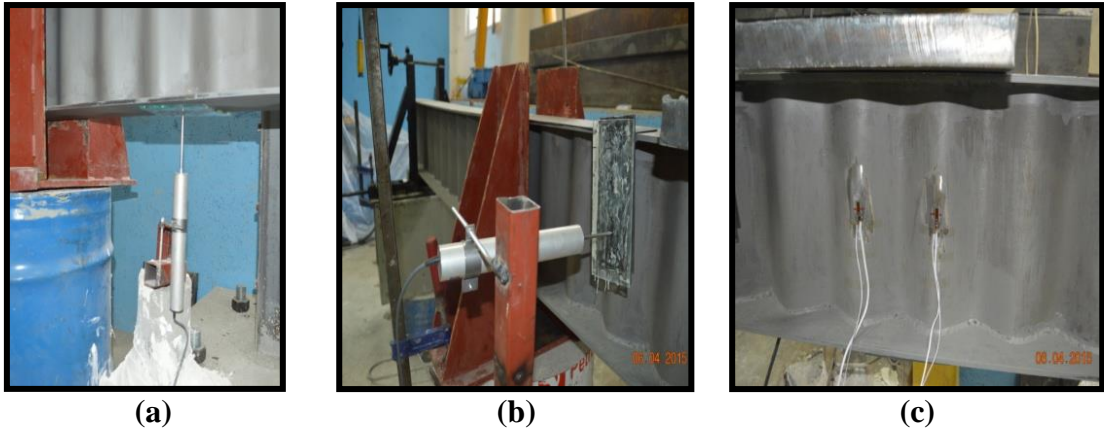
Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston 5 metre uzunluğundaki kirişin tam ortasından etki etmektedir. Kirişe etki edecek

yükün daha hassas değerlerle okunması amacıyla hidrolik pistonla kalibrasyonu yapılmış 100 ton kapasiteli yük hücresi (load cell) monte edilmiştir (Şekil 3.13a). Ondülin gövdeli kiriş, bir ucu sabit diğer ucu hareketli mesnetlerin üzerine eksantrik bir yükleme olmaması dikkat edilerek yerleştirilmiştir (Şekil 3.13b-c).



Şekil 3.13. a)Yük hücresi; b) Sabit mesnet; c) Hareketli mesnet

Tekil yükleme durumunda ondülin gövdeli kirişte oluşacak düşey deplasmanları ölçmek amacıyla açıklık ortasında ( $L/2$ ), mesnetten itibaren  $L/4$  ve  $3L/4$  mesafelerinde alt flanşın altına (Şekil 3.14a) yine açıklık ortasında üst flanşa entegre olacak şekilde deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Kirişte yanıl desteklere rağmen oluşabilecek yanıl deplasmanlar için de açıklık ortasında üst flanşa yanıl deplasman ölçerler (Şekil 3.14b)'de olduğu gibi yerleştirilmiştir. Kirişin sinüs eğrisi şeklindeki ondülin gövdesinde oluşacak gerinimleri ölçmek amacıyla kiriş orta bölgesindeki dalga tepe ve çukur noktalarına gerinim ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 3.14c).



Şekil 3.14. a) Düşey deplasman ölçer; b) Yatay deplasman ölçer; c) Gerinim ölçerlerin yükleme sisteminde gösterimi

### OGK\_330 Üzerinde İki Noktadan Yükleme Durumu

OGK'lerin iki noktasal yük altında yanıl destekli olarak yükleme çerçevesindeki

deney düzeneği Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. OGK testi iki noktadan yükleme durumu

Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston 5 metre uzunluğundaki kirişe yük dağıtan berkitmeli kiriş ve altındaki roller'lar aracılığıyla her iki mesnetten 1.6 metre mesafede olmak üzere etki etmektedir. İki noktasal yükleme durumunda ondülün gövdeli kirişte oluşacak düşey deplasmanları ölçmek amacıyla açıklık ortasında ( $L/2$ ), her iki mesnetten itibaren ( $L/4$ ) mesafelerde alt flanşın altına, açıklık ortasında üst flanşa entegre olacak şekilde deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Kirişte yanıl desteklere rağmen açıklıkta oluşabilecek yanıl deplasmanlar için de açıklık ortasında üst flanşa yanıl deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Kirişin sinüs eğrisi şeklindeki ondülün gövdesinde oluşacak gerilme dağılımlarını ölçmek amacıyla orta noktasında dalga tepe ve çukur noktalarının yanı sıra iki noktasal yükün uygulandığı gövde kısımlarının dalga ve çukur noktalarına da gerinim ölçerler yerleştirilmiştir.

Optimum boyutlandırma işlemi yapılırken yanıl burkulmanın engellendiği varsayımı üzerine tasarım yapılmıştır. Bundan dolayı yük altında yanıl burkulmayı tamamen engellemek amacıyla ondülün gövdeli kiriş testlerinde kiriş açıklığının  $L/3$  ve  $2L/3$  mesafelerindeki yanıl destekleri daha rijit hale getirmek için 10 cm çaplı çelik destek çubukları güçlü zemine ankrajlanarak destek bayrakları (Şekil 3.16)'de görüldüğü üzere çevrelenmiştir.



**Şekil 3.16.** OGK\_330\_Test\_3 sonrası bayrak levhalarının sabitlenmesi

### OGK\_330 Üzerinde Düzgün Yayılı Yükleme Durumu

Ondülin gövdeli çelik kirişlerin tekil ve iki noktadan yükleme durumlarından sonra farklı yük koşullarını oluşturmak amacıyla düzgün yayılı yük altında da testleri yapılmıştır. Daha sonra OGK'lerin yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



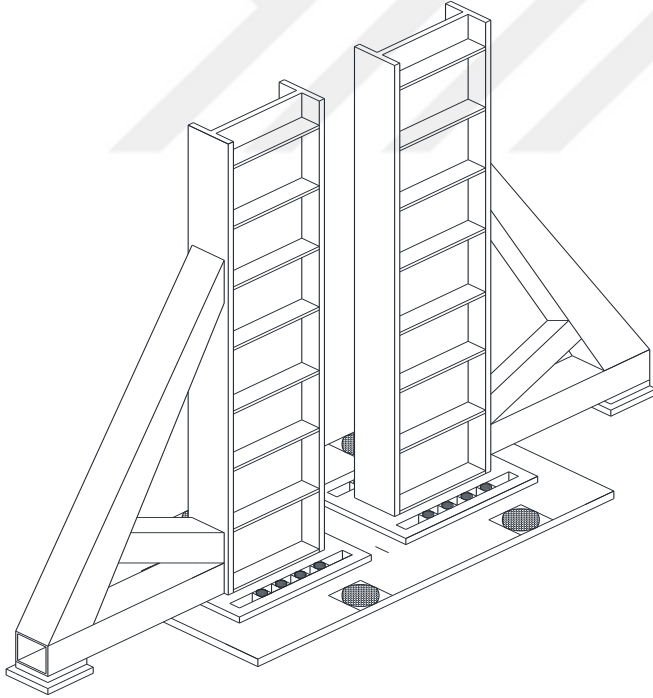
**Şekil 3.17.** Ondülin gövdelerin kiriş düzgün yayılı yükleme durumu

Düzgün yayılı yük koşulunda 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston standart 5 metre uzunluğundaki kirişe 1.8 metre uzunluğundaki yük dağıtan düşey berkitmelerle rijit hale getirilmiş kiriş aracılığıyla Şekil 3.17'de olduğu gibi etki etmektedir.. Düzgün yayılı

yüklemeye durumunda ondülin gövdeli kirişte oluşacak deplasmanları ölçmek amacıyla diğer kirişlerde olduğu gibi açıklık ortasında ( $L/2$ ), yük dağıtan kirişin başlangıç ve son noktalarına alt flanşın altına ( $L/4$  ve  $3L/4$ ), açıklık ortasında üst flanşa entegre olacak şekilde düşey deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Kirişte oluşabilecek yanal deplasmanlar için de açıklık ortasında üst flanşa yanal deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Kirişin sinüs eğrisi şeklindeki ondülin gövdesinde oluşacak gerilme dağılımlarını görmek amacıyla orta noktasında dalga tepe ve çukur noktalarının yanı sıra düzgün yayılı yükün uygulandığı gövde kısımlarının dalga ve çukur noktalarına da gerilim ölçerler yerleştirilmiştir.

### OGK\_415 ve OGK\_500 Üzerinde Yükleme Durumları

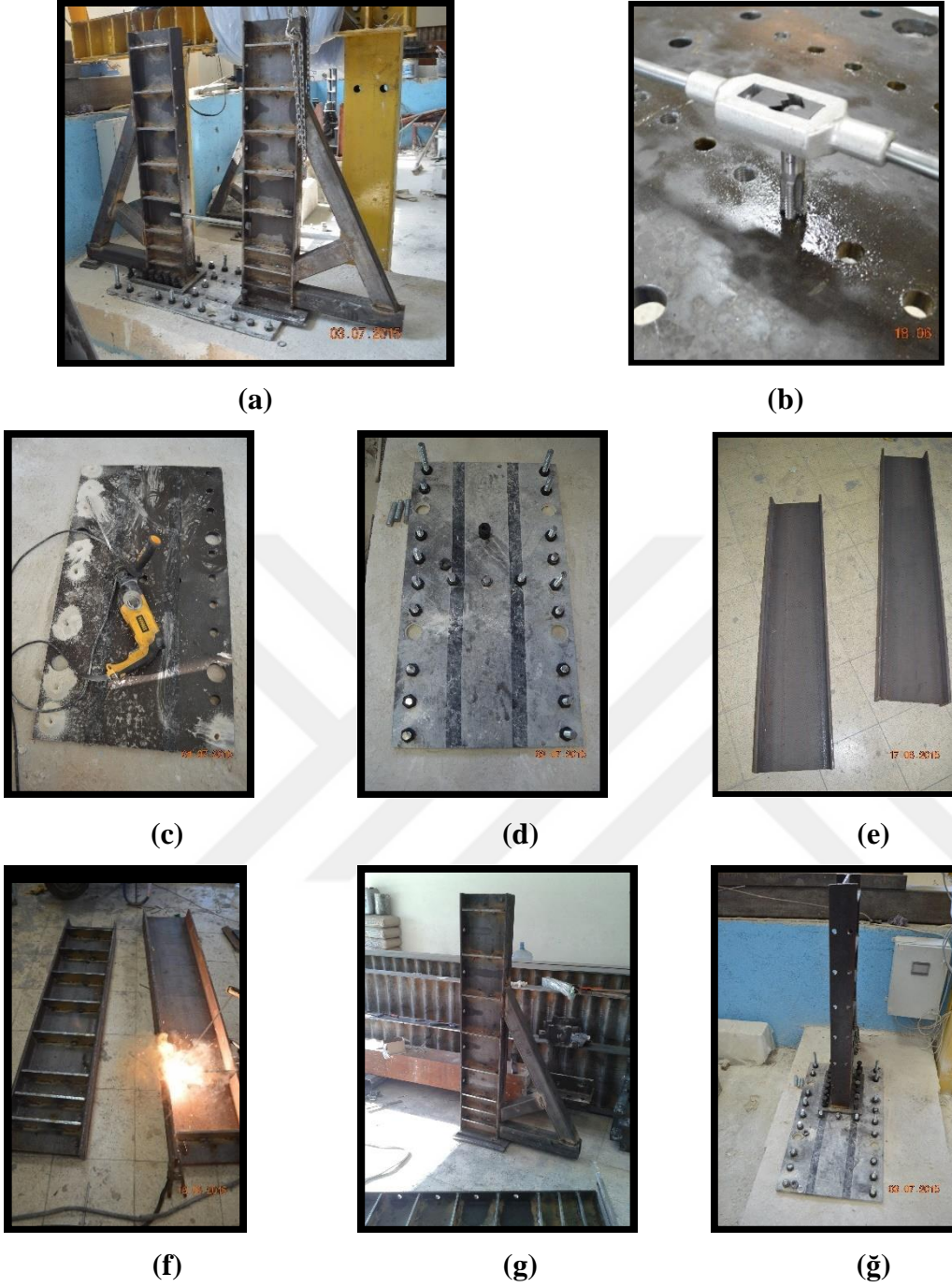
OGK'lerin optimum boyutlandırılması yapılırken çelik kiriş uygulamaları dikkate alınarak bu kirişlerin yanal deplasman yapmadıkları varsayılmış ve optimum boyutlandırma işlemleri bu varsayıma göre yapılmıştır. OGK\_330 ondülin gövdeli kirişler üzerine yapılan ilk altı testte mevcut bayrak levhalarının yanal burkulmayı engellemekte yapılan tüm rijitleştirme çabalarına rağmen yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Deney sürecinin daha sağlıklı işlenmesi açısından mevcut bayrak levhaları kaldırılarak yerine Şekil 3.18'de görülen yanal deplasman engelleyiciler tasarlanmıştır.



**Şekil 3.18.** OGK\_415 ve OGK\_500 çelik kiriş testleri için tasarlanan yanal deplasman engelleyici

Yeni yanal deplasman engelleyici üretiminde berkitme levhaları ile yatay kesme gerilmelerine karşı güçlendirilmiş IPN\_300 çelik profiller kullanılmıştır. IPN\_300 çelik profillerin başlık bölgelerine 10 mm'lik gijonlarla birbirlerine tutturulmak üzere yivli delikler açılmıştır. Yanal deplasman engelleyicilerin her genişlikteki çelik profilde kullanılabilmesini sağlamak üzere profillerin alt ucuna 3 cm kalınlığında slotlu levhalar kaynakla birleştirilmiştir. Sistemin yanal deplasman engellemek üzere daha etkin çalışmasını sağlamak amacıyla 100x100x5 mm'lik kutu profillerden yapılmış destekler IPN\_300 çelik profillere kaynak kullanılarak birleştirilmiştir. Sistemi yere sağlıklı bir şekilde sabitlemek için 5 cm kalınlığındaki çelik levhanın üzerine dört sıra yivli delikler açılmıştır. Levhanın yerleştirileceği zemine matkapla delikler açılmıştır. Daha sonra açılan bu deliklere epoksi yardımıyla 15 cm uzunluğunda 10 mm'lik gijonlar ankrajlanmıştır. Ankrajlanan bu gijonların üst kısımlarına takılan somunlar sıkılarak çelik levhanın yere montajı tamamlanmıştır. OGK\_415 ve OGK\_500 çelik kiriş testleri için hazırlanan yanal deplasman engelleyiciler Şekil 3.19'da verilmiştir.





**Şekil 3.19.** a) Yanal deplasman engelleyici; b) Taban levhasının deliklerine klavuz yardımıyla diş açma; c) Ankrāj uygulanacak olan zeminin matkapla delinmesi; d) Taban levhasının yere sabitlenmesi; e) Kullanılan IPN/300 çelik profiller; f) Profillere berkitme levhalarının kaynakılması; g) Kutu profillerden yapılan desteklerin kaynaklanması; ğ) Yanal deplasman engelleyicinin montajı

OGK\_415 ve OGK\_500 kirişlerinin tüm deney düzeneklerinde yeni yanıl deplasman engelleyiciler Şekil 3.20'de olduğu gibi kullanılmıştır.



**Şekil 3.20.** Ondülin gövdelerin kiriş test tekil yükleme durumu

### 3.2.2. Ondülin gövdeli kompozit kiriş deneyleri

OGK'lerin eleman bazında yapılan testlerinin ardından bu kirişlerin yapı içerisindeki davranışlarının daha kapsamlı araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda OGK tasarımına betonarme döşeme de eklenerek OGKK'lerin tek noktadan, iki noktadan ve yayılı yükler altındaki davranışları da test edilmiştir.

#### 3.2.2.1. Ondülin gövdeli kompozit kirişlerin fabrikasyon süreci

OGKK\_330, OGKK\_415 ve OGKK\_500 kirişleri için yapılan hesaplar sonrasında kompozit döşeme kirişlerinin kalıplarının hazırlanması ve stud çivilerinin kaynaklanması Şekil 3.21 a,b,c ve d'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 3.21.** OGK\_330, OGK\_415 ve OGK\_500 kompozit döşeme kirişlerinin kalıplarının hazırlanması

Kalıpları hazırlanan OGKK\_330, OGKK\_415 ve OGKK\_500 ondülin gövdeli kompozit kirişlerin donatılarının yerleştirilmesi ve beton dökülmesi işlemleri sırasıyla Şekil 3.22a, b ve c’de gösterilmiştir. Döşeme kirişlerinin deneysel sonuçlarının Sonlu Elemanlar Analizi yöntemi ile kıyaslanmasında kullanmak ve beton malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla Şekil 3.22d’de görüldüğü üzere dökülen betondan 3 adet silindir numunesi alınmıştır. Alınan numunelerdeki ortalama beton basınç dayanımları belirlenerek sonlu elemanlar analizinde veri olarak girilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.22. OGK\_330, OGK\_415 ve OGK\_500 döşeme kirişleri için beton dökümü

### 3.2.2.2. Ondülin gövdeli kirişlerin kompozit döşeme testleri

Eleman bazında olduğu gibi ondülin gövdeli kompozit döşeme kirişlerin üzerinde yapılan testlerin deneysel amaç taşınması için her bir döşeme kirişi için iki tekrar olacak şekilde testler yapılarak ortalamaları dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, OGKK\_330 döşeme kirişi için iki noktasal yük altında iki (2), OGK\_415 döşeme kirişi için düzgün yayılı yük altında iki (2) ve OGK\_500 döşeme kirişleri için tekil yük altında iki (2) olmak üzere toplamda altı (6) döşeme testi gerçekleştirilmiştir.

#### OGKK\_330 üzerinde iki noktasal yükleme durumu

Bölüm 3.1.5'te hesap detayları verilen OGKK\_330'un döşeme etkili genişliği 117,5 cm ve döşeme yüksekliği 8 cm olarak hesaplanmıştır. OGKK\_330 kompozit döşeme kirişlerinin iki noktasal yük altında yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston 5 metre uzunluğundaki kirişe yük dağıtan berkitmeli kiriş ve altındaki roller'lar aracılığıyla her iki mesnetten ( $L/3$ ) mesafede olmak üzere etki etmektedir. Roler'ların altında kompozit betonunun yükleme noktalarından lokal olarak ezilmesini engellemek amacıyla 37x37x3cm ebatlarında çelik levhalar kullanılmıştır. İki noktasal yükleme durumunda ondülin gövdeli kirişte oluşacak düşey deplasmanları ölçmek amacıyla açıklık ortasında ( $L/2$ ), her iki mesnetten itibaren ( $L/3$ ) mesafede

döşeme betonunun üstüne, açıklık ortasında döşeme betonunun üst yüzeyine entegre olacak şekilde düşey deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. OGK'in üst başlığı bağlantı ankrajları ile kompozit kiriş boyunca tutulacağından yanal deplasmanları ölçmeye ihtiyaç duyulmamıştır. Döşemelerle birlikte kirişin sinüs eğrisi şeklindeki ondülin gövdesinde oluşacak gerinim dağılımlarını görmek amacıyla orta noktasında dalga tepe ve çukur noktalarının yanı sıra iki noktasal yükün uygulandığı gövde kısımlarının dalga ve çukur noktalarına da gerinim ölçerler yerleştirilmiştir.



Şekil 3.23. OGK\_330 döşeme kirişleri üzerinde iki noktasal yükleme durumu

#### OGKK\_415 üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu

Bölüm 3.115 te döşeme yüksekliği 11 cm olarak hesaplanan OGKK\_415 kompozit döşeme kirişlerinin düzgün yayılı yük altında yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 3.24'de gösterilmiştir. Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston 5 metre uzunluğundaki kirişe 1.8 metre uzunluğundaki yük dağıtan düşey berkitmelerle rijit hale getirilmiş kiriş aracılığıyla etki etmektedir. Yük dağıtan düşey berkitmeli çelik kirişin kompozit kirişin döşeme betonuna daha sağlıklı bir şekilde temasını sağlamak ve böylece istenilen şekilde yükün aktarılmasını sağlamak amacıyla alçı kullanılmıştır. OGKK gövdesinde yükleme esnasında meydana gelen gerinimleri ölçmek amacıyla kullanılan gerimin ölçerlerin OGKK\_415 gövdesi üzerindeki pozisyonları OGKK\_330 kirişindeki gibi alınmıştır..



Şekil 3.24. OGKK\_415 üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu

### OGKK\_500 üzerinde tekil yükleme durumu

Bölüm 3.1.5'te döşeme döşeme kalınlığı 15 cm olarak hesaplanan OGKK\_500 kompozit döşeme kirişlerinin tekil yük altında deney düzeneği Şekil 3.25'da gösterilmiştir. Yükleme çerçevesine entegre edilmiş olan 100 ton kapasiteye sahip hidrolik piston 5 metre uzunluğundaki kirişin tam ortasından etki etmektedir. Kompozit döşemenin yükleme noktasından lokal olarak ezilmesini engellemek amacıyla 37x37x3cm ebatlarında çelik levha kullanılarak yük dağıtılmıştır. OGKK gövdesi üzerindeki gerinimleri ölçmek için kullanılan gerinim pulları da OGKK testlerinde olduğu gibi yerleştirilmiştir.

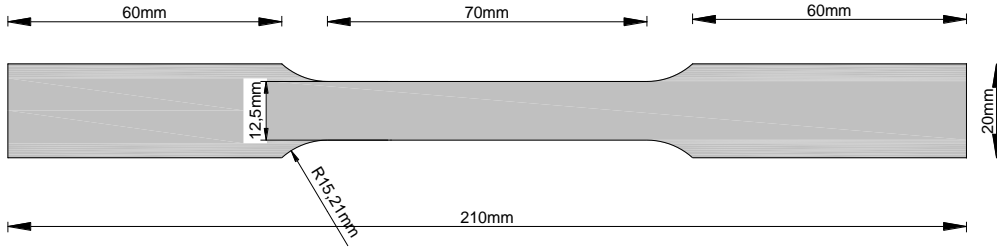


Şekil 3.25. OGK\_500 döşeme kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu

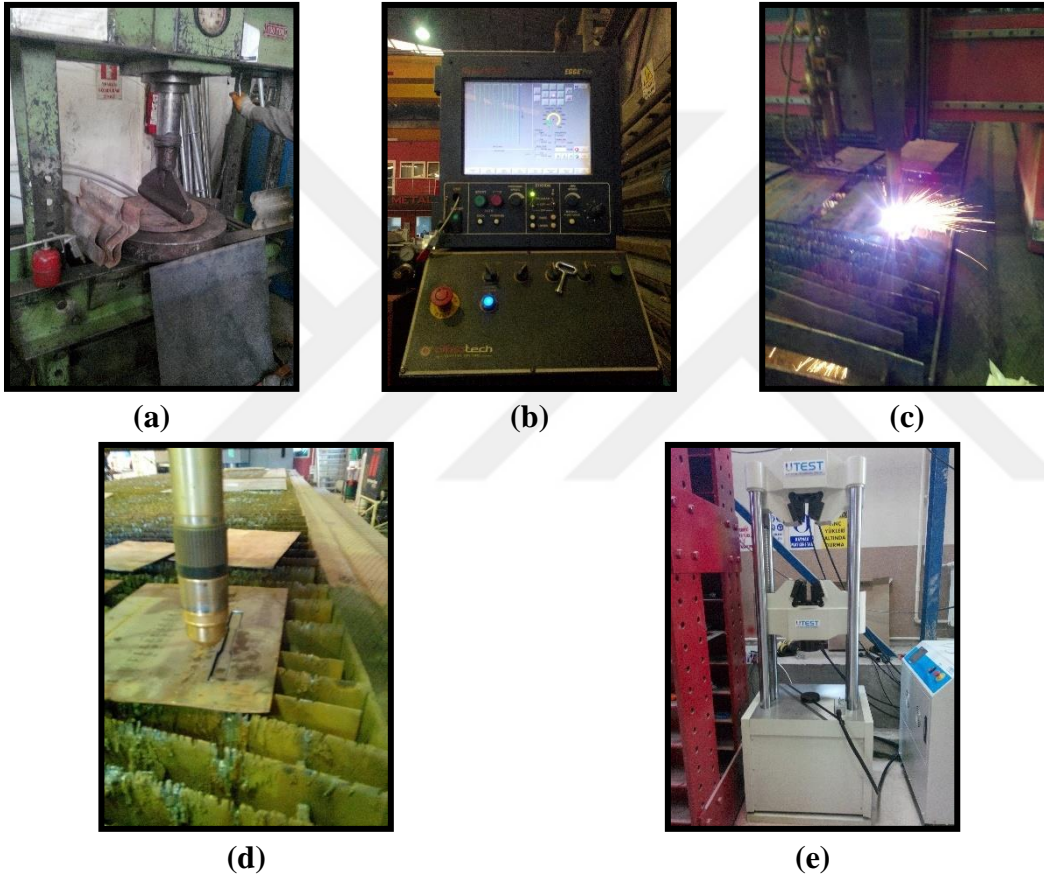
### 3.3. Optimum Boyutlandırılan OGK'lerin Malzeme Testleri

#### 3.3.1. Malzeme çekme dayanımları

Testleri yapılan optimum boyutlandırılmış ondülin gövdeli çelik kirişlerin malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla kupon çekme testleri yapılmıştır. Bu kapsamda OGK\_330, OGK\_415 ve OGK\_500 kirişlerinin her biri için kiriş gövde ve flanşlarından toplamda 6'şar adet olmak üzere toplam 18 adet kupon numunesi alınmıştır. Ayrıca OGKK'lerin üretimlerinde kullanılan hazır donatıdan da numune alınarak malzeme özelliklerine bakılmıştır. Maksimum gerilme, akma gerilmesi ve elastite modülü gibi nicelikler incelenmiştir. Bu amaçla deforme olmamış ve malzeme özelliğini kaybetmemiş ondülin gövde parçaları 50 ton'luk pres kullanılarak düzleştirilmiştir (Şekil 3.27.a). Düzleştirilen bu gövde parçaları CNC (Bilgisayar Nümerik Kontrol) yardımıyla sanayide American Society for Testing and Materials (ASTM) E 8M yönetmeliğine göre Şekil 3.26'da verilen geometride kestirilmiş (Şekil 3.27.b,c,d) ve son olarak da 600 kN'luk çelik çekme cihazında test edilmiştir (Şekil 3.27.e).



Şekil 3.26. ASTM standartlarına göre hazırlanan kupon geometrisi (mm)



Şekil 3.27. a) 50t'luk pres; b) CNC yazılım ekranı; c) CNS kesim işlemi  
d) Kesilen parça; e) Çekme test cihazı

### 3.3.2. OGKK'lerin malzeme basınç dayanımları

Kompozit kiriş testlerinden elde edilen verilerle sonlu elemanlar analizlerinden elde edilecek olan verilerin karşılaştırılmasının daha sağlıklı yapılabilmesi için, deneyleri simüle edilecek olan OGKK'lerin geometrilerinin sonlu elemanlar yazılımına aynı verilerle girilmesinin yanı sıra malzeme özelliklerinin de doğru şekilde modellenmesi oldukça önemlidir. Eleman bazında deneyleri yapılan OGK'lerin

fabrikasyon aşamasında kullanılan çelik malzeme ile OGKK'lerin malzemesi aynı özelliği taşımaktadır. OGKK döşemelerinin beton dökümü sırasında 3 adet silindir beton numunesi alınmıştır. SEA'nde kullanılmak üzere yapılan beton malzeme basınç deneyi Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.28. OGKK beton basınç deney düzeneği

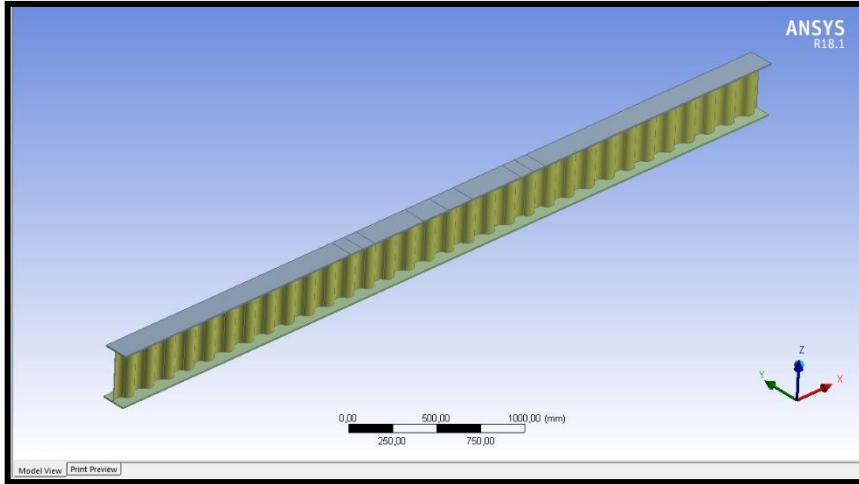
### 3.4. Nümerik Çalışma

#### 3.4.1. Ondülin gövdeli kirişlerin sonlu elemanlar analizleri

Ondülin gövdeli kirişlerin deneysel kısımda bulunan yük taşıma kapasitelerinin verifikasyonu amacıyla *ANSYS Workbench v18.1* programı yardımıyla sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Deneysel bölümde yükleme çerçevesinde testleri yapılan her bir kirişin orta noktasında bulunan maksimum düşey deplasman değerlerinin ortalaması alınarak *ANSYS-Workbench* programında lineer olmayan analizi yapılacak şekilde simüle edilmiştir. Bu sayede OGK'lerin taşıyabileceği nihai yükün yanı sıra kesme gerilmesi, maksimum gerilme ve normal gerilme değerleri hesaplanmıştır.

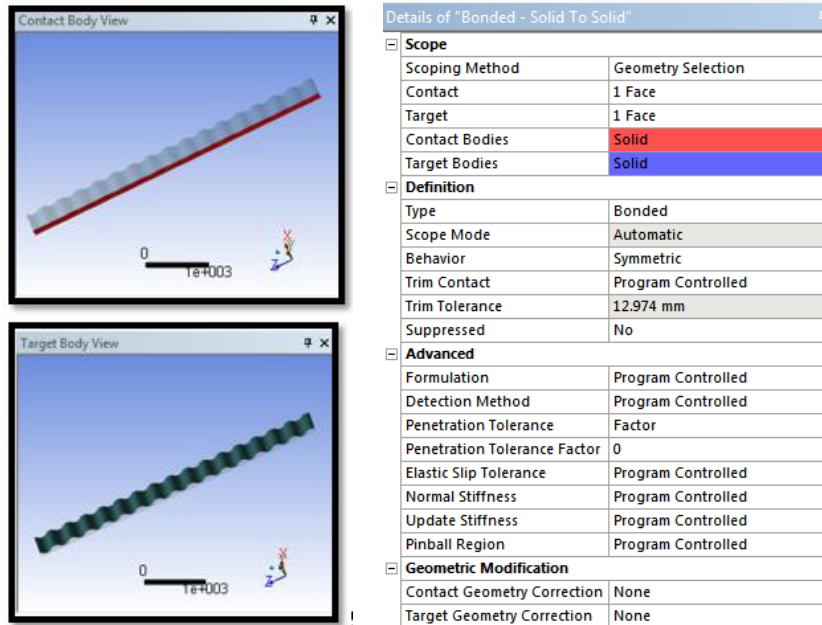
##### 3.4.1.1. Geometrik modelleme

Deneylerin geometrik modelleri, yapılan analizlerin deneysel çalışmayı tam manasıyla temsil etmesi açısından çok önemlidir. Ondülin gövdeli çelik kirişlerin geometrik modellerinin oluşturulmasında *ANSYS* yazılımının kendi çizim menüsü olan "*Design Modeler*"dan faydalanılmıştır. Tüm kiriş üç boyutlu katı (solid) model olarak Şekil 3.29'da görüldüğü üzere yazılıma girilmiştir.



Şekil 3.29. OGK\_330 ondülin gövdeli kiriş geometrik modeli

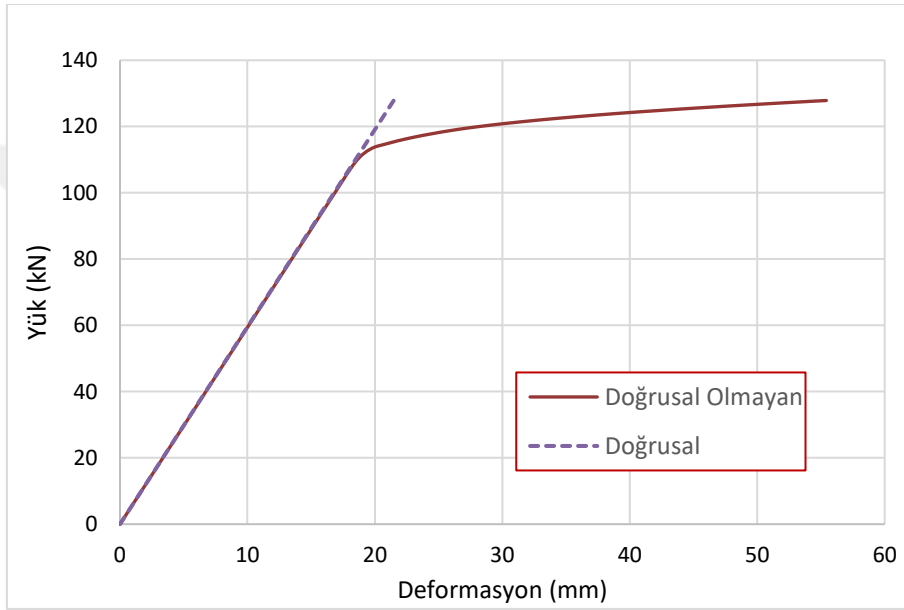
Gövdenin sinüs eğrisi formunda olması ondülin gövdeli kirişlerin kaynak uzunluğunu standart yapma I profilin kaynak uzunluğuna oranla artırmaktadır. Bu durum incelenen yapma kirişlerin birleşim yönünden çok güçlü olmasını sağlamıştır. Ondülin gövdeli kirişlerin deneysel çalışmasında gövde ve başlık kaynak birleşimlerinin hiçbirinde herhangi bir göçme gözlemlenmemiştir. Bu yüzden kirişler *ANSYS Workbench* ortamında modellenirken başlık ve gövdelerin temas yüzeyleri (Şekil 3.30) ‘de gösterildiği üzere “Bounded Contact” seçilerek tanımlanmıştır.



Şekil 3.30. Sonlu elemanlar modelinde birleşim ayarları

### 3.4.1.2. Malzeme özellikleri

Ondülin gövdeli çelik kirişlerin malzeme özellikleri tanımlanırken ANSYS yazılımının malzeme kütüphanesi bölümünden yararlanılmıştır. Bu kütüphane çelik, beton gibi yapı malzemelerinin doğrusal ve doğrusal olmayan modellerine ulaşılmasını sağlamaktadır. İhtiyaç halinde kütüphanede yer almayan farklı bir malzeme modeli de tanımlanabilmektedir. Yük altında kirişin gerçek davranışını gözlemlemek amacıyla yapılan lineer olmayan analizin lineer analiz grafiği ile kıyaslanması Şekil 3.31’de gösterilmiştir. Şekil 3.31’deki sonuçlar dikkate alındığında, doğrusal olmayan çelik malzeme modelinin deneysel çalışmaları daha gerçekçi ve daha doğru temsil ettiği görülmüştür.



Şekil 3.31. Lineer ve lineer olmayan analiz kıyaslanması

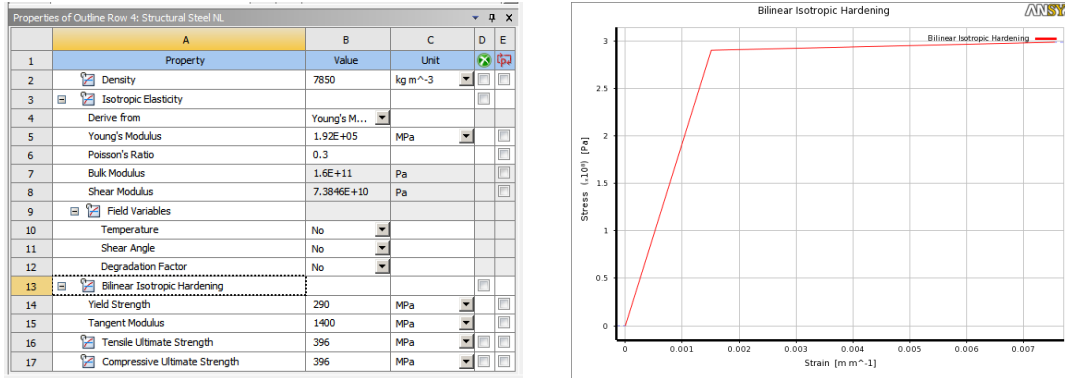
Kirişlerin malzeme modeli sırasında yazılımın kütüphanesinden doğrusal olmayan çelik malzeme modeli seçilmiş ve böylelikle doğrusal olmayan çelik malzeme iki eğri plastik malzeme olarak yazılıma girilmiştir. Malzeme çekme testi gerçekleştirilirken özellikle numunenin boyun verme aşamasında numune kesitinin azaldığı görülmektedir. Bu durum malzeme hakkındaki doğru bilgiye ulaşılmasını engellemektedir. Kesitteki daralmadan dolayı meydana gelen hatanın telefisi için malzeme dataları oluşturulurken, malzeme kupon deneylerinden elde edilen ortalama sonuçların Eşitlik (3.40) deki dönüşümleri yapılarak yazılıma girilmiştir. Çelik malzeme modellerinin ANSYS Workbench yazılımına girilmesi Şekil 3.32’de gösterilmiştir.

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.40)$$

$$\sigma_T = \exp(\varepsilon_T)\sigma$$

Burada,  $\varepsilon_T$  ve  $\sigma_T$  sırasıyla gerçek birim şekil değişimi ve gerçek çekme

gerilmesini,  $\sigma$  ve  $\varepsilon$  ise mühendislik birim şekil değişimi ve çekme gerilmesini ifade etmektedir.



Şekil 3.32. Malzeme özelliklerinin ANSYS yazılımına girilmesi

### 3.4.1.3. Ağ büyüklüğü ve kullanılan yöntem

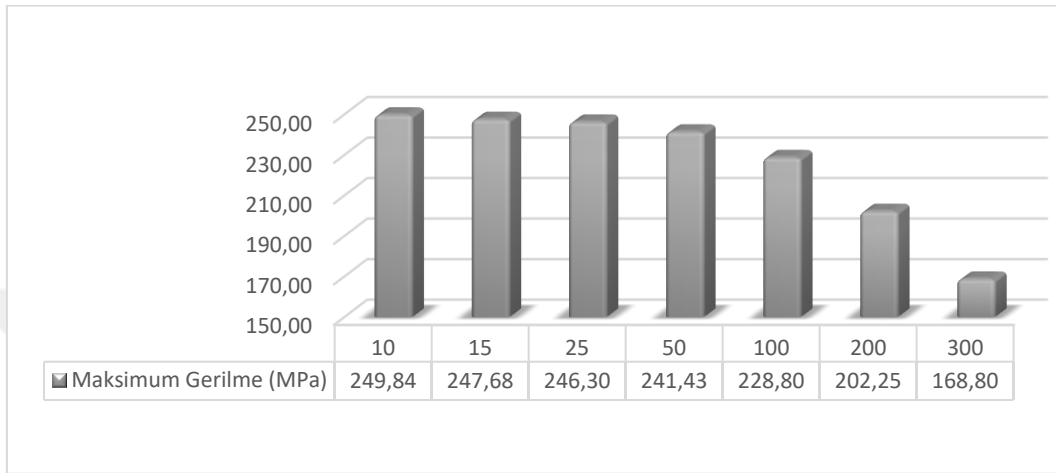
Uzayda bir hacimin içeriğinde sonsuz sayıda nokta mevcuttur. Cisimler teorik olarak sonsuz sayıda parçacığa ayrılabilirler. Sonlu elemanlar analizinde analiz edilecek olan yapı sonlu sayıda ve basit parçacıklara ayrılır. Daha sonra her bir parçacığın kendi içinde hesaplamaları yapılarak global çözüm elde edilir. Ondülin gövdeli kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle lineer olmayan sonlu elemanlar analizi (SEA) yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de ağ yapısıdır. Ağ yapısını belirleyen ağ büyüklüğü (mesh size) ve ağ türü (mesh method) adı altında iki temel başlık vardır. ANSYS Workbench yazılımı kullanıcılarına farklı ağ yapısı seçenekleri sunmaktadır. Hangi ağ seçeneğinin kullanılacağına karar vermek için OGK\_330 kirişi üzerinde ağ büyüklüğü sabit (100 mm) alınarak her bir method incelenmiştir. Elde edilen düğüm noktası sayıları ve eleman sayıları Tablo 3.1'de verilmiştir. Tetrahedrons ağ türü 34810 düğüm noktası sayısı ve 17343 eleman sayısı ile Automatic ağ türü ile beraber en yüksek değerleri vermiştir. Bunların arasından Tetrahedron ağ türü seçilerek hem en yüksek düğüm noktası ve eleman sayısı ile daha doğru sonuçlar elde edilmiş hem de Automatic ağ türü seçilmeyerek ağ türünün tüm kiriş geometrilerine aynı şekilde dağılması sağlanmıştır.

Tablo 3.1 Ağ Türlerinin Düğüm Noktası ve Eleman Sayıları

Ağ Türü	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
Automatic	34810	17343
Tetrahedrons	34810	17343
Hex-dominant	25849	8831

Ondülin gövdeli kirişlerin sonlu elemanlar analizi (SEA) yapılırken dikkat

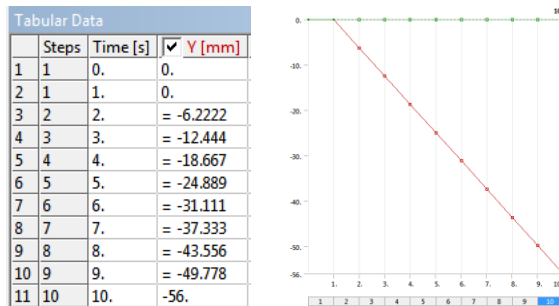
edilmesi gereken bir diğer husus ise ağ büyüklüğüdür. Ağ büyüklüğü her bir analizde Tetrahedron ağ türü kullanılarak ve 300 mm'den 10 mm'ye kadar azaltarak denenmiştir. Farklı ağ büyüklüklerine karşılık gelen Maksimum Von-Misses gerilmeleri Şekil 3.33'te verilmiştir. 374,08 MPa ile 25 mm'lik ağ büyüklüğünden sonra Von-Misses gerilmesinin dikkate değer bir seviyede artmadığı gözlemlenmiştir. Fakat ağ büyüklüğü 10 mm olarak alındığı zaman kiriş üzerindeki gerilme dağılımları daha iyi gözlemlendiği için sonlu elemanlar analizi yapılacak olan tüm kirişler için ağ büyüklüğü 10 mm olarak alınmıştır.



Şekil 3.33. Farklı ağ büyüklüklerine karşılık gelen maksimum gerilmeler

#### 3.4.1.4. Yükleme durumu ve mesnet koşulları

Kiriş üzerine yükleme yapılırken noktasal yük etki ettirildiği zaman yükün ağırlar arasında kalıp batmasını engellemek amacıyla uygulanan deplasman tıpkı deneylerde olduğu gibi belirli bir alana etki ettirilmiştir. Kirişin yük altında gerçek davranışına yakın sonuçları elde etmek amacıyla yükleme aşağıdaki şekillerde olduğu gibi adım adım uygulanmıştır (Şekil 3.34). Alt adım sayısı ise programa 100 adım olarak tanımlanmıştır. Bu durumda ANSYS Workbench yazılımı alt adım sayısını çözüm esnasındaki yakınsamaya göre maksimum alt adım sayısı 100 olacak şekilde dikkate almaktadır.

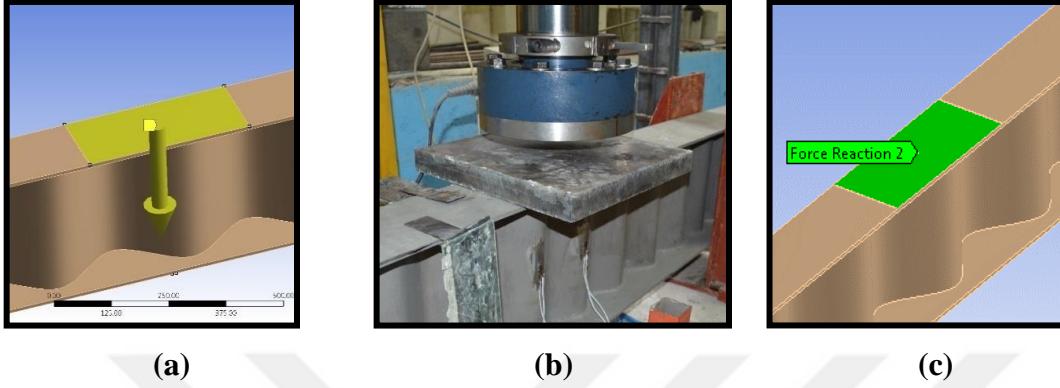


(a)

(b)

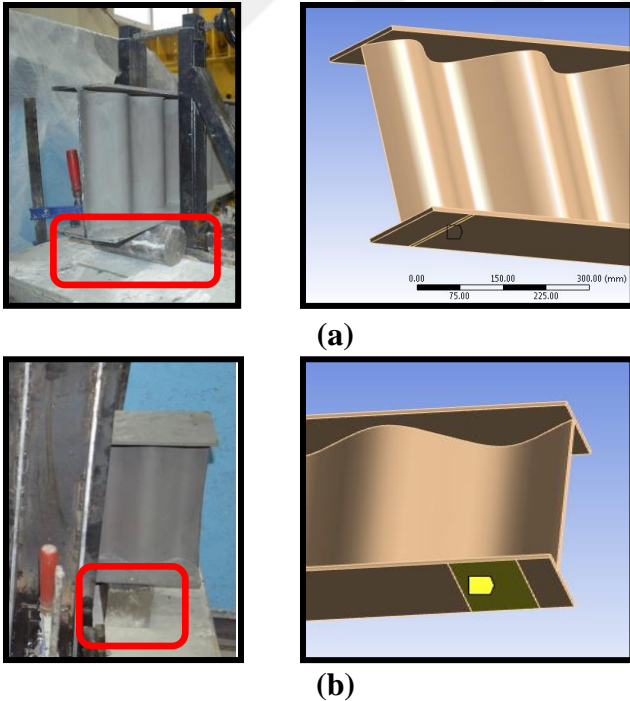
Şekil 3.34. a) Deplasmanın 10 adıma tanımlanması; b) Deplasman–zaman diyagramı

Yükün etkidiği alan Şekil 3.35’de görüldüğü gibi testte yükleme esnasında ara aparat olarak kullanılan 4cm’lik kare levhanın ondülin gövdeli kirişe temas ettiği yüzey olarak alınmıştır. Ondülin gövdeli çelik kirişin analiz esnasında kirişin üst başlığında verilen deplasmana gösterdiği reaksiyon direnci yine aynı yüzeyden kN cinsinden alınmıştır.



Şekil 3.35. a) Tekil yükün SEA uygulanması; b) Deney düzeneğinde yükün uygulanması ve veri okunması; c) Reaksiyon kuvvetinin SEA’de okunması

Deneyi yapılan ondülin gövdeli çelik kirişlerin mesnet koşulları yine yükleme noktasında olduğu gibi hareketli ve sabit mesnet olarak kullanılan 10x25 cm ebatlarındaki çelik silindir kütük ve 10x10x25 cm kenarlara sahip kare prizma çelik kütüğün kirişe temas ettiği alanlar yazılımdaki “Remote Displacement” seçeneği kullanılarak Şekil 3.36’daki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.36. a) Hareketli; b) Sabit mesnet koşullarının modellenmesi

Daha sonra gerekli mesnet koşulları mesnetlerin hareket kabiliyeti ve moment

aktarma durumlarına göre Şekil 3.37’deki gibi atanmıştır.

Details of "Remote Displacement 3"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Coordinate System	Global Coordinate System
X Coordinate	4900. mm
Y Coordinate	-8. mm
Z Coordinate	0. mm
Location	Click to Change
<b>Definition</b>	
Type	Remote Displacement
X Component	0. mm (ramped)
Y Component	0. mm (ramped)
Z Component	0. mm (ramped)
Rotation X	0. ° (ramped)
Rotation Y	0. ° (ramped)
Rotation Z	Free

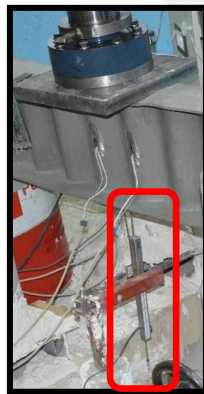
(a)

Details of "Remote Displacement 2"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Coordinate System	Global Coordinate System
X Coordinate	150. mm
Y Coordinate	-8. mm
Z Coordinate	0. mm
Location	Click to Change
<b>Definition</b>	
Type	Remote Displacement
X Component	Free
Y Component	0. mm (ramped)
Z Component	0. mm (ramped)
Rotation X	0. ° (ramped)
Rotation Y	0. ° (ramped)
Rotation Z	Free

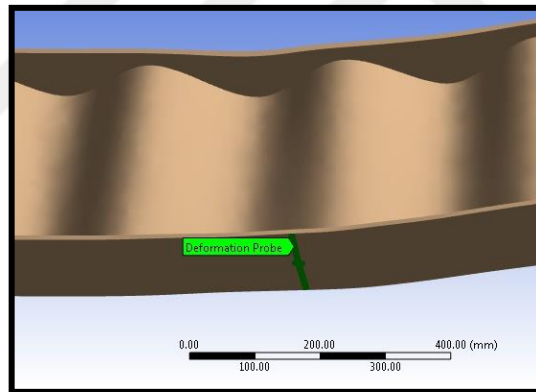
(b)

Şekil 3.37. a) Hareketli; b) Sabit mesnet hareket sınırlayıcılarının atanması

Ondülin gövdeli çelik kirişlerin testlerinden elde edilen dataların SEA’lerinden elde edilen verilerle karşılaştırmalarının doğru şekilde yapılabilmesi için orta nokta deplasmanları yazılımın ‘Deformation Probe’ özelliği kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3.38).



(a)



(b)

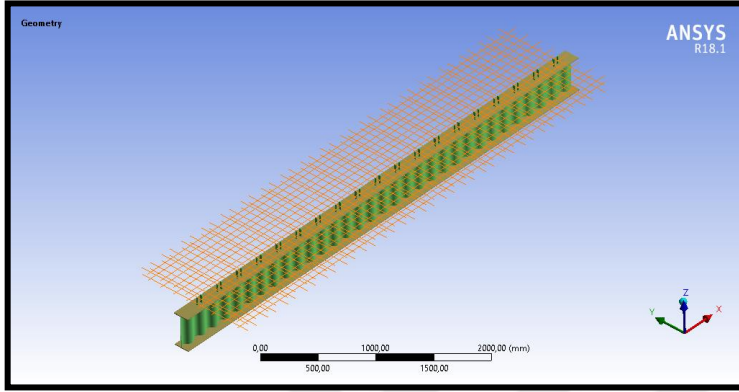
Şekil 3.38. a) Denedeydeki deplasman ölçerlerin; b) SEA ile modellenmesi

### 3.4.2. Ondülin gövdeli kompozit döşemelerin sonlu elemanlar modellerinin oluşturulması

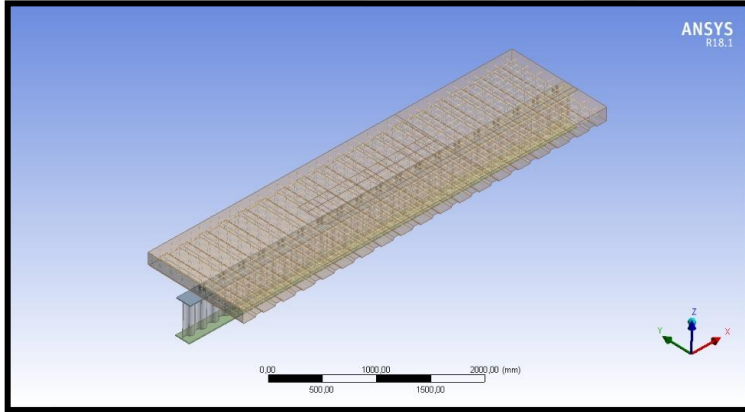
Tez çalışmasının son kısmında ondülin gövdeli kompozit döşeme kirişlerinin deneysel kısımda bulunan yük taşıma kapasitelerinin kıyaslanması amacıyla ANSYS Workbench programı yardımıyla SE analizleri yapılmıştır. Deneysel bölümde yükleme çerçevesinde testleri yapılan döşeme kirişlerinin bulunan ortalama göçme yükleri ANSYS-Workbench programında lineer olmayan analizi yapılacak şekilde simüle edilerek kiriş üzerinde oluşacak maksimum toplam deplasmanın yanısıra kesme gerilmesi ve maksimum gerilme değerleri hesaplanmıştır.

### 3.4.2.1. Geometrik modelleme

Sonlu eleman yöntemiyle kompozit döşeme sisteminin analizi yapılırken sınır koşullarının doğru tanımlanması ondülin gövdeli kirişin davranışını etkileyeceği için oldukça önemlidir. OGKK'lerin geometrileri yine eleman bazındaki OGK'lerde yapıldığı gibi Windows ortamında ANSYS yazılımının kendi geometrik modelleme aracı olan "Design Modeler" kısmında tasarlanmıştır (Şekil 3.39b). Eleman bazında modellenen kirişlere ek olarak beton döşeme ve stud çivileri yine katı (solid) eleman deneylerde kullanılan ızgara donatı ise çizgisel (line) eleman olarak yazılıma girilmiştir (Şekil 3.39a).



(a)

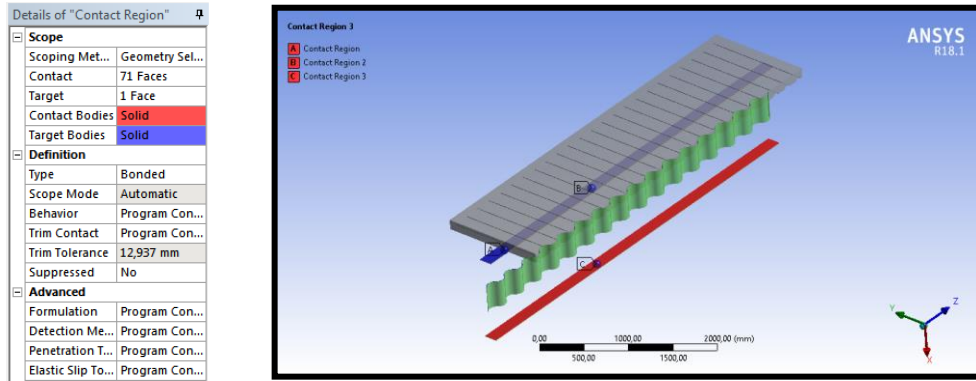


(b)

**Şekil 3.39.** a)SEA'de donatı ve kesme saplamaları; b) ANSYS Design Modeler'da tasarlanan OGKK\_415 kirişi

Testleri yapılan OGKK'lerde çelik kişin gövdesinin ondülin yapısı gövde-flanş temas yüzeylerini ve buna bağlı olarak kaynak uzunluğunu yaklaşık %17 oranında artırmaktadır. Bu durum incelenen yapma çelik kiriş birleşimlerinin standart bir çelik I yapma profilinden daha sağlam olmalarını sağlamıştır. Yapılan OGK ve OGKK teslerinin hiçbirinde kaynak bölgesinden göçme durumuyla karşılaşılmasıdır. Aynı şekilde OGKK'lerde kullanılan kesme saplamaları ile OGK'in üst flanşlarını birleştiren kaynak bölgelerinde de herhangi bir mukavemet zafiyeti gözlemlenmemiştir. Bu durum dikkate alınarak OGKK'leri oluşturan elemanlarının birleşimlerinin modellemesinde yazılımda

tanımlı olan “Bounded Contact” seçeneği kullanılmıştır (Şekil 3.40).



Şekil 3.40. Ondülin gövdeli kompozit kirişlerin birleşim ayarları

### 3.4.2.2. Malzeme özellikleri

ANSYS Workbench yazılım kütüphanesinde çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme modelleri mevcuttur. OGKK’lerin malzeme özellikleri modellenirken yazılımın içeriğindeki hazır doğrusal olmayan çelik ve doğrusal olmayan betonarme modelleri kullanılmıştır. Kompozit kirişin çelik malzemesi modellenirken OGK’lerin SE analizlerinde kullanılan doğrusal olmayan çelik malzeme modellerinin yapısı değiştirilmeden kullanılmıştır. Doğrusal olmayan beton modellenirken ise beton basınç testlerinden elde edilen ortalama dayanım değeri yazılıma Şekil 3.41’de verilen arayüzden girilmiştir.

1	Property	Value	Unit	D	E
2	Density	2300	kg m...		
3	Isotropic Elasticity				
4	Derive from	You...			
5	Young's Modulus	30000	MPa		
6	Poisson's Ratio	0,18			
7	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa		
8	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa		
9	Field Variables				
10	Temperature	No			
11	Shear Angle	No			
12	Degradation Factor	No			
13	Drucker-Prager Strength Piecewise	Tabular			
14	Scale	1			
15	Offset	0	Pa		
16	Tensile Pressure Failure				
17	Maximum Tensile Pressure	-4	MPa		
18	Crack Softening Failure				
19	Flow Rule	No ...			
20	Fracture Energy GF	100	J m^-2		

Şekil 3.41. Doğrusal olmayan beton malzeme özelliklerinin ANSYS yazılımına girilmesi

### 3.4.2.3. Ağ büyüklüğü ve kullanılan yöntem

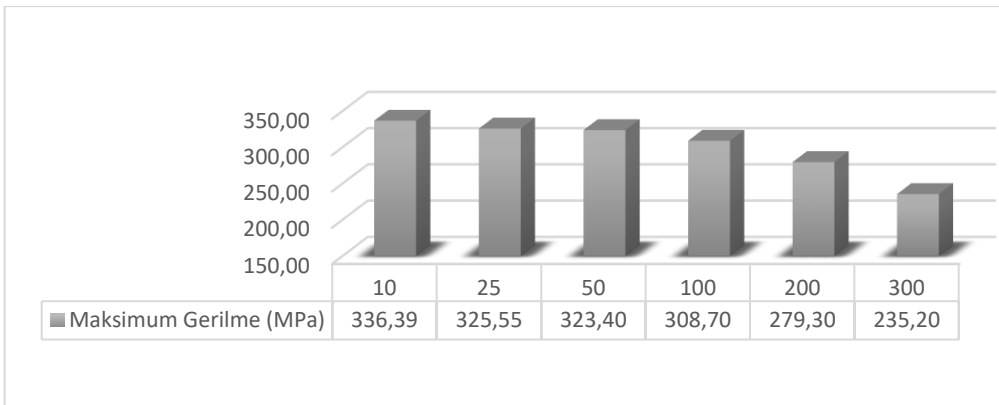
SEA’nde analizi gerçekleştirilecek olan kompozit döşeme sisteminin küçük parçacıklara ayrılarak elde edilen sonlu sayıdaki küçük parçacıkların her birinin kendi içinde çözümleri yapılır. Daha sonra bu çözümler birleştirilerek tüm yapının analiz

sonuçlarına ulaşılır. Bu sebeple analizi yapılacak olan yapının hangi büyüklükte ve hangi türde parçacıklara bölüneceği analiz sonuçlarını doğrudan etkileyecektir. SEA’nde kullanılan ANSYS Workbench yazılımı kullanıcılarına çeşitli ağ yapısı seçenekleri sunmaktadır. Sunulan bu seçeneklerden hangisinin kullanılacağına karar vermek için ağ büyüklüğü sabit (100 mm) tutularak her bir metot ayrı ayrı araştırılmıştır. Elde edilen ağ türlerinin düğüm noktası ve eleman sayıları Çizelge 3.3’de verilmiştir. Çelik eleman testlerinde olduğu gibi Hem OGK ve OGKK SEA’lerinin karşılaştırılabilirliği düşünülerek hem de düğüm noktası ve eleman sayıları dikkate alınarak ve daha gerçekçi sonuç elde edildiği görüldüğünden yapılacak olan OGKK’lerin SEA’leri için 56957 düğüm noktası ve 29531 eleman sayısı Tetrahedrons ağ türü seçilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Ağ türlerinin düğüm noktası ve eleman sayıları

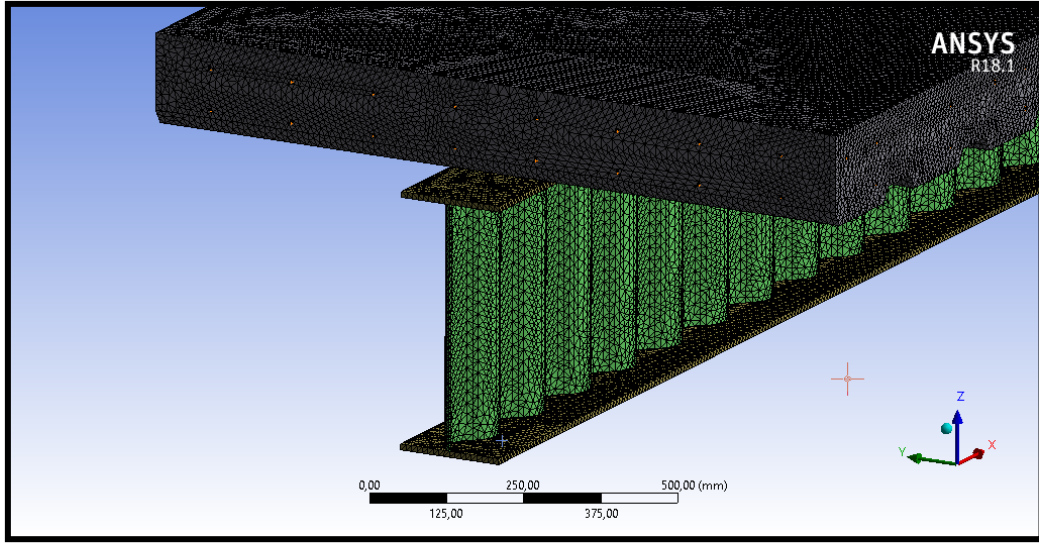
<i>Ağ Türü</i>	<i>Düğüm Noktası Sayısı</i>	<i>Eleman Sayısı</i>
<i>Automatic</i>	53732	25300
<i>Tetrahedrons</i>	56957	29531
<i>Hex-dominant</i>	55116	22616

OGKK’lerin SEA’i yapılırken incelenmesi gereken bir diğer husus ise ağ büyüklüğüdür. Ağ büyüklüğü her bir analizde Tetrahedron ağ türü sabit alınarak 300 mm’den 10 mm’ye kadar azaltılarak denenmiş ve aynı yükleme koşulları altında elde edilen Von mises gerilmeleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.42’de verilen karşılaştırma sonuçları dikkate alınarak analizleri yapılacak olan OGKK’lin ağ büyüklüğü 10 mm seçilmiştir.



**Şekil 3.42.** Farklı ağ büyüklüklerine karşılık gelen maksimum von mises gerilmeleri

OGKK\_330 kirişinin yükleme öncesinde ağlara bölündükten sonraki hali Şekil 3.43’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.43.** Ondülin gövdeli kompozit döşeme kirişinin SE’ a ayrılması

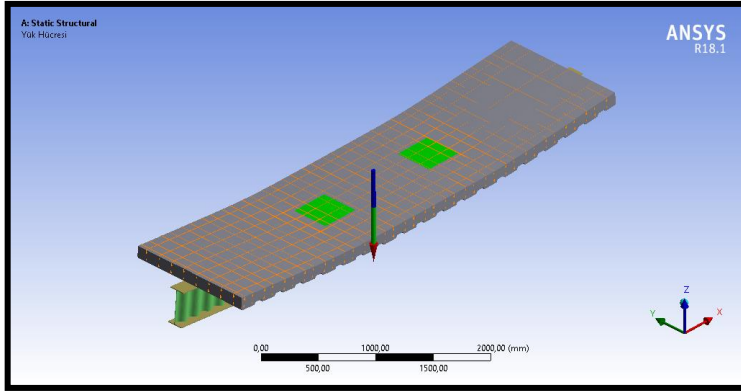
#### 3.4.2.4. Yükleme durumu ve mesnet koşulları

OGK deneylerinde kullanılan 10x25cm ebatlarındaki çelik silindir kütük ve 10x10x25cm kenarlara sahip kare prizma kütük sırasıyla hareketli ve sabit mesnet olarak aynı şekilde OGKK testlerinde de kullanılmıştır. Deneyi yapılan OGKK’lerin mesnet koşulları yine OGK’lerin mesnet modellerinde olduğu gibi “Remote Displacement” komutu kullanılarak yazılıma tanıtılmıştır. Kiriş üzerine yükleme yapılırken noktasal yük etki ettirildiği zaman yükün ağırlar arasında kalıp batmasını engellemek amacıyla yük aynı OGK testlerinde olduğu gibi belirli bir alana etki ettirilmiştir. Kirişin yük altında gerçek davranışına yakın sonuçları elde etmek amacıyla yükleme eleman bazındaki SE analizlerinde olduğu gibi adım adım uygulanmıştır.

#### 3.4.2.5. Döşeme kirişi sonlu elemanlar yükleme durumu

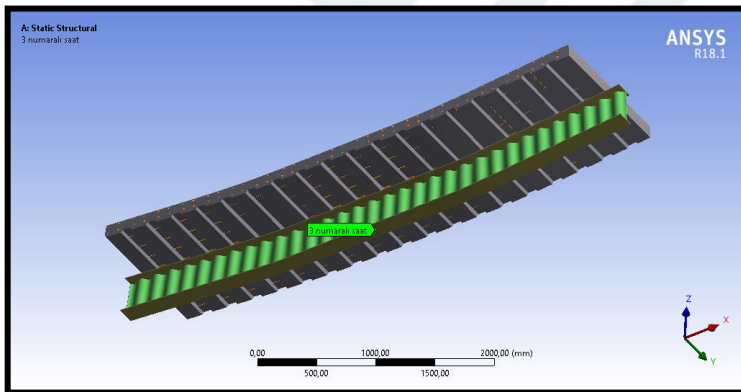
OGKK’lerin deneysel çalışması SEA yazılımında modellenirken mesnet koşulları yine sabit ve hareketli mesnet olarak OGK’lerin SEA’lerinde olduğu gibi modellenmiştir. Deneysel çalışmada yükleme sonucunda elde edilen ortalama göçme deformasyon uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak döşemenin üstüne 10 adımda ve 100 alt adımda etki ettirilmiştir (Şekil 3.44).

OGKK analizlerinde pistondan gelen yükün OGKK döşemesine etki ettiği alan deneylerde kullanılan ara yükleme elemanlarının kiriş döşemesine temas ettiği yüzeyler dikkate alınarak modellenmiştir. OGKK’in analizinde döşemeden 10 adımda verilen deplasmana verdiği reaksiyon “Force Reaction” komutu vasıtasıyla yine aynı yüzeylerden kN cinsinden okunmuştur.



Şekil 3.44. SEA OGKK\_330 üzerine ortalama yükün uygulanması

OGKK testlerinden elde edilen verilerin SEA'lerinden elde edilen datalarla karşılaştırılmasının doğru biçimde yapılmasını sağlamak amacıyla kiriş orta nokta okumalarında "Deformation Probe" komutu kullanılmıştır (Şekil 3.45).

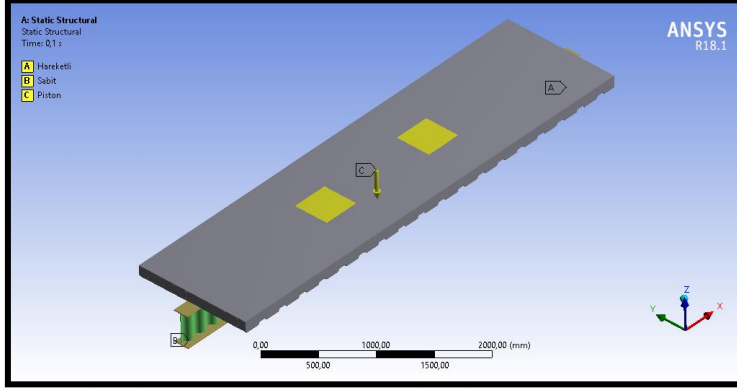


Şekil 3.45. SEA orta nokta deplasmanının okunması

### OGKK\_330 sonlu elemanlar iki noktasal yükleme durumu

OGKK-330 deneylerinde test esnasında pistondan gelen yük berkitmeli kiriş vasıtasıyla yük dağıtan yükleme levhalarına ve oradan da OGKK'e iki noktadan aktarılmıştır. Bu sebeple OGKK analizlerinde yükün etki ettiği alan Şekil 3.46'de görüldüğü üzere testlerde 4cm kalınlığındaki levhanın OGKK'in döşemesine temas ettiği yüzeyler dikkate alınarak modellenmiştir. OGKK'in analizinde döşemeden 10 adımda verilen deplasmana verdiği reaksiyon "Force Reaction" komutu vasıtasıyla yine aynı yüzeyden kN cinsinden okunmuştur. Şekil 3.46'da OGKK\_330 ondülin gövdeli kompozit kirişi SEA detayları verilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen 135,32 mm büyüklüğündeki ortalama göçme düşey deplasmanı "Remote Displacement" komutu

kullanılarak 10 adımda ve 100 alt adımda kompozit kiriş döşemesinin üst yüzeyinden aynı OGKK\_330 deneyinde olduğu gibi etki ettirilmiştir.



(a)

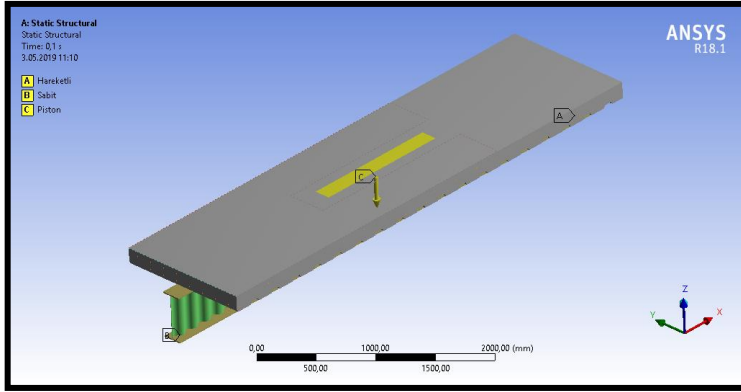


(b)

Şekil 3.46. a) OGKK\_330 SEA statik yapısı; b) OGKK\_330 deney düzeni

### OGKK\_415 sonlu elemanlar düzgün yayılı yüklenme durumu

OGKK-415 deneylerinde test esnasında pistondan gelen yük berkitmeli kiriş vasıtasıyla OGKK'e düzgün yayılı yük olarak Şekil 3.49a ve b'deki gibi aktarılmıştır. Bu sebeple OGKK analizlerinde yükün etki ettiği alan testlerde berkitmeli ara kirişinin OGKK'in döşemesine temas ettiği yüzey dikkate alınarak modellenmiştir. OGKK'in analizinde döşemeden 10 adımda verilen deplasmana verdiği reaksiyon "Force Reaction" komutu vasıtasıyla yine aynı yüzeyden kN cinsinden okunmuştur. Şekil 3.47 OGKK\_415 döşeme kirişinin ANSYS-Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada düzgün yayılı yüklenme sonucunda elde edilen ortalama düşey göçme deplasmanı olan 135,49 mm büyüklüğündeki ortalama deplasman uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak döşemenin üzerine 10 adımda etki ettirilmiştir.



(a)

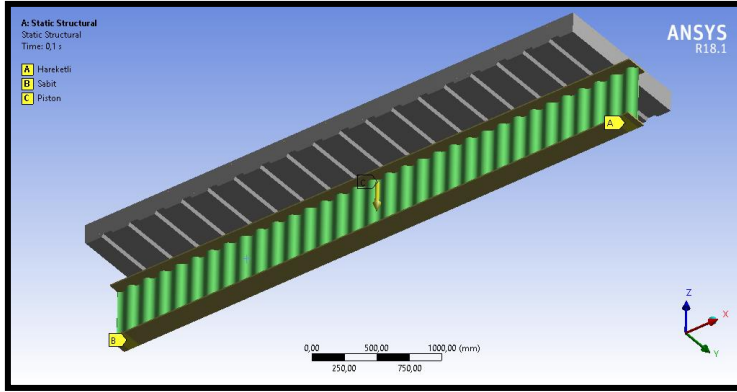


(b)

Şekil 3.47. a) OGKK\_415 SEA statik yapısı; b) OGKK\_415 deney düzeni

### OGK\_500 sonlu elemanlar tekil yükleme durumu

Şekil 3.50 OGKK 500 deneylerinde test esnasında OGKK kirişine tekil yükün aktarılmasını göstermektedir. Bu sebeple OGKK analizlerinde yükün etki ettiği alan testlerde 4cm kalınlığındaki levhanın OGKK'in döşemesine temas ettiği yüzeyler dikkate alınarak modellenmiştir. OGKK'in analizinde döşemeden 10 adımda verilen deplasmana verdiği reaksiyon "Force Reaction" komutu vasıtasıyla yine aynı yüzeyden kN cinsinden okunmuştur. Şekil 3.48 OGKK\_500 döşeme kirişinin ANSYS- Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen ortalama göçme yükü olan 117,13 mm büyüklüğündeki ortalama deplasman uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak kiriş döşemesine 10 adımda etki ettirilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 3.48. a) OGKK\_500 SEA statik yapısı; b) OGKK\_500 deney düzeni**

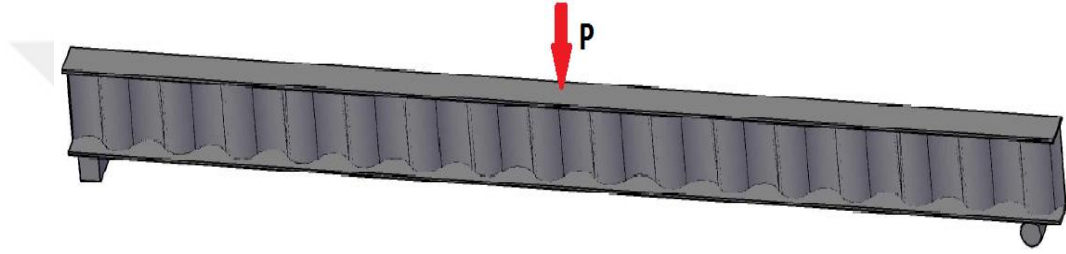


## 4. BULGULAR

### 4.1. OGK'lerin Optimum Boyutları

#### 4.1.1. 5-metre açıklıklı OGK\_330 kirişinin optimizasyonu

Şekil 4.1'de gösterilen çelik kirişlerin ondülin gövdeli kiriş yapılmasına karar verildiği varsayılmaktadır. Kirişler kendi ağırlığının yanı sıra tekil yükleme için 110 kN iki noktasal yükleme için 140 kN ve yayılı yükleme için ise 160 kN yüklere maruz bırakılarak optimizasyon süreçleri başlatılmıştır. Mesnetler arası mesafe 5 m, tekil yük altında kiriş için izin verilebilir deplasman 17 mm ile sınırlandırılmıştır. Elastisite Modülü 205 kN/mm<sup>2</sup> olan çelik kiriş S235 malzeme sınıfındadır. Kirişin boyutlandırılmasında farklı av arama (AAA) ve ateşböceği (ABA) yöntemlerinin parametreleri optimum sonucu elde etmek için test edilmiştir.



Şekil 4.1. Optimum boyutlandırılması yapılan 5-metre açıklıklı OGK

Optimum boyutlandırma probleminde ondülin gövde yüksekliği, gövde dalga boyu, dalga yüksekliği, başlık kalınlığı ve başlık genişliği tasarım değişkenleri olarak alınmıştır. Ondülin gövdeli kirişlerin tasarım bölümündeki geometrik sınırlayıcılar dikkate alınarak bir tasarım havuzu hazırlanmıştır. Tasarım sınırlayıcıları olarak deplasman kısıtlayıcısı, kiriş profilin esneklik kapasitesi, kiriş kesme kapasitesi, narinlik ve kaynak hesabı alınmıştır. Ondülin gövdeli kirişin optimum boyutlandırılmasında kullanılan Ateş böceği algoritması (ABA) ve av arama yöntemi (AAA) algoritması parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Optimizasyon tekniklerinin tasarım parametreleri

Yöntem	Parametre Değerleri
AAA	$HGS = 90$ $MML = 0.002$ $HGCR = 0.90$ $R_{a_{max}} = 0.01$ , $R_{a_{min}} = 0$ $par = 0.45$ $\alpha = 0.9$ , $\beta = 0.02$ , $IE = 25$ , $N_{cyc} = 10000$
ABA	$\mu = 40$ $\beta_0 = 0.25$ $\beta = 1$ $\alpha = 0.01$ $\gamma = 1$ $N_{ite} = 10000$

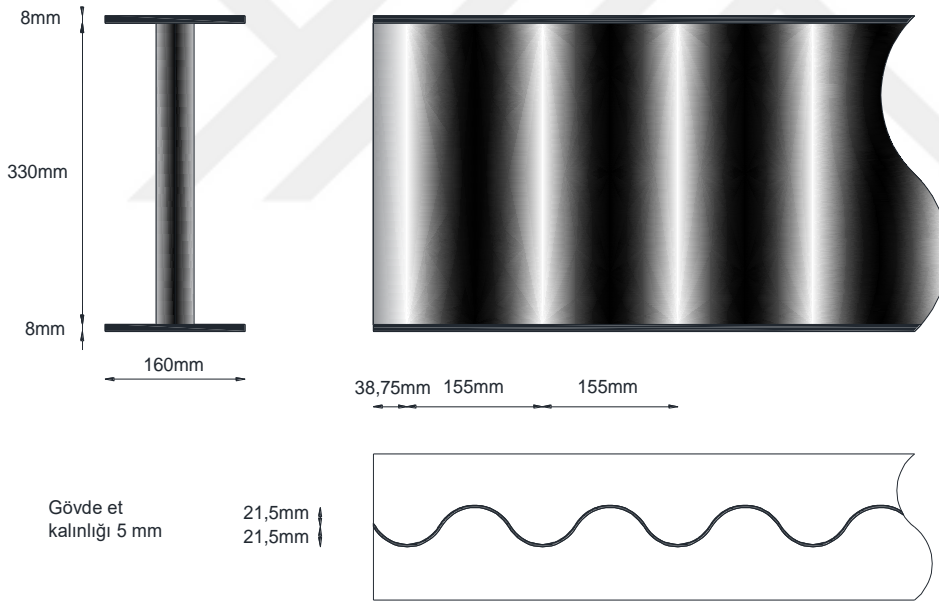
Her iki stokastik optimizasyon algoritması performans açısından incelendiği zaman av arama tekniğinin (AAA) daha hızlı bir şekilde optimum sonuca yakınsamaya başladığını fakat ateş böceği algoritması tekniği (ABA) ile elde edilen ondülin gövdeli kiriş optimum boyutlandırmanın 176,33 kg ile daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca

av arama tekniğinin de optimum sonuca güvenilir bir yakınsama ile iyi bir performansı göstermesine rağmen ateş böceği tekniğinden % 7,4 daha ağır bir tasarım ağırlığı bularak 189,38 kg bulunmuştur. AAA'na göre daha hafif bir yapma OGK oluşturan ateşböceği algoritmasına bağlı olarak bulunan OGK\_330 kirişinin optimum boyutları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** 5-metre açıklıklı OGK\_330 kirişinin optimum boyutları

Optimum Kesit Tasarımı	Gövde Kalınlığı (mm)	Gövde Yüksekliği (mm)	Başlık Kalınlığı (mm)	Dalga Yüksekliği (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 4.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.2.** Optimum boyutlandırılan OGK\_330 kirişinin profil kesitleri

#### 4.1.2. 5-metre açıklıklı OGK\_415 kirişinin optimizasyonu

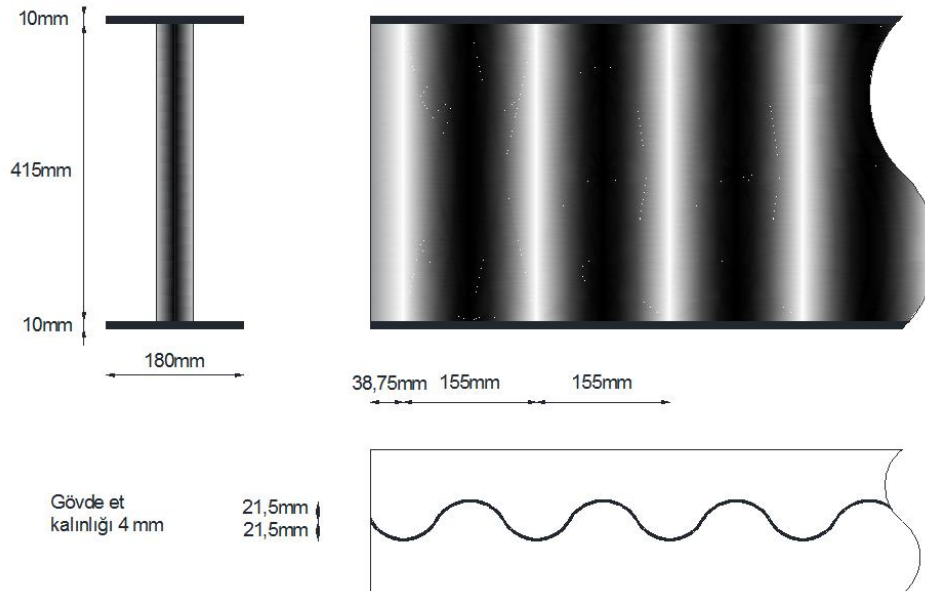
OGK\_415 hesabında yapma çelik kirişin ondülin gövdeli kiriş yapılmasına karar verildiği varsayılmaktadır. Kirişler kendi ağırlığının yanı sıra tekil yükleme için 120 kN, iki noktasal yükleme için 165 kN ve yayılı yükleme için ise 180 kN yüklere maruz bırakılarak optimizasyon süreçleri başlatılmıştır. Mesnetler arası mesafe yine 5 m olarak alınmıştır. Yük altında kiriş için izin verilebilir deplasman 17 mm ile sınırlandırılmıştır.

Elastisite Modülü  $205 \text{ kN/mm}^2$  ve çelik kiriş S235 sınıfındadır. Kirişin boyutlandırılmasında farklı av arama ve ateşböceği yöntemlerinin parametreleri optimum sonuç için test edilmiştir. Her iki yöntem için maksimum iterasyon sayısı 10000 olarak alınmıştır. Her iki optimizasyon tekniğiyle elde edilen sonuçlar incelendiği zaman her iki tekniğin geometrik ve davranış sınırlayıcıları altında tasarım matrislerini doldurarak iterasyon sayısı arttıkça minimum ağırlığa doğru yakınsadıkları açıkça görülmektedir. (HSA) daha hızlı bir şekilde optimum sonuca yakınsamaya başladığını fakat ateş böceği algoritması tekniği (FFO) ile elde edilen ondülin gövdeli kiriş optimum boyutlandırmasının 216,91 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 %6,2 daha ağır bir tasarım ağırlığı bularak 230,35 kg bulmuştur. Ateşböceği algoritmasına bağlı olarak bulunan OGK\_415 kirişinin optimum boyutları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** 5-metre açıklıklı OGK\_415 kirişinin optimum boyutları

Optimum Kesit Tasarımı	Gövde Kalınlığı (mm)	Gövde Yüksekliği (mm)	Başlık Kalınlığı (mm)	Dalga Yüksekliği (mm)	Dalga Boyu (mm)	Minimum Ağırlık (kg)
OGK_415	4	415	10	43	155	216.9

Ondülin gövdeli kirişin tekil yük altında optimum geometrik özellikleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** Optimum boyutlandırılan OGK\_415 kirişinin profil kesitleri

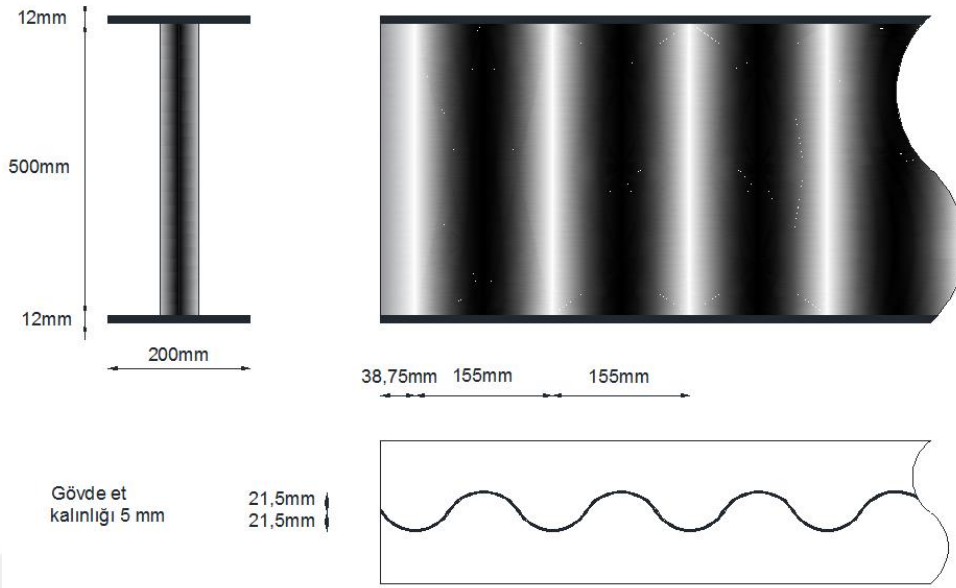
#### 4.1.3. 5-metre açıklıklı OGK\_500 kirişinin optimizasyonu

Son olarak OGK\_500 kirişinin ondülin gövdeli kiriş yapılmasına karar verildiği varsayıldığında kirişler kendi ağırlığının yanı sıra tekil yükleme için 230 kN, iki noktasal yükleme için 270 kN ve yayılı yükleme için ise 325 kN yüklere maruz bırakılarak optimizasyon süreçleri başlatılmıştır. Mesnetler arası mesafe 5m'dir. Yük altında kiriş için izin verilebilir deplasman yine 17 mm ile sınırlandırılmıştır. Elastisite modülü 205 kN/mm<sup>2</sup> ve çelik kiriş S235 sınıfındadır. Kirişin boyutlandırılmasında av arama ve ateşböceği yöntemlerinin parametreleri optimum sonuç için test edilmiştir. Her iki yöntem için maksimum iterasyon sayısı 10000 olarak alınmıştır. Her iki optimizasyon tekniğinin minimum ağırlığı bulmada göstermiş oldukları performanslar incelendiği zaman her iki tekniğin geometrik ve davranış sınırlayıcıları altında tasarım matrislerini doldurarak iterasyon sayısı arttıkça minimum ağırlığa doğru yakınsadıkları açıkça görülmektedir. Analiz sayısı 10000'e kadar devam ettirildiği zaman ateş böceği algoritması tekniği (ABA) ile elde edilen ondülin gövdeli kiriş optimum boyutlandırmasının 302,24 kg ile optimum ağırlığa ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca av arama tekniği de 10000 iterasyon sonucunda optimum sonuca yakın bir değer bularak 316,13 kg ile av arama tekniğinden %4,6 daha ağır bir tasarım ağırlığı bulmuştur. ABA algoritması ile optimum boyutlandırılan OGK\_500 çelik kirişinin ölçüleri Çizelge 4.4' te detaylı olarak verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** 5-metre açıklıklı OGK\_500 kirişinin optimum boyutları

Optimum Kesit Tasarımı	Gövde Kalınlığı (mm)	Gövde Yüksekliği (mm)	Başlık Kalınlığı (mm)	Dalga Yüksekliği (mm)	Dalga Boyu (mm)	Minimum Ağırlık (kg)
OGK_500	5	500	12	43	155	302.24

OGK\_500 çelik ondülin gövdeli kirişin tekil yük altında optimum geometrik özellikleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.4.** Optimum boyutlandırılan OGK\_500 kirişinin profil kesitleri

#### 4.2. OGKK'lerin döşeme boyutları

OGKK\_330, OGKK\_415 ve OGKK\_500 kirişleri için sacların dış yüksekliği ( $D_p$ ) 30 mm alınmıştır. Her bir kiriş için bulunan döşeme kalınlıkları ve kuvvetler aşağıda hesaplanmıştır.

##### **OGKK330 için;**

$$R_S = 0,95 \times 360 \times 2 \times 8 \times 160 = 875,520 \text{ kN}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow R_S = R_C \rightarrow 875520 = 0,45 \times 20 \times 1175 \times h_C$$

$$h_C \leq 82,791 \text{ mm} ; h_C = 8 \text{ cm seçilmiştir.}$$

$$R_C = 0,45 \times 20 \times 1175 \times 80 = 846,000 \text{ kN}$$

$$M_{pl,Rd} = 875,520 \times \frac{346}{2} + 846 \times \left( \frac{80}{2} + 30 \right) = 210,684 \text{ kNm}$$

##### **OGKK415 için;**

$$R_S = 0,95 \times 360 \times 2 \times 10 \times 180 = 1231,200 \text{ kN}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow R_S = R_C \rightarrow 1231200 = 0,45 \times 20 \times 1175 \times h_C$$

$$h_C \leq 116,425 \text{ mm} ; h_C = 11 \text{ cm seçilmiştir.}$$

$$R_C = 0,45 \times 20 \times 1175 \times 110 = 1163,250 \text{ kN}$$

$$M_{pl,Rd} = 1231,200 \times \frac{435}{2} + 1163,250 \times \left( \frac{110}{2} + 30 \right) = 366,662 \text{ kNm}$$

**OGKK500 için;**

$$R_s = 0,95 \times 360 \times 2 \times 12 \times 200 = 1641,600 \text{ kN}$$

$$\sum F_x = 0 \rightarrow R_s = R_c \rightarrow 1641600 = 0,45 \times 20 \times 1175 \times h_c$$

$$h_c \leq 155,234 \text{ mm}; h_c = 15 \text{ cm seçilmiştir.}$$

$$R_c = 0,45 \times 20 \times 1175 \times 150 = 1586,250 \text{ kN}$$

$$M_{pl,Rd} = 1641,600 \times \frac{524}{2} + 1586,250 \times \left( \frac{150}{2} + 30 \right) = 596,655 \text{ kNm}$$

**4.3. OGK Kapasitelerinin Eleman Bazında Testleri**

Optimizasyon sürecinde minimum ağırlıkları bulunan OGK'lerin eleman bazında yapılan testlerin deneysel amaç taşınması için her bir kiriş testi iki tekrar olacak şekilde yapılmıştır. Bu kapsamda, OGK\_330 kirişi için tek noktadan yük altında iki (2), iki noktadan yük altında iki (2), yayılı yük altında iki (2), OGK\_415 kirişi için tek noktadan yük altında iki (2), iki noktadan yük altında iki (2), yayılı yük altında iki (2), ve OGK\_500 döşeme kirişleri için tek noktadan yük altında iki (2), iki noktadan yük altında iki (2), yayılı yük altında iki (2), olmak üzere toplamda on sekiz (18) adet test gerçekleştirilmiştir.

**4.3.1. OGK\_330 kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu**

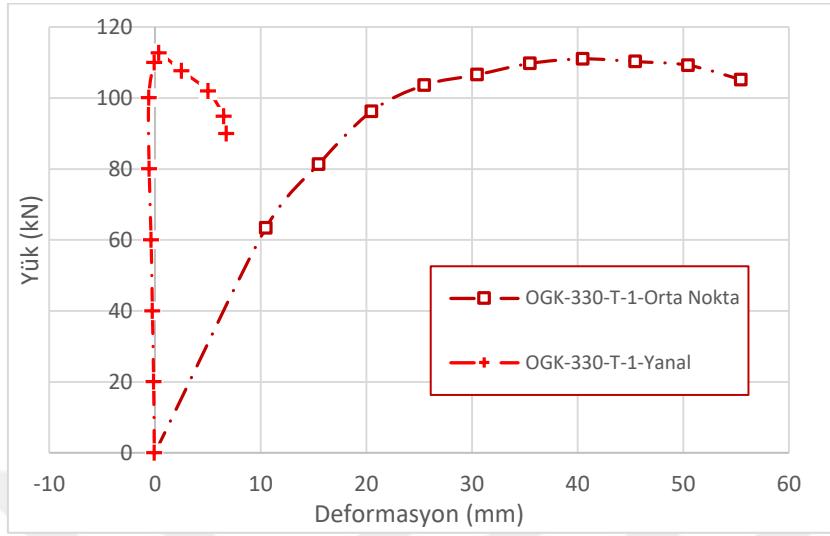
Geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 3.1'de detaylı olarak verilen ilk ondulün gövdeli kiriş (OGK-330) tekil yük altında test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan tekrarlı iki yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 112,81 kN ve 140,46 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.5'te gösterilen OGK-330 kirişi üzerindeki ilk testte; kirişin 110,25 kN yüke kadar dikkate değer bir yanıl deplasman yapmadığı fakat bu değerden sonra kirişin üst başlığından itibaren yanıl öteleniği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. OGK\_330\_Test\_1 tekil yükleme sonrası durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan ilk yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey ve yanıl deplasman Şekil 4.6'da

verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere tekil yükleme 110,25 kN'u aştıktan sonra kirişin orta kısmında önemli ölçüde yanal ötelenme ölçülmüştür.



Şekil 4.6. OGK\_330\_Test\_1 tekil yükleme yük-deplasman grafiği

OGK\_330 ondülin gövdeli kirişler için yapılan ilk testte, kiriş yük taşıma kapasitesine ulaştıktan ve plastik deformasyonlar yaparak göçme noktasına ulaştıktan sonra üst başlığa eğilmeden ve yanal burkulmalardan gelen basınç gerilmeleri etkisi ile kirişin orta bölgesinden lokal olarak göçmüştür.



Şekil 4.7. OGK\_330\_Test\_1 göçme durumu

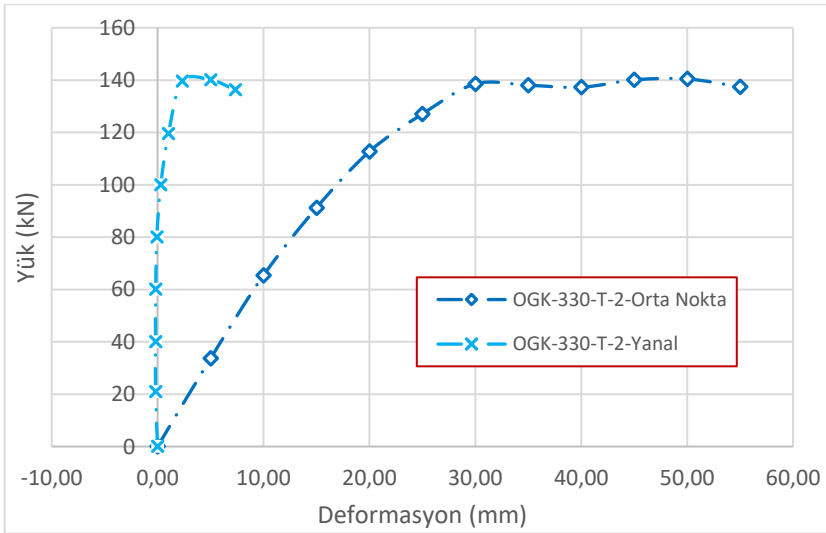
Yanal burkulmayı önlemek için kiriş açıklığının  $L/3$  ve  $2L/3$  mesafelerindeki yanal destekleri daha rijit hale getirmek için bayrak levhaları üst kısımlarından mingeneler yardımıyla sıkılarak daha rijit hale getirilmiştir. OGK-330 kirişi üzerindeki ikinci testte ise yanal desteklerin güçlendirilmesine bağlı olarak kirişin yük taşıma kapasitesi %24,5 artarak 140.46 kN seviyesine ulaşmıştır (Şekil 4.7). Bu değer artışı yanal

destekleyicilerin OGK'ların gerçek dayanımlarını elde etmede ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur. Birinci teste benzer bir şekilde göçme basınç gerilmelerine bağlı olarak OGK'in üst başlığının orta noktasında gerçekleşmiştir (Şekil 4.8).



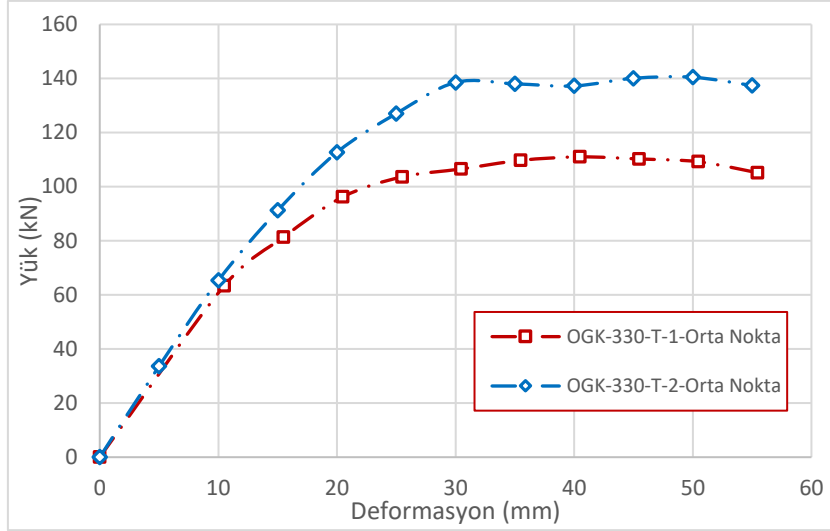
Şekil 4.8. OGK\_330\_Test\_2 göçme durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan ikinci tekil yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.9'da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere tekil yükleme 118 kN olan kapasitesine ulaşana kadar dikkate değer ölçüde yanal deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. OGK\_330\_Test\_2 yük-deplasman grafiği

Ondülin gövdeli kiriş (OGK-330) tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 112.81 kN ve 140.46 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. OGK\_330 tekil yükleme yük-deplasman grafikleri

#### 4.3.2. OGK\_330 üzerinde iki noktadan yükleme durumu

Ondülin gövdeli çelik kirişlerin iki noktasal yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



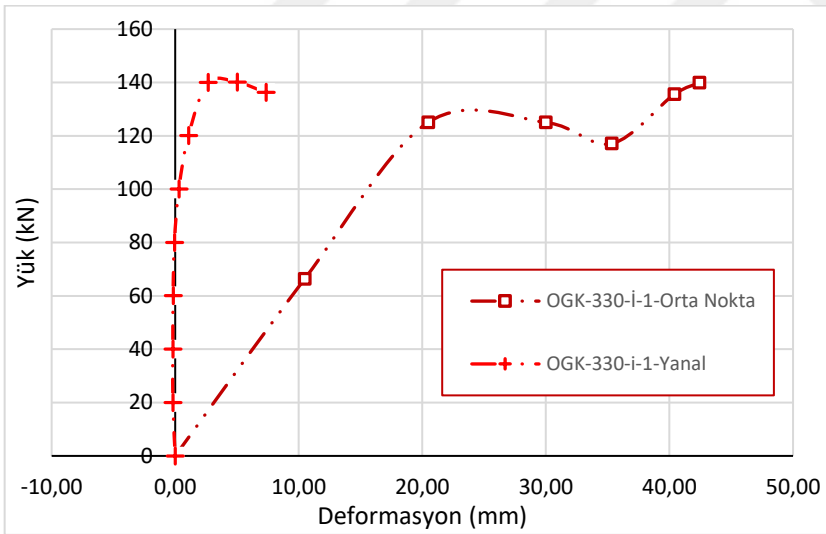
Şekil 4.11. OGK\_330 iki noktadan yükleme durumu

Geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 4.2’de detaylı olarak verilen ilk ondülin gövdeli kiriş (OGK-330) iki noktasal yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kirişler üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 140,36 kN ve 188,78 kN olarak ölçülmüştür. OGK-330 kirişi üzerindeki ilk testte kirişin 125,64 kN yüke kadar yanal deplasman değeri düşük olduğu halde bu değerden sonra kirişin üst başlığından itibaren yanal ötelendiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. OGK\_330\_Test\_3 yanal burkulma durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testinin ilkinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.13’da verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere tekil yükleme 120 kN’u aştıktan sonra kirişin orta kısmında önemli ölçüde yanal ötelenme ölçülmüştür.



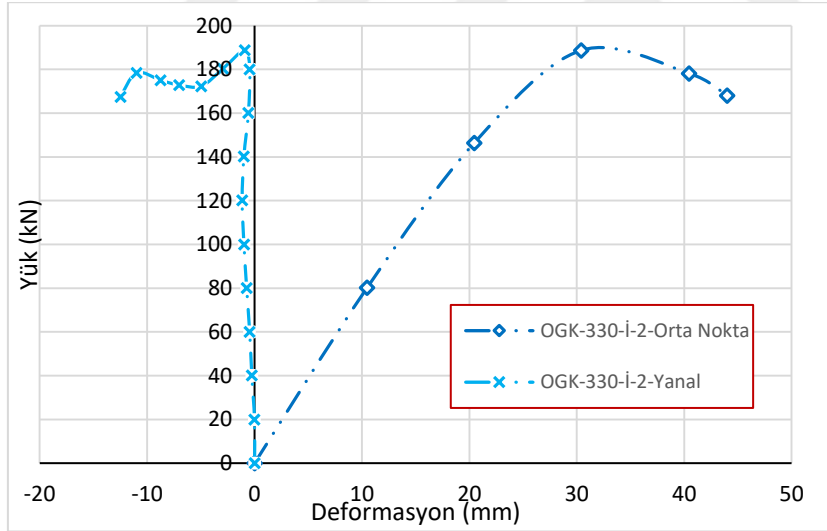
Şekil 4.13. OGK\_330\_Test\_3 yük-deplasman grafiği

OGK-330 kirişi üzerindeki iki noktasal yüklemenin ikinci testinde yanal desteklerin güçlendirilmesine bağlı olarak kirişin yük taşıma kapasitesi %34.4 artış göstererek 188.78 kN seviyesine ulaşmıştır. (Şekil 4.14).



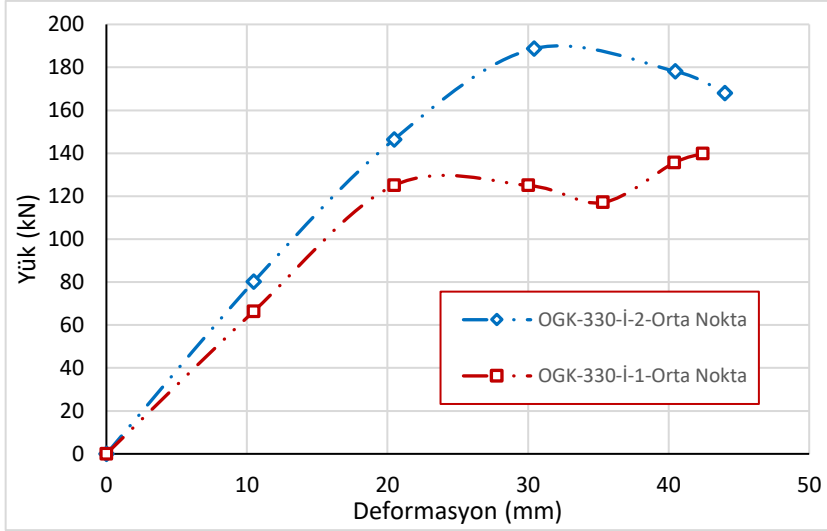
Şekil 4.14. OGK\_330\_Test\_4 yüklemeye geçme durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan ikinci iki noktadan yüklemeye sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.15'te verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere tekil yüklemeye 188,78 kN olan kapasitesine ulaşana kadar bir yanal deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. OGK\_330\_Test\_4 yük-deplasman grafiği

Ondülin gövdeli kiriş (OGK-330) iki noktadan yüklemeye testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 140,36 kN ve 188,78 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri Şekil 4.16'de verilmiştir. Yanal destek atılmasına rağmen hidrolik piston tarafından uygulanan yükün fazlaşmasıyla beraber açıklığın fazla olmasından dolayı testlerden birinde yanal burkulmadan dolayı göçme durumu gözlemlenmiştir. Yanal burkulma istenilen göçme tipi olmadığından dolayı OGK\_330 iki noktadan yüklemeye bu değer ortalamaya katılmamıştır.



Şekil 4.16. OGK\_330 iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri

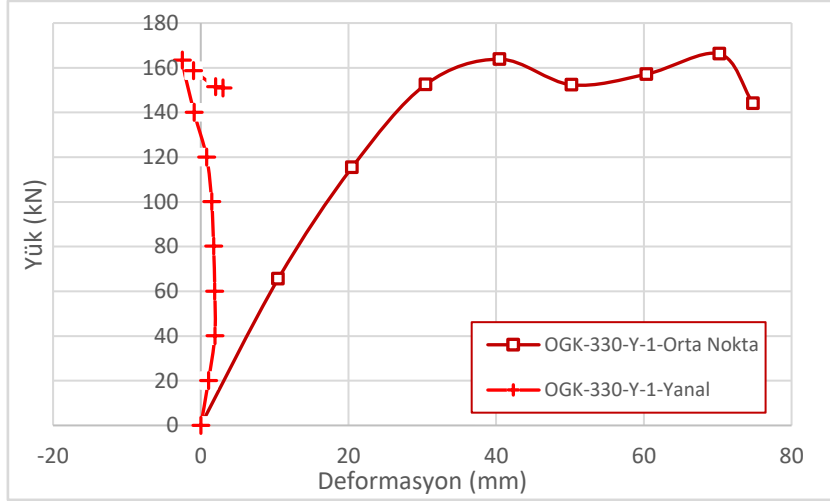
#### 4.3.3. OGK\_330 kirişleri üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu

Geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 4.2’de detaylı olarak verilen OGK-330 kirişi düzgün yayılı yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 166,08 kN ve 205,57 kN olarak ölçülmüştür. OGK-330 kirişi üzerindeki ilk testte kirişin 146,81 kN yüke kadar yanıl deplasman değeri önemsenmeyecek kadar düşük olduğu halde bu değerden sonra kirişin üst flanşından itibaren 28,92 mm’ye kadar yanıl öteleniği ve kirişin 166.08 kN değerinde yanıl burkulma nedeniyle göçtüğü gözlemlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. OGK\_330\_Test\_5 yanıl burkulma durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan düzgün yayılı yükleme testinin ilkinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.18’de verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere tekil yükleme 160 kN’u aştıktan sonra kirişin orta kısmında önemli ölçüde yanıl ötelenme ölçülmüştür.



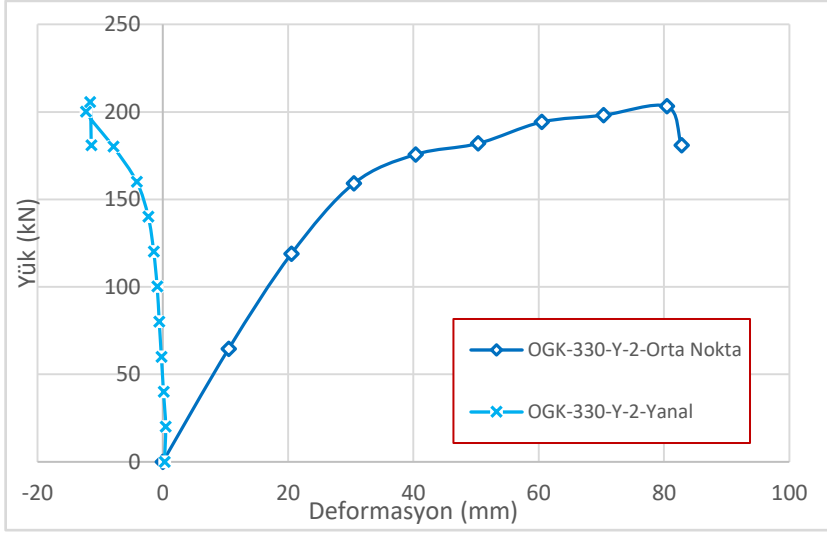
Şekil 4.18. OGK\_330\_Test\_5 yük-deplasman grafiği

OGK-330 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yüklemenin ikinci testinde yanal desteklerin güçlendirilmesine bağlı olarak kirişin yük taşıma kapasitesi %23,8 artış göstererek 205,57 kN seviyesine ulaşmıştır. (Şekil 4.19).



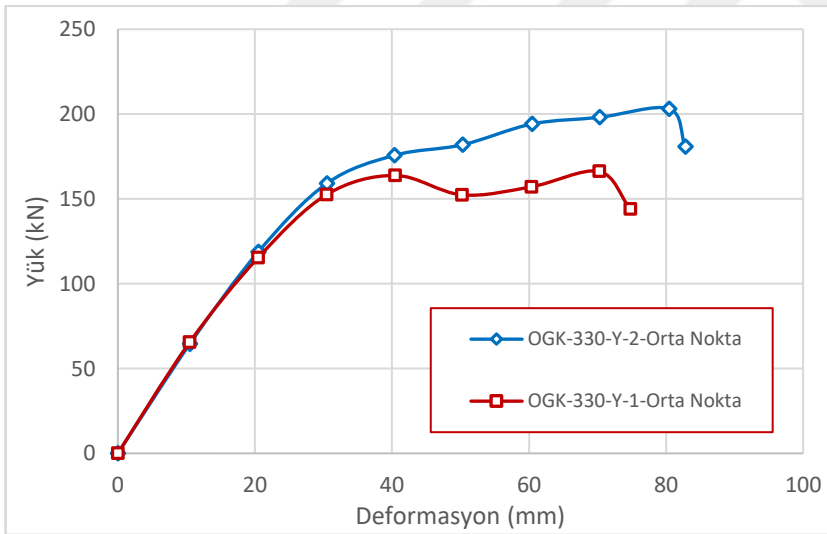
Şekil 4.19. OGK\_330\_Test\_6 göçme durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan ikinci tekil yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.20'de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere tekil yükleme 160 kN olan kapasitesine ulaşana kadar bir yanal deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.20. OGK\_330\_Test\_6 yük-deplasman grafiği

Ondülin gövdeli kiriş (OGK-330) tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 166,08 kN ve 205,57 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. OGK\_330 iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri

#### 4.3.4. OGK\_500 kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu

Yeni yanal deplasman engelleyiciler üretildikten ve sisteme monte edildikten sonra, geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 4.4'te detaylı olarak verilen ondülin gövdeli kiriş (OGK-500) tekil yük altında test edilmiştir. Bu deney serisinde yanal deplasmanlar Bölüm 3'te detaylı olarak anlatılan çelik yanal tutucularla engellenmiştir.

Bu çelik kirişler üzerinde yapılan tekrarlı iki yükleme sonucunda kirişlerin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 277,04 kN ve 294,21 kN olarak ölçülmüştür (Şekil 4.22). Daha önceki testlerdeki yüksek kapasite farkları yeni yanal tutucular sayesinde bu testlerde sonuçlardan da görüldüğü üzere sınırlandırılmıştır. OGK-500 kirişi üzerindeki ilk testte kiriş yük taşıma kapasitesine ulaştığında 2,33 mm yanal deplasman gözlenmiş olup bu değer kabul edilebilir aralıklardadır.



Şekil 4.22. OGK\_500\_Test\_7 tekil yükleme durumu

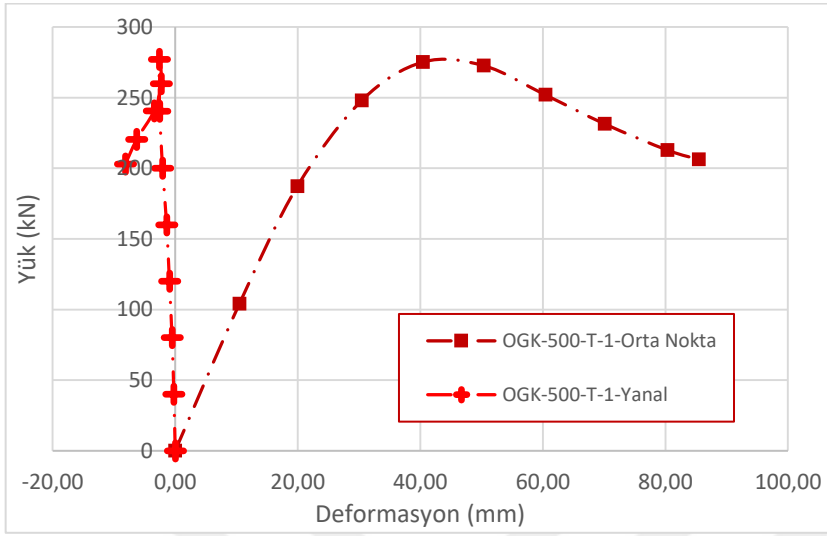
OGK\_500 kirişi üzerinde yapılan ilk tekil yükleme testinde kiriş nihai yük taşıma noktasını aşıttıktan sonra OGK\_500 tekil yükleme testlerinde olduğu gibi çelik kirişin orta noktasının üst başlığında pistonun bastığı bölgenin hemen kenarlarında lokal burkulmalar gözlemlenmiştir (Şekil 4.23). 5mm'lik ince gövde kalınlığına rağmen gövdede burkulma gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.23. OGK\_500\_Test\_7 göçme durumu

OGK-500 kirişi üzerinde yapılan ilk yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düzey deplasman Şekil 4.24'te verilmiştir. Aynı

şekilden görüleceği üzere tekil yükleme nihai yük taşıma kapasitesini aşana kadar kirişte önemli ölçüde yanal ötelenme ölçülmemiştir.



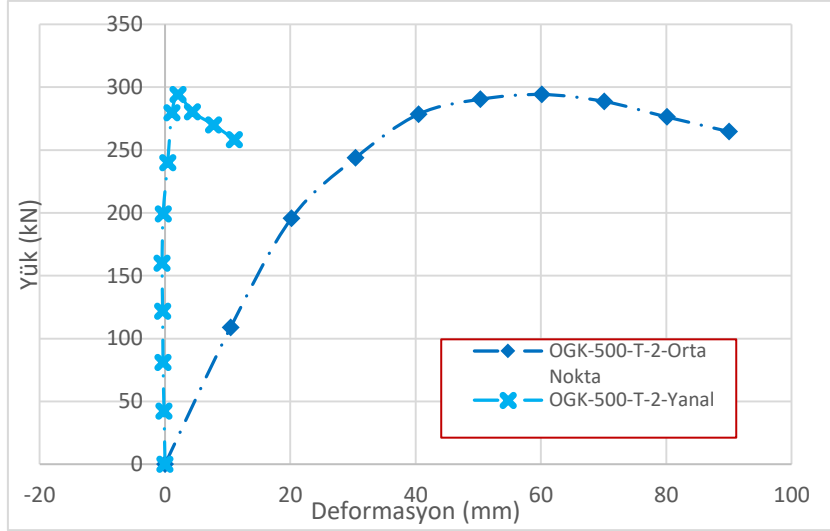
Şekil 4.24. OGK\_500\_Test\_7 yük-deplasman grafiği

OGK-500 kirişi üzerindeki ikinci testte ise yanal desteklerin güçlendirilmesine bağlı olarak kirişin tekil yük altında plastik davranışa geçene kadar benzer bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.25).



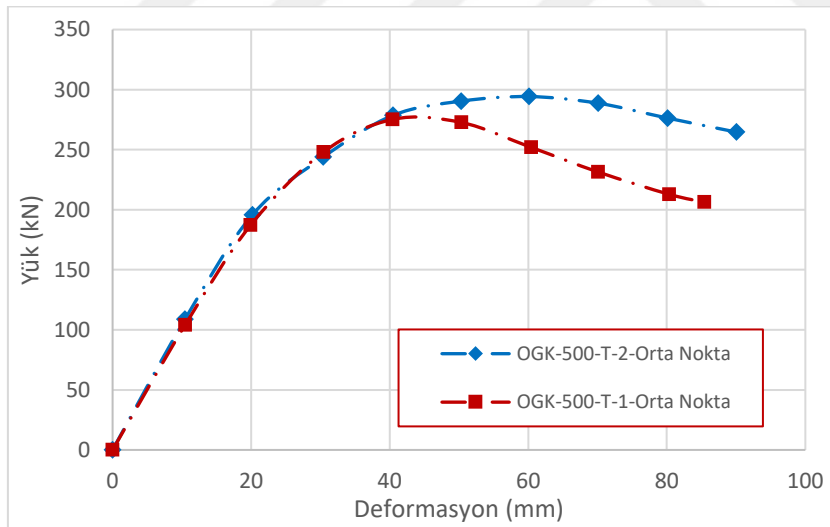
Şekil 4.25. OGK\_500\_Test\_8 göçme durumu

OGK-500 kirişi üzerinde yapılan ikinci tekil yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.26'da verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere tekil yükleme 294,21 kN olan kapasitesine ulaşana kadar bir yanal deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.26. OGK\_500\_Test\_8 yük-deplasman grafiği

Ondülin gövdeli kiriş (OGK-500) tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 277,04 kN ve 294,21 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. OGK\_500 tekil yükleme yük-deplasman grafikleri

#### 4.3.5. OGK\_500 kirişleri üzerinde iki noktadan yükleme durumu

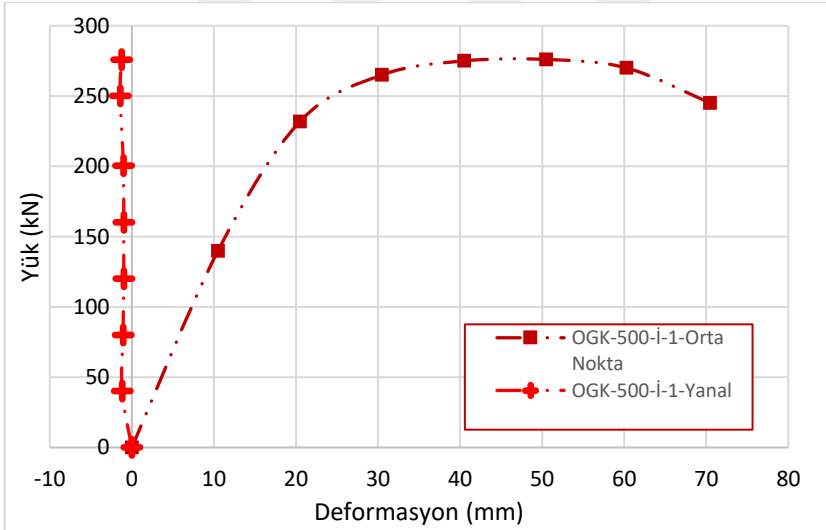
Geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 4.4'te detaylı olarak verilen OGK-500 kirişi iki noktasal yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 276,56 kN ve 334,41 kN olarak ölçülmüştür. Yanal deplasman açısından arzu edilen sonuçlar elde edilmesine karşın OGK\_500 çelik kirişine iki noktadan yük uygulamada kullanılan yük

dağıtan berkitmeli kiriş altındaki rollerlar kirişin üst flanşında aşırı basınç gerilmelerinin oluşmasına ve buna bağlı olarak yükün uygulandığı noktalarda lokal ezilmelere sebep olmuştur (Şekil 4.28).



Şekil 4.28. OGK\_500\_Test\_9 lokal ezilme durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testinin ilkinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.29’da verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere kirişin yük taşıma kapasitesine ulaşıncaya kadar yanal deplasman değeri 1,5 mm’yi geçmemiştir.



Şekil 4.29. OGK\_500\_Test\_9 yük-deplasman grafiği

OGK\_500 çelik kirişine iki noktadan yük uygulamada kullanılan yük dağıtan berkitmeli kiriş altındaki roller’lar kiriş üst flanşında aşırı gerilmelere sebep olmuştur ve test esnasında verilen yükleme durumunun çelik kirişlerin yapı uygulamaları da göz önüne alınarak uygun olmadığı görülmüştür. Yapı uygulamalarında tasarımda kullanılabilecek olan tali kirişleri temsilen OGK\_500 çelik kirişinin ikinci testinde iki

noktadan yükleme için kullanılan roller'ların yerine 370x185x30 mm ebatlarındaki çelik levhalar kullanılmıştır (Şekil 4.30). OGK-500 kirişi üzerindeki iki noktasal yüklemenin ikinci testinde OGK'e uygulanan yükün dağıtılmasına bağlı olarak kirişin yük taşıma kapasitesi %21,1 artış göstererek 334,41 kN seviyesine ulaşmıştır.



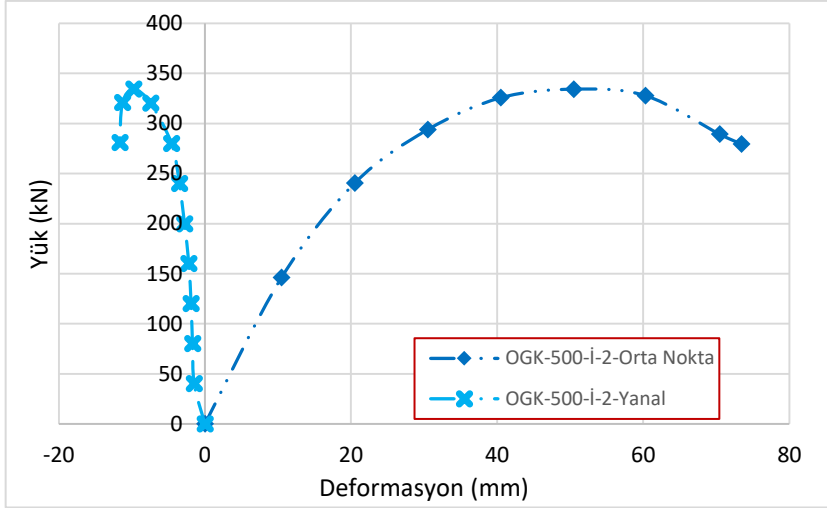
Şekil 4.30. OGK\_500\_Test\_10 iki noktadan yükleme durumu

OGK\_500 çelik kirişi iki noktadan yükleme testinin ikincisinin göçme durumu Şekil 4.31'de verilmiştir.



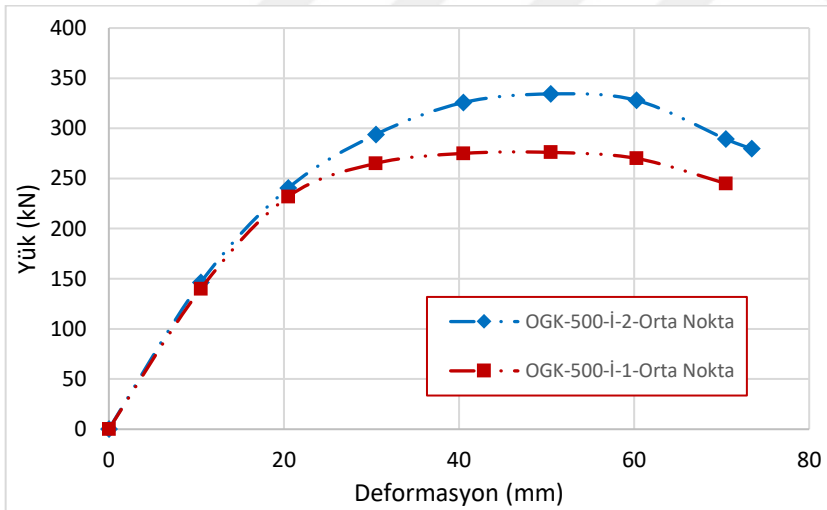
Şekil 4.31. OGK\_500\_Test\_10 göçme durumu

OGK-500 kirişi üzerinde yapılan ikinci iki noktadan yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.32'de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere tekil yükleme 180 kN olan kapasitesine ulaştıktan sonra kısıtlı da olsa yanal deplasman yapmaya başladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.32. OGK\_500\_Test\_10 yük-deplasman grafiği

Ondülin gövdeli kiriş (OGK-500) iki noktadan yükleme testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 276,56 kN ve 334,41 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri Şekil 4.33'de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere yük-deformasyon değerlerine karşılık eğriler incelendiği zaman istenilen tasarım eğri grafiğinin ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.33. OGK\_500 iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri

#### 4.3.6. OGK\_500 kirişleri üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu

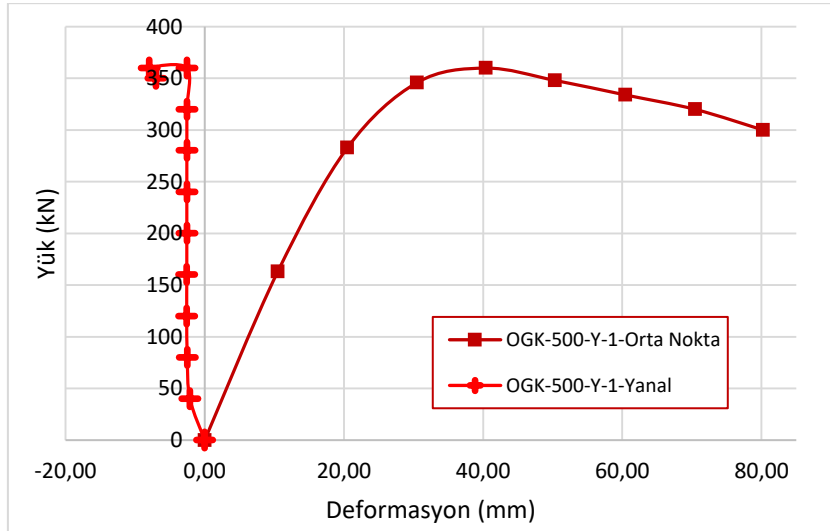
Geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 4.4'te detaylı olarak verilen OGK-500 kirişi düzgün yayılı yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 360,04 kN ve 417,16 kN olarak ölçülmüştür. OGK-500 kirişi üzerindeki ilk testte kirişin 360,04 kN yüke kadar yanal deplasman değeri önemsenmeyecek kadar düşük olduğu halde bu

değerden sonra kirişin üst flanşından itibaren 7,52 mm'ye kadar yanıl ötelendiği ve kirişin 166.08 kN değerinde yanıl burkulma nedeniyle göçtüğü gözlemlenmiştir (Şekil 4.34).



Şekil 4.34. OGK\_500\_Test\_11 yanıl burkulma durumu

OGK-500 kirişinde yapılan düzgün yayılı yükleme testinin ilkinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.35'te verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere tekil yükleme 359 kN'u aşttıktan sonra kirişin orta kısmında önemli ölçüde yanıl ötelenme ölçülmüştür.



Şekil 4.35. OGK\_500\_Test\_11 yük-deplasman grafiği

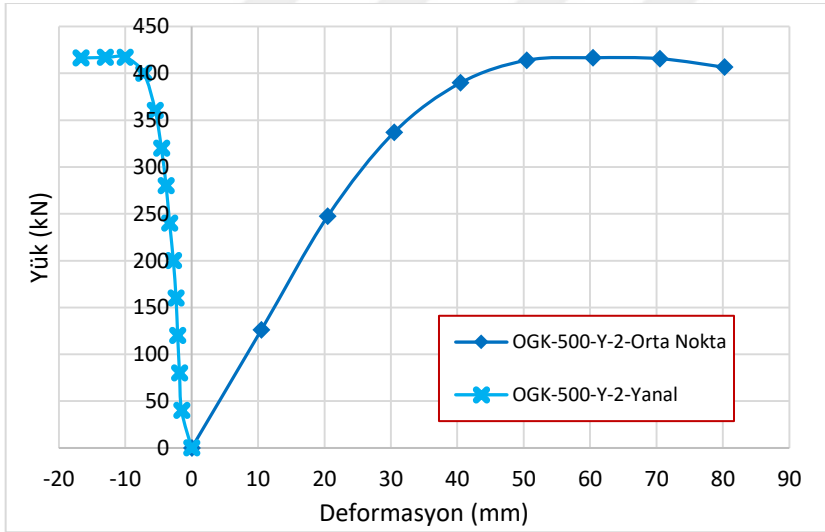
OGK-500 kirişindeki düzgün yayılı yüklemenin ikinci testinde kirişin yük taşıma kapasitesi 417,16 kN seviyesine ulaşmıştır. Yapılan ikinci yayılı yükleme testinde

OGK\_500'ün plastik davranışa geçtikten sonra kirişin üst flanşında basınç gerilmelerinden kaynaklanan dalgalanmalar Şekil 4.36'da verilmiştir.



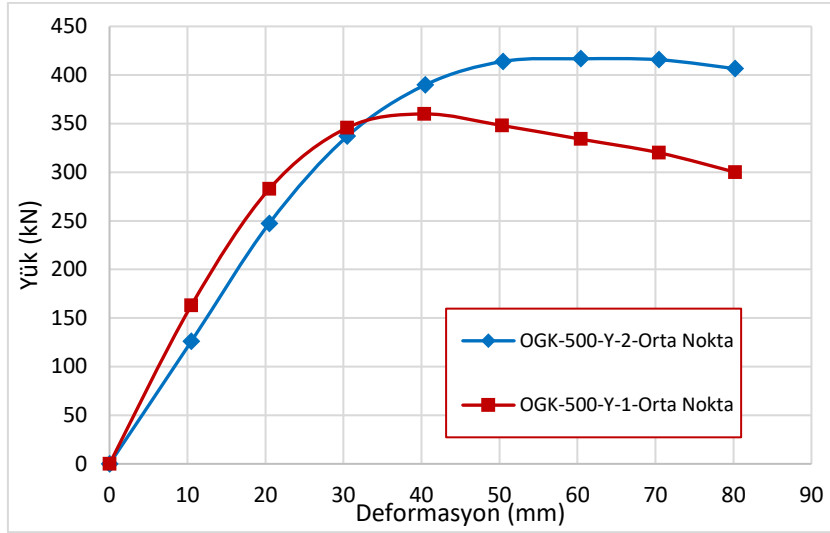
Şekil 4.36. OGK\_500\_Test\_12 göçme durumu

OGK-500 kirişi üzerinde yapılan ikinci tekil yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.37'de verilmiştir.



Şekil 4.37. OGK\_500\_Test\_12 yük-deplasman grafiği

Ondülin gövdeli kiriş (OGK-500) tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 360,04 kN ve 417,16 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri Şekil 4.38'de verilmiştir.



Şekil 4.38. OGK\_500 yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri

#### 4.3.7. OGK\_415 kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu

Geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 4.3’de detaylı olarak verilen ondülin gövdeli kiriş (OGK\_415) tekil yük altında test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan tekrarlı iki yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 151,51 kN ve 150,23 kN olarak ölçülmüştür. Şekil 4.39’da gösterilen OGK-415 kirişi üzerindeki ilk testte; kirişin 119,52 kN yüke kadar herhangi bir yanal deplasman yapmadığı fakat bu değerden sonra kiriş kapasitesine ulaştıktan sonra kirişin üst başlığından itibaren yanal ötelendiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.39. OGK\_415\_Test\_13 tekil yükleme durumu

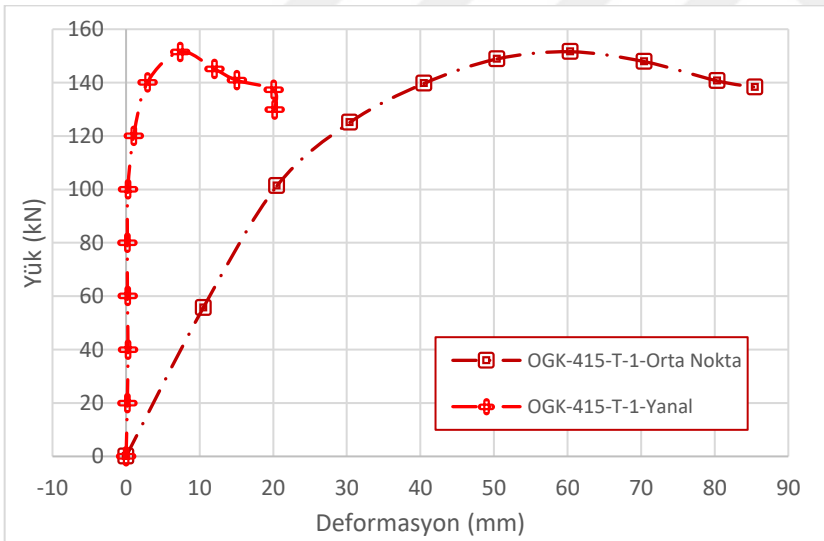


(a)

(b)

Şekil 4.40. OGK\_415\_Test\_13 tekil yükleme a) Yanal burkulma; b) Göçme durumu

OGK-4150 kirişi üzerinde yapılan ilk yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.41’de verilmiştir.



Şekil 4.41. OGK\_415\_Test\_13 yük-deplasman grafiği

OGK-415 kirişi üzerindeki ikinci testte ise yanıl desteklerin güçlendirilmesine bağılı olarak kirişin yük taşıma kapasitesi 150,23 kN seviyesine ulaşarak neredeyse ilk test ile aynı sonucu vermiştir. (Şekil 4.42). Bu sonuç yük altında her iki kirişin tam anlamıyla kapasitesine ulaşarak beklenen göçme modunu gerçekleştirdiğini göstermiştir.

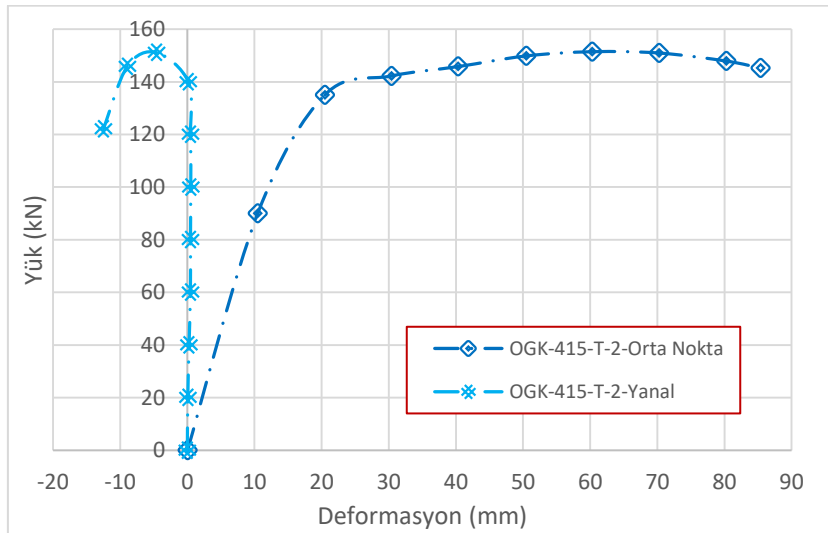


(a)

(b)

Şekil 4.42. OGK\_415\_Test\_14 a) Yanal burkulma; b) Göçme durumu

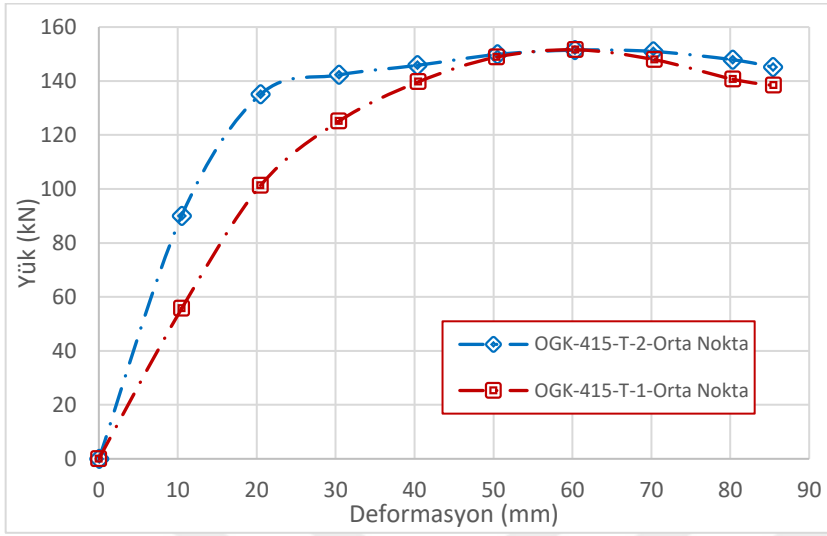
OGK-415 kirişi üzerinde yapılan ikinci tekil yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.43'te verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere tekil yükleme ikinci testinde OGK\_415 çelik kirişinin elastik bölgede yanıl deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.43. OGK\_415\_Test\_14 yük-deplasman grafiği

Ondülin gövdeli kiriş (OGK-415) tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 151,51 kN ve 150,23 kN) maksimum düşey deplasman

grafikleri Şekil 4.44'te verilmiştir. Grafiğe bakıldığı zaman her iki zarfın da üst üste örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 4.44. OGK\_415 tekil yükleme yük-deplasman grafikleri

#### 4.3.8. OGK\_415 kirişleri üzerinde iki noktadan yükleme durumu

Ondülin gövdeli çelik kirişlerin iki noktasal yük altında yanal destekli olarak yükleme çerçevesindeki deney düzeneği Şekil 4.45'te gösterilmiştir.



Şekil 4.45. Ondülin gövdelerin kiriş test iki noktadan yükleme durumu

Geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 4.3'te detaylı olarak verilen OGK-415 kirişi iki noktasal yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 213,42 kN ve 209,87 kN olarak ölçülmüştür. OGK-415 kirişi üzerindeki ilk testte kirişin yanal

deplasman değeri önemsenmeyecek kadar düşük olduğu ve kiriş kapasitesine yaklaştığında üst flanş yükleme noktaları arasında basınç gerilmelerine bağlı olarak dalgalanmalar gözlemlenmiştir (Şekil 4.46).

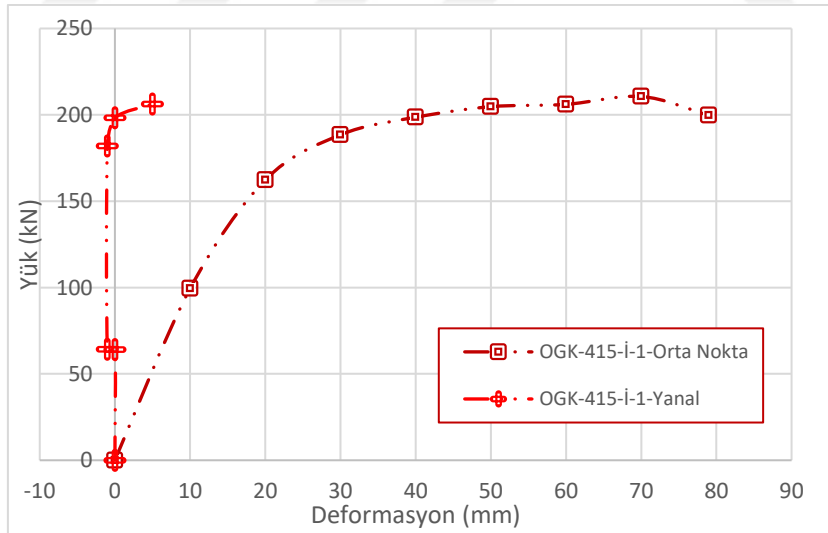


(a)

(b)

Şekil 4.46. OGK\_415\_Test\_15 a) Yanal burkulma; b) Göçme durumu

OGK-415 kirişi üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testinin ilkinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.47’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere iki noktadan yükleme testinde kirişin orta kısmında önemli ölçüde yanıl ötelenme olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.47. OGK\_415\_Test\_1 yük-deplasman grafiği

OGK-415 kirişi üzerindeki iki noktasal yüklemenin ikinci testinde kirişin yük taşıma kapasitesi ilk testte benzerlik göstererek 209,87 kN seviyesine ulaşmıştır. Kiriş kapasitesine yaklaşınca iki noktasal yük arasında oluşan basınç gerilmeleri OGK\_415 kirişinin üst flanşında ilk testte olduğu gibi dalgalanmalara sebep olmuştur (Şekil 4.48).

Kiriş gövde kalınlığı 4mm gibi çok ince bir kalınlığa sahip olmasına rağmen dalgalı form sayesinde kiriş kapasitesine ulaşıncaya kadar gövdede bir burkulma gözlemlenmemiştir.

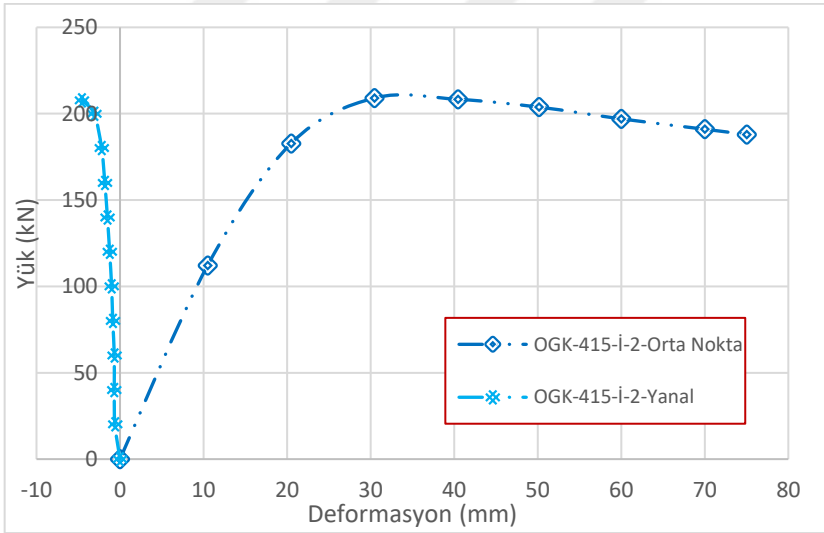


(a)

(b)

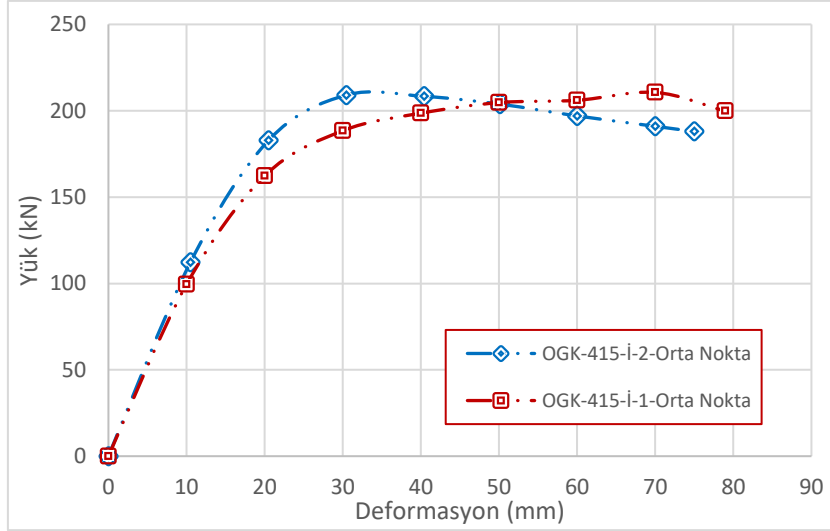
Şekil 4.48. OGK\_415\_Test\_16 a) Yanal burkulma; b) Göçme durumu

OGK-415 kirişi üzerinde yapılan ikinci iki noktadan yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.49'da verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere kirişin iki noktadan yükleme altında yanay deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.49. OGK\_415\_Test\_16 yük-deplasman grafiği

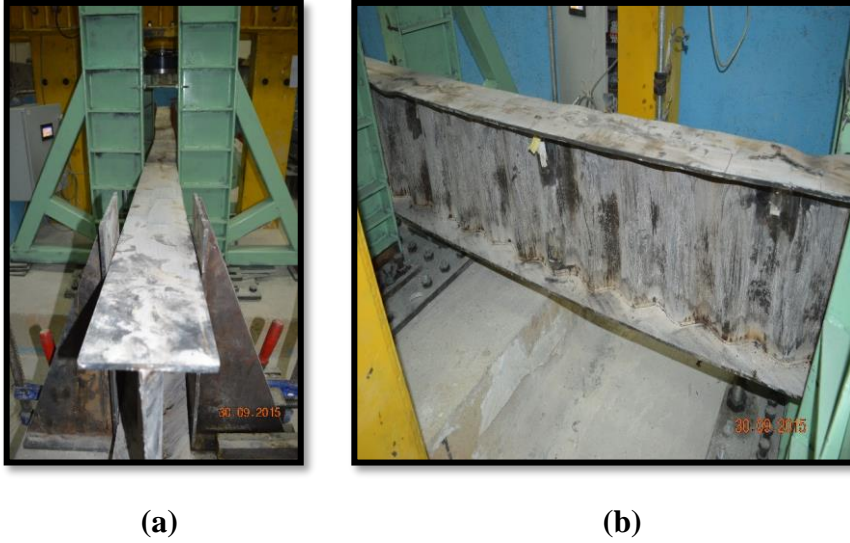
Ondülin gövdeli kiriş (OGK-415) iki noktadan yükleme testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 213,42 kN ve 209,87 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri Şekil 4.50'de verilmiştir.



Şekil 4.50. OGK\_415 iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri

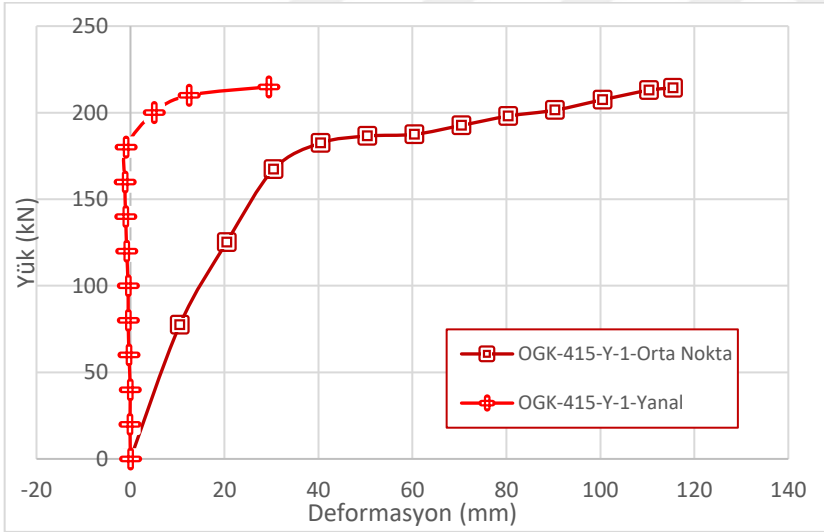
#### 4.3.9. OGK\_415 kirişleri üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu

Geometrik ve malzeme özellikleri Çizelge 4.3'te detaylı olarak verilen OGK-415 kirişi düzgün yayılı yük altında tekrarlı şekilde iki defa test edilmiştir. Bu kiriş üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda kirişin yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 215,50 kN ve 205.94 kN olarak ölçülmüştür. OGK-415 kirişi üzerindeki ilk testte kirişin elastik bölgede dikkate değer bir ölçüde yanal deplasman yapmadığı ve kirişin 215,50 kN değerinde göçtüğü gözlemlenmiştir. Göçme sırasında kiriş üst flanşının yayılı yüklemede kullanılan berkitmeli kirişin temas ettiği yüzeyde basınç gerilmelerinin yığılmasına bağlı olarak dalgalanmalar oluşmuş ayrıca temas yüzeyinin bittiği noktaların yanlarında lokal burkulmalar gözlemlenmiştir.(Şekil 4.51).



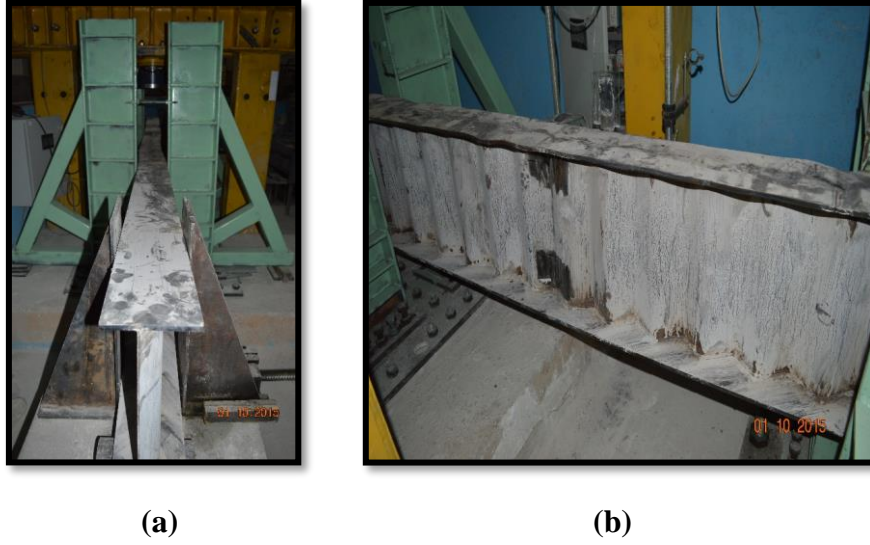
Şekil 4.51. OGK\_415\_Test\_17 a) Yanal burkulma; b) Göçme durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan düzgün yayılı yükleme testinin ilkinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.52’de verilmiştir. Aynı şekilden görüleceği üzere tekil yükleme elastik sınırlar içinde kaldığında kirişin orta kısmında önemli ölçüde yanıl ötelenme ölçülmemiştir.



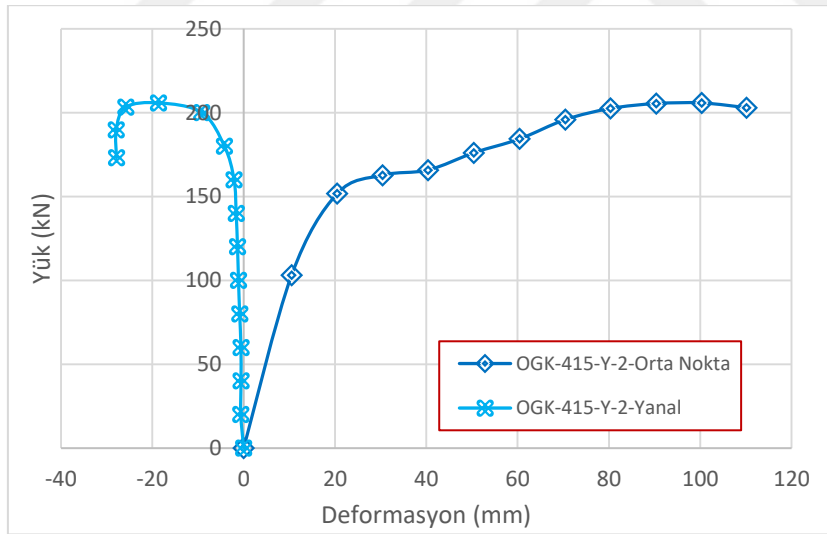
Şekil 4.52. OGK\_415\_Test\_17 yük-deplasman grafiği

OGK-415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yüklemenin ikinci testinde kirişin yük taşıma kapasitesi 205.94 kN seviyesine ulaşmıştır. Yük taşıma kapasitesine ulaşan kirişin OGK\_415 yayılı yükleme testlerinden birincisiyle aynı karakteristikte göçtüğü gözlemlenmiştir. (Şekil 4.53).



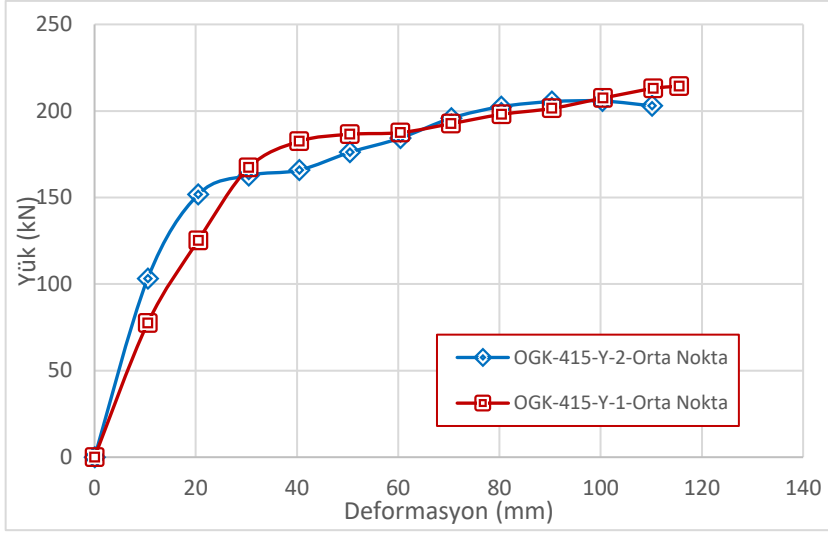
Şekil 4.53. OGK\_415\_Test\_18 a) Yanal burkulma; b) Göçme durumu

OGK-330 kirişi üzerinde yapılan ikinci tekil yükleme sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasman Şekil 4.54’te verilmiştir. Aynı şekilde görüleceği üzere tekil yükleme 158,75 kN olan kapasitesine ulaşana kadar bir yan deplasman yapmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.54. OGK\_415\_Test\_18 yük-deplasman grafiği

Ondülin gövdeli kiriş (OGK-415) tekil yük testlerinde elde edilen yük taşıma kapasitelerine karşılık (sırasıyla 215,50 kN ve 205,94 kN) maksimum düşey deplasman grafikleri Şekil 4.55’te verilmiştir.



Şekil 4.55. OGK\_415 yayılı yüklemeye yük-deplasman grafikleri

#### 4.4. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Kompozit Döşeme Testleri

Eleman bazında olduğu gibi ondülin gövdeli kompozit döşeme kirişlerin üzerinde yapılan testlerin deneysel amaç taşınması için her bir döşeme kirişi için iki tekrar olacak şekilde testler yapılmıştır. Bu kapsamda, ondülin gövdeli OGK\_330 döşeme kirişi için iki noktasal yük altında iki (2), OGK\_415 döşeme kirişi için düzgün yayılı yük altında iki (2) ve OGK\_500 döşeme kirişleri için tekil yük altında iki (2) olmak üzere toplamda altı (6) döşeme testi gerçekleştirilmiştir.

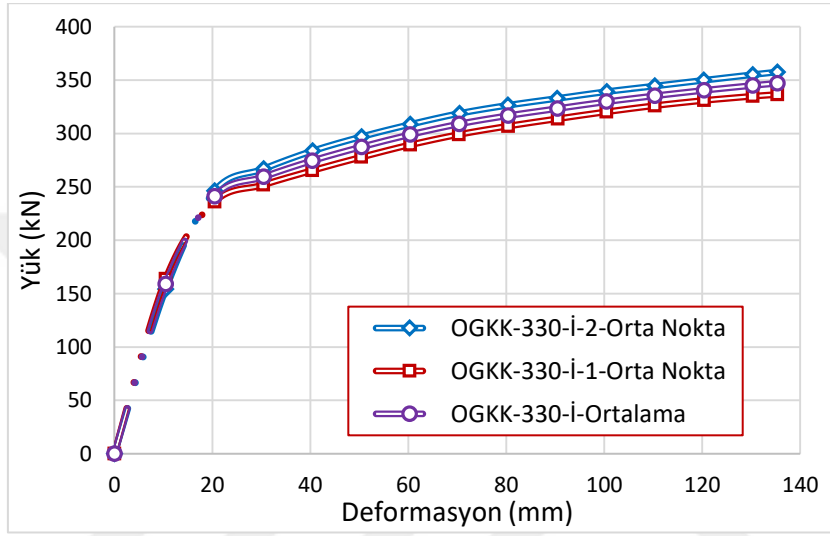
##### 4.4.1. OGKK\_330 kirişleri üzerinde iki noktasal yüklemeye durumu

OGKK-330 kompozit kirişi üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda Şekil 4.56'da gösterildiği üzere göçmeler yaşanmıştır. OGKK\_330 kirişlerinin göçme anındaki yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 336,48 kN ve 357,57 kN olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.56. OGKK\_330 döşeme kirişleri iki noktadan yüklemeye göçme durumları

OGKK-330 kompozit döşeme kirişi üzerinde yapılan iki noktadan yükleme testlerinin sonucunda yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey deplasmanlar Şekil 4.57’de verilmiştir. Eleman bazında yapılan testlerde 140.36 kN ve 188.78 kN taşıma kapasiteleri ölçülen ondülin gövdeli kirişlerin kompozit döşeme olarak testleri yapıldığı zaman kapasiteleri 336,48 kN ve 357,57 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar ondülin gövdeli OGK\_330 kirişleri kompozit olarak test edildiği zaman kapasiteleri %239,7 ve %189,4 arttığını göstermiştir. OGKK\_330 kirişlerinin deneysel çalışmasından elde edilen yük nihai yük taşıma kapasitesi değerlerinin ortalamaları alınarak SEA’leriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.57. OGK\_330 kompozit kirişleri iki noktadan yükleme yük-deplasman grafikleri

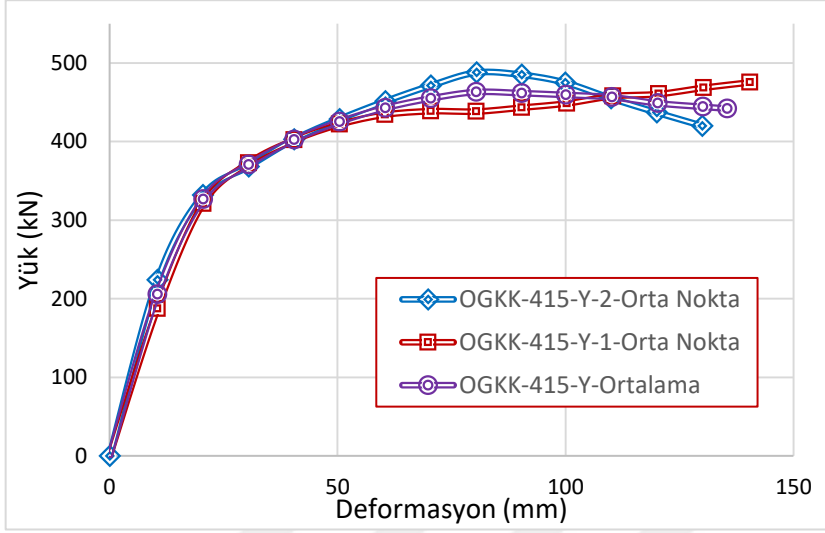
#### 4.4.2. OGKK\_415 kirişleri üzerinde düzgün yayılı yükleme durumu

OGK-415 kompozit kirişi üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda Şekil 4.58’de gösterildiği üzere göçmeler yaşanmıştır. OGK\_415 kirişlerinin göçme anındaki yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 475,29 kN ve 420.33 kN olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.58. OGKK\_415 döşeme kirişleri düzgün yayılı yükleme göçme durumları

OGKK-415 kompozit döşeme kirişi üzerinde yapılan düzgün yayılı yükleme testlerinin sonucunda kirişin yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı maksimum düşey deplasmanlar Şekil 4.59’da verilmiştir. Eleman bazında yapılan testlerde sırasıyla 215,50 kN ve 205,94 kN taşıma kapasiteleri ölçülen ondülin gövdeli kirişlerin kompozit döşeme olarak testleri yapıldığı zaman kapasiteleri 475,29 kN ve 420,33 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar ondülin gövdeli OGK\_415 kirişleri kompozit olarak test edildiği zaman kapasiteleri %220,6 ve %204,1 arttığını göstermiştir. OGKK\_415 kirişlerinin deneysel çalışmasından elde edilen yük nihai yük taşıma kapasitesi değerlerinin ortalamaları alınarak SEA’leriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.59. OGKK\_415 düzgün yayılı yükleme yük-deplasman grafikleri

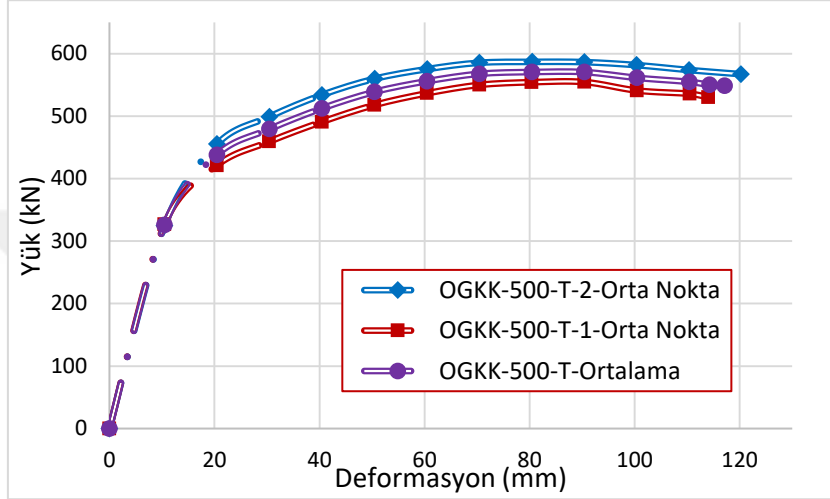
#### 4.4.3. OGKK\_500 kirişleri üzerinde tekil yükleme durumu

OGKK-500 kompozit kirişi üzerinde yapılan yüklemeler sonucunda Şekil 4.60’ta gösterildiği üzere göçmeler yaşanmıştır. OGKK\_500 kirişlerinin göçme anındaki yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 565,56 kN ve 587,74 kN olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.60. OGKK\_500 döşeme kirişleri İki noktadan yükleme göçme durumları

OGKK-500 kompozit döşeme kirişi üzerinde yapılan tekil yükleme testlerinin sonucunda yük taşıma kapasitesine karşılık yaptığı düşey deplasmanlar Şekil 4.61'de verilmiştir. Eleman bazında yapılan testlerde 277,04 kN ve 294,21 kN taşıma kapasiteleri ölçülen ondülin gövdeli kirişlerin kompozit döşeme olarak testleri yapıldığı zaman kapasiteleri 565,56 kN ve 587,74 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar ondülin gövdeli OGK\_500 kirişleri kompozit olarak test edildiği zaman kapasiteleri %204,1 ve %199,8 arttığını göstermiştir. OGKK\_500 kirişlerinin deneysel çalışmasından elde edilen yük nihai yük taşıma kapasitesi değerlerinin ortalamaları alınarak SEA'leriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.61. OGK\_500 kompozit kirişleri tekil yükleme yük-deplasman grafikleri

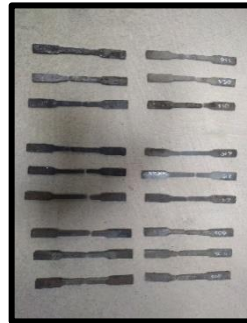
#### 4.5. Optimum Boyutlandırılan Kirişlerin Malzeme Testleri

##### 4.5.1. Çelik çekme testleri

Ondülin gövdeli çelik kirişlerin malzeme özelliklerini belirlemek için OGK\_330, OGK\_415 ve OGK\_500 kirişlerinin her birinin gövde ve başlığından 3'er adet olmak üzere toplam 18 adet kupon numunesi test edilmiştir. (Şekil 4.62)

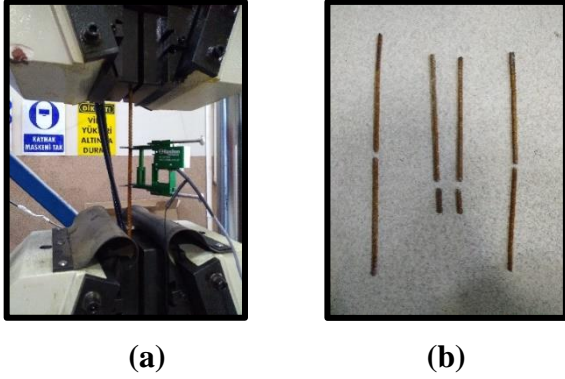


(a)



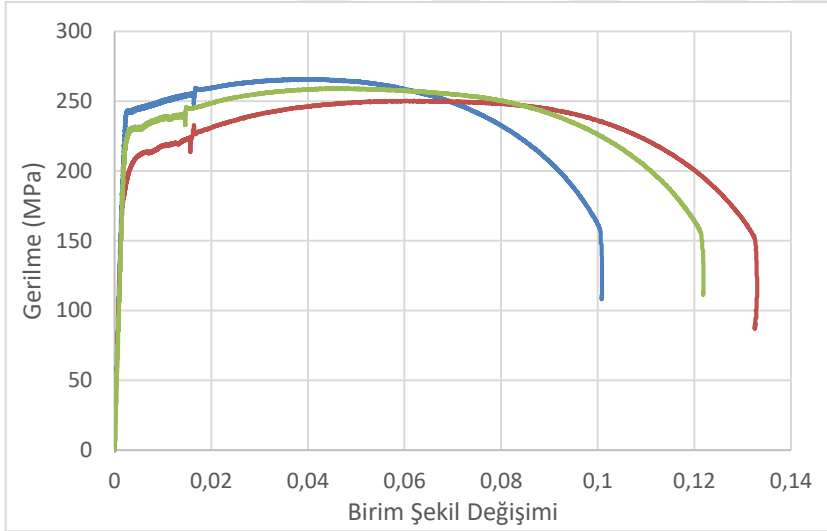
(b)

Şekil 4.62. a) Çelik kupon malzeme deneyi; b) Deney sonrası kuponlar



Şekil 4.63. a) Hasır donatı malzeme deneyi; b) Deney sonrası donatılar

Yapılan malzeme testleri sonucunda OGK\_330, OGK\_415 ve OGK\_500 kirişlerinin ortalama akma gerilmeleri sırasıyla 240 MPa, 235 MPa ve 220 MPa olarak bulunmuştur. Ondülin gövdeli çelik kirişlerin elastite modülleri ortalama  $1,92 \times 10^5$  MPa, tanjant modülü 1400 MPa olarak hesaplanmıştır. OGKK'lerin betonarme döşemeleri için kullanılan hasır donatı malzeme deneylerinden elastite modülü  $2,09 \times 10^5$  MPa, akma gerilmesi 250 MPa, ve tanjant modülü 1500 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.63). Sonlu Elemanlar analizleri için poisson oranı ise 0.3 alınmıştır. OGK\_300 kiriş malzemesinin yük deplasman eğrileri Şekil 4.64'te verilmiştir.



Şekil 4.64. OGK\_330 kupon test sonuçları

#### 4.5.2. Döşeme betonu malzeme basınç dayanımları

Yapılan beton basınç testlerinden malzeme dayanımları sırasıyla 386,2 kN, 383,3 kN ve 343,8 kN olarak ölçülmüştür (Şekil 4.65). Elde edilen veriler OGKK'lerin fabrikasyon sürecinde kullanılan betonun sınıfının ortalama C20'ye tekabül ettiğini göstermektedir.

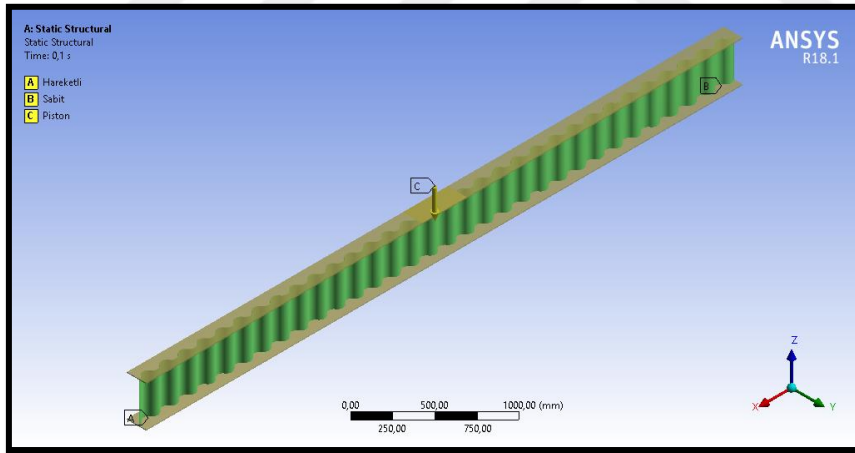


Şekil 4.65. Ondülin gövdeli kompozit döşeme kirişinin beton basınç deneyi

#### 4.6. Ondülin Gövdeli Kirişlerin Sonlu Elemanlar Analizleri

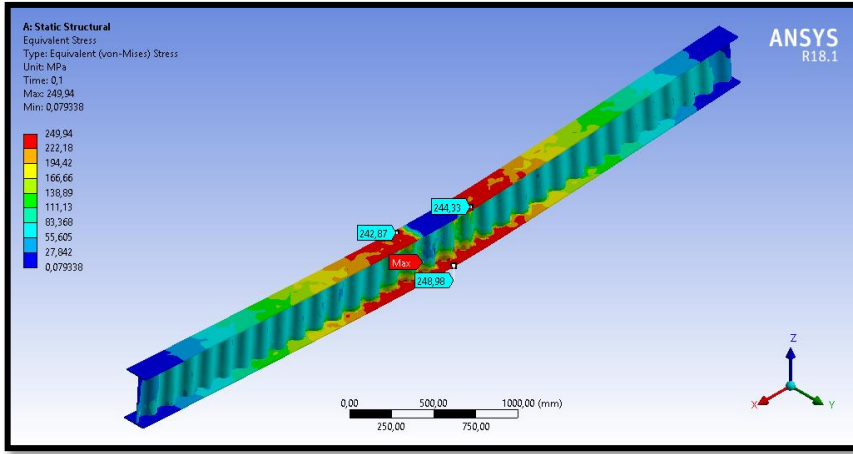
##### 4.6.1. OGK\_330 kirişi sonlu elemanlar tekil yükleme durumu

Şekil 4.66 OGK\_330 kirişinin ANSYS- Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen orta nokta deplasmanlarının ortalaması olan 55,23 mm'lik deplasman uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak üst başlığa 10 adımda ve 100 alt adımda etki ettirilmiştir.



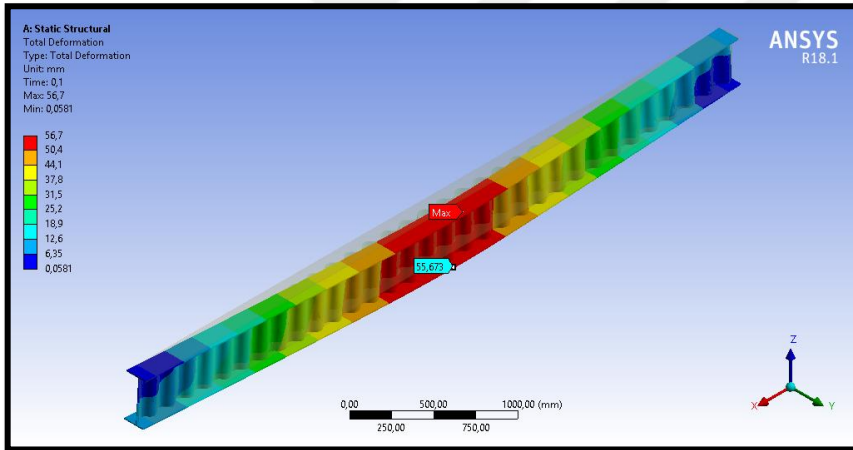
Şekil 4.66. Ondülin gövdeli kirişe SEA ile uygulanan tekil yük

Deneysel çalışmadan elde edilen 55,23 mm'lik göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst başlığının yakınılarında 249,94 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.67).



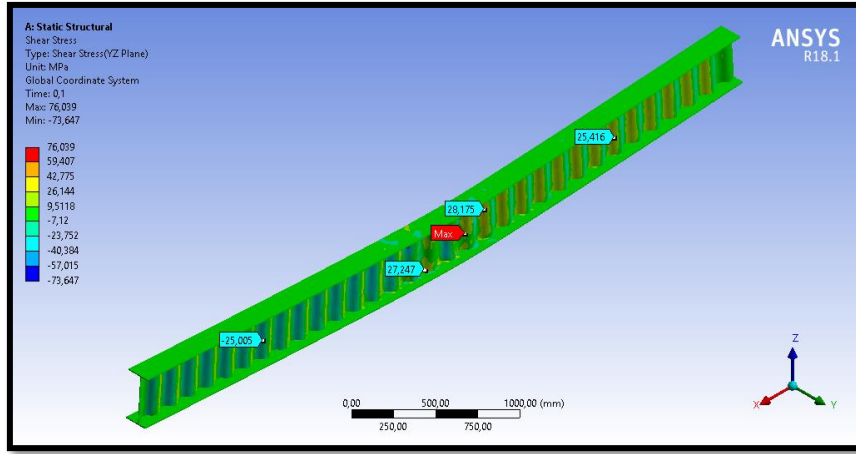
Şekil 4.67. OGK\_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme

DeneySEL çalışmadan elde edilen 55,23 mm'lik göçme deplasmanı kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deformasyon yanal deplasmanın da etkisiyle 56,70 mm olarak kiriş ortasından ölçülmüştür. (Şekil 4.68).



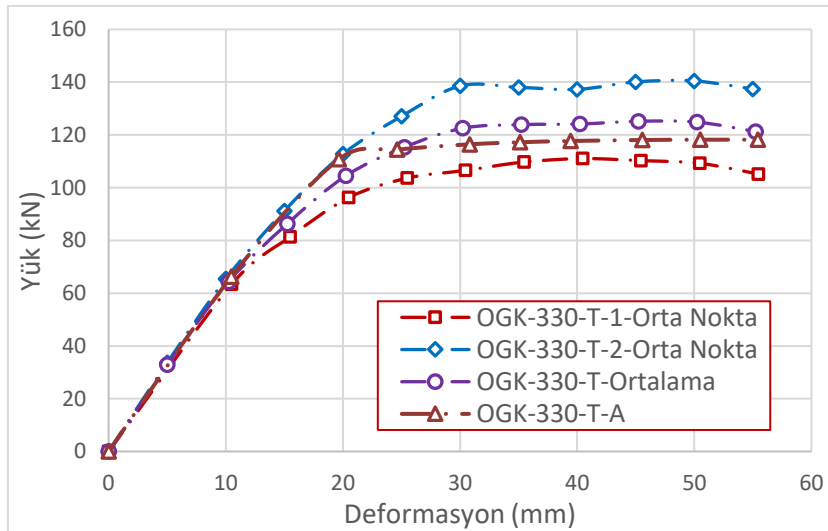
Şekil 4.68. OGK\_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman

55,23 mm'lik göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.69'da görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 76,04 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.69. OGK\_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmesi

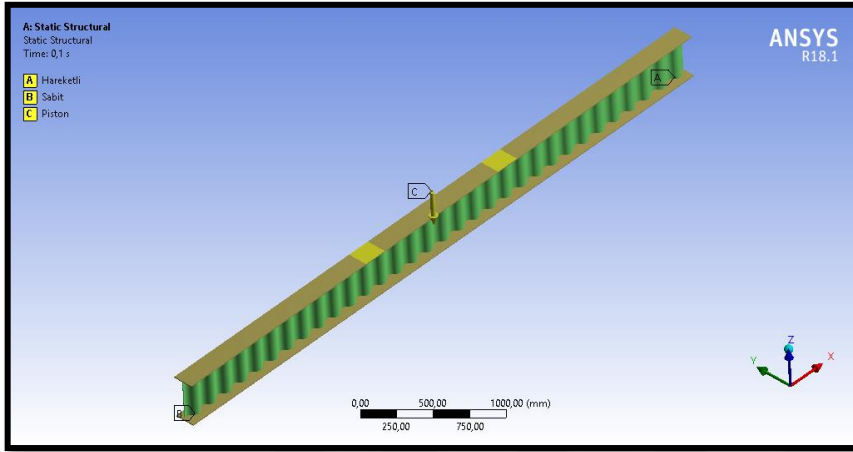
DeneySEL çalışmada deplasman ölçerler hem alt hem de üst flanşa yerleştirilmiştir. Fakat yük altında üst flanşa ezilmeler meydana geldiği için başlıkta dalgalanmalar oluşmuştur. Bu yüzden ezilmenin olmadığı ve gerçek deplasman değerlerinin gözlemleyebildiğimiz alt başlık deplasman değerleri dikkate alınmıştır. Yük hücresi üst flanşa yerleştirildiği için ANSYS sonuçlarında da üst flanştaki reaksiyon kuvveti dikkate alınmıştır. DeneySEL çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında OGK\_330 kirişi üzerine tekil yük uygulandığı zaman kiriş orta noktasında deneySEL çalışmada yük hücresi okumasından elde edilen ortalama yük taşıma kapasitesi 125,17 kN olarak ölçülürken sonlu elemanlar yönteminde aynı deplasmanı 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta başlığından 118,17 kN olarak hesaplanmıştır. DeneySEL sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.70'de verilmiştir.



Şekil 4.70. OGK\_330 kirişinin tekil yük altında SEA ve deneySEL yük-deplasman eğrileri

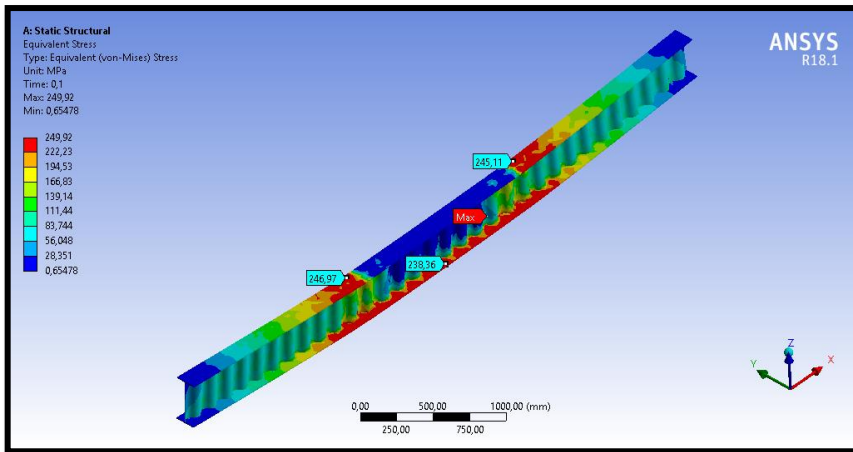
#### 4.6.2. OGK\_330 kirişi sonlu elemanlar iki noktadan yükleme durumu

Şekil 4.71 OGK\_330 kirişinin ANSYS- Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen göçme deplasmanı olan 42,91mm'lik üst flanş deplasmanı uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak analiz modelindeki kirişin yine üst flanşına deplasman olarak 10 adımda etki ettirilmiştir.



Şekil 4.71. Ondülin gövdeli kirişe SEA'nde uygulanan iki noktadan yük

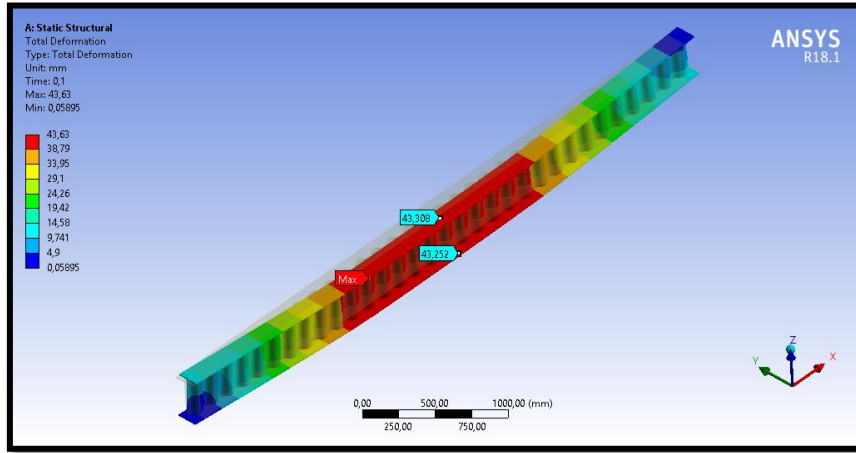
Deneysel çalışmadan elde edilen 42,91mm'lik göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst flanşta 249,92 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.72).



Şekil 4.72. OGK\_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme

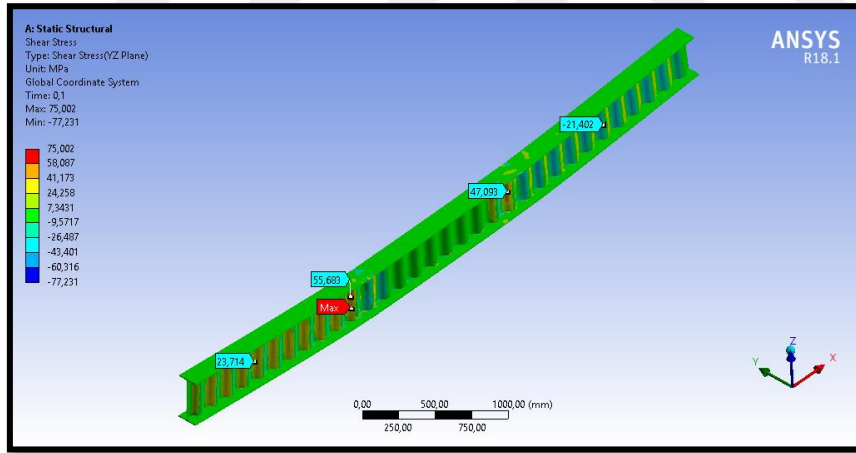
Deneysel çalışmadan elde edilen 42,91 mm'lik göçme deplasmanı kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman yanal deplasmanların da etkisiyle 43,63 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.73). Deneysel çalışmamızda

deplasman ölçerler alt flanşa yerleştirildiği için ANSYS sonuçlarında da alt başlıktaki deplasman dikkate alınmıştır.



Şekil 4.73. OGK\_330 kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında maksimum deplasman

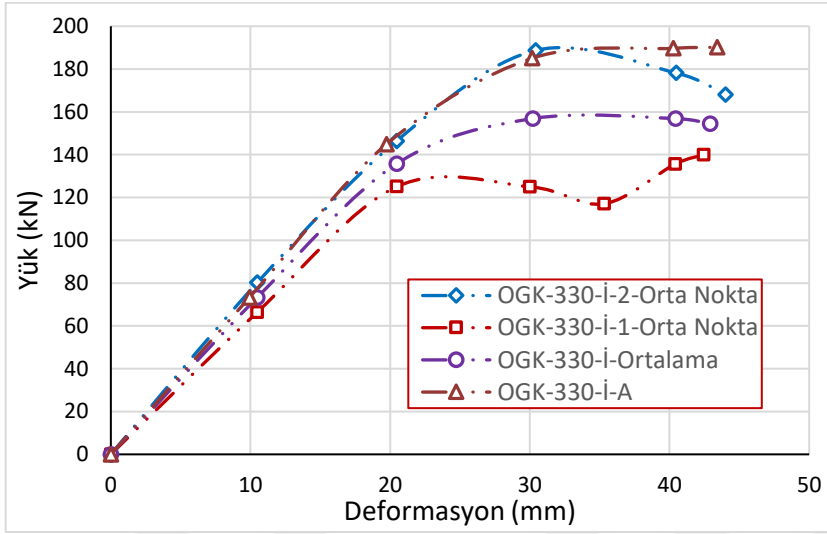
42,91 mm'lik göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.74'te görüldüğü üzere kirişin üst flanşında deformasyon uygulanan yüzeyin altındaki gövdede 75,00 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.74. OGK\_330 kirişi üzerindeki iki noktadan yük altında kesme gerilmesi

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında deneysel çalışmada OGK\_330 kirişi üzerine iki noktadan yük uygulandığı zaman pistonla bağlanan yük hücresi tarafından ölçülen ikinci deney göçme yükü 188,72 kN olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı deplasmanı 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta üst flanşında 190,17 kN olarak hesaplamıştır. OGK\_330 kirişi üzerinde yapılan ilk iki noktadan yükleme deneyinde yanal deplasmanlar yeterli seviyede engellenemediğinden kiriş yanal burkulmalı burulma davranışı göstermiştir. Bu sebeple sonlu elemanlar analizinde bu deney dikkate alınmamıştır. Deneysel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil

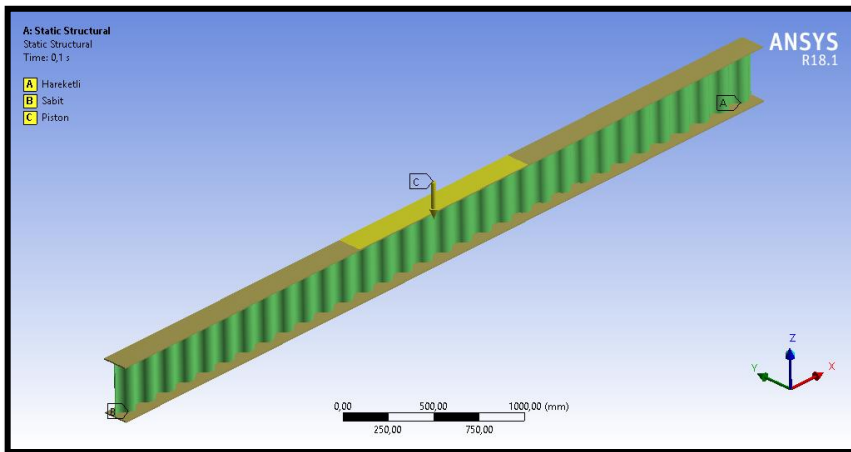
4.75'te verilmiştir.



**Şekil 4.75.** OGK\_330 kirişinin iki noktadan yük altında sea ve deneysel yük-deplasman eğrileri

#### 4.6.3. OGK\_330 kirişi sonlu elemanlar yayılı yükleme durumu

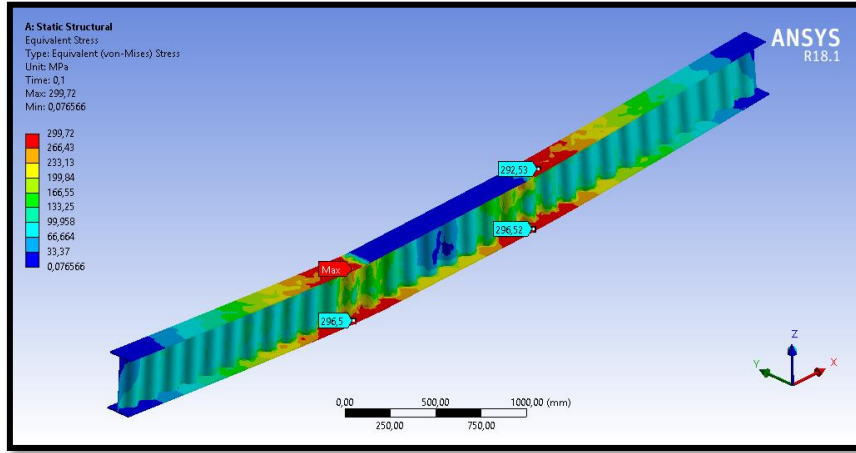
Şekil 4.76 OGK\_330 kirişinin ANSYS- Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada yayılı yükleme sonucunda elde edilen ortalama 76,64 mm'lik göçme deplasmanı yükleme testinde uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak kirişin üst flanşına 10 adımda etki ettirilmiştir.



**Şekil 4.76.** Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan yayılı yük

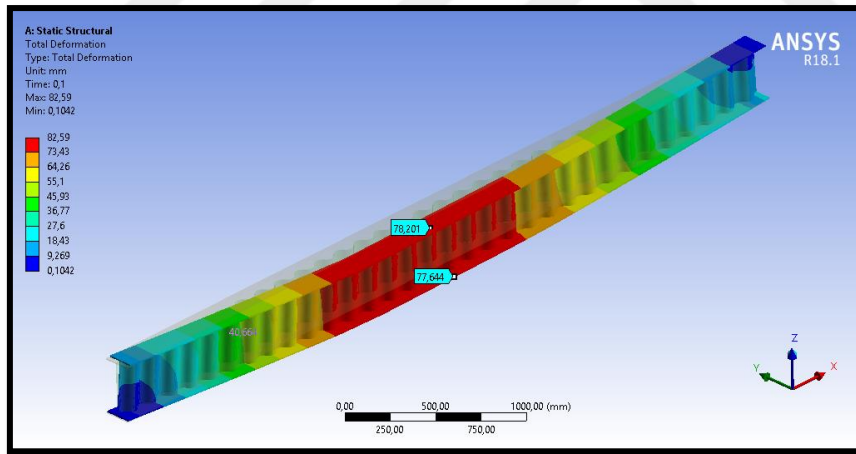
Deneysel çalışmadan elde edilen 76,64 mm'lik göçme yükü 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst başlıkta

299,72 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.77).



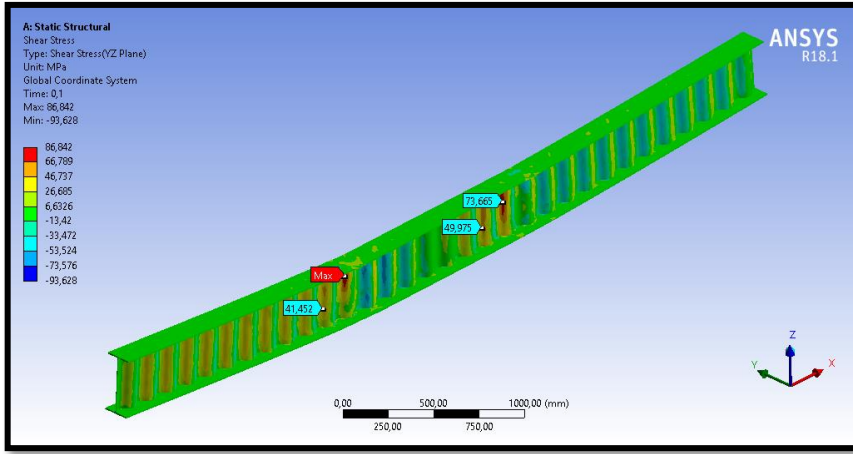
Şekil 4.77. OGK\_330 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum gerilme

DeneySEL çalışmadan elde edilen 76,64 mm'lik göçme deplasmanı kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman yanıl deplasmanların etkisiyle 82,59 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.78).



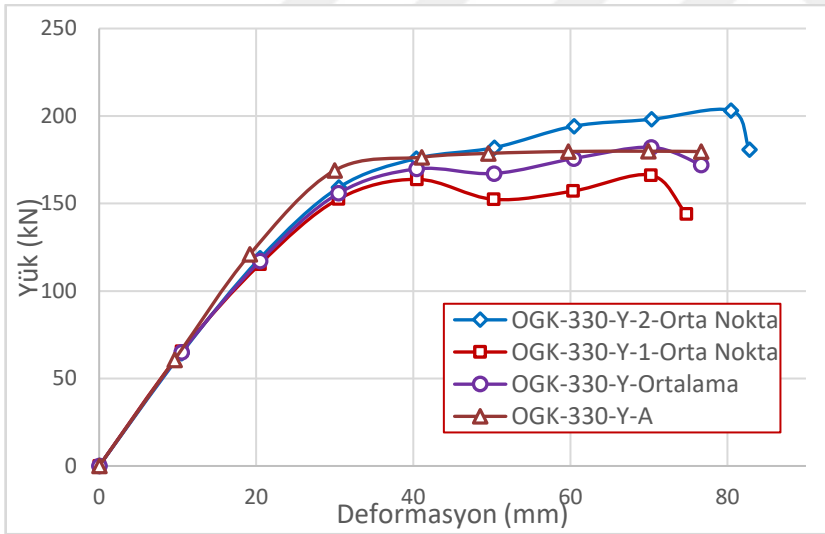
Şekil 4.78. OGK\_330 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman

76,64 mm'lik göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.79'da görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 86,84 MPa olarak mesnet noktasının yakınlarında bulunmuştur.



Şekil 4.79. OGK\_330 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmesi

DeneySEL çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında deneySEL çalışmada OGK\_330 kirişi üzerine yayılı yük uygulandığı zaman pistonla bağlanan yük hücresi tarafından ölçülen ortalama göçme yükü 182,14 kN olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı deplasmanı 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta üst başlığında 179,69 kN olarak hesaplanmıştır. DeneySEL sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.80’de verilmiştir.

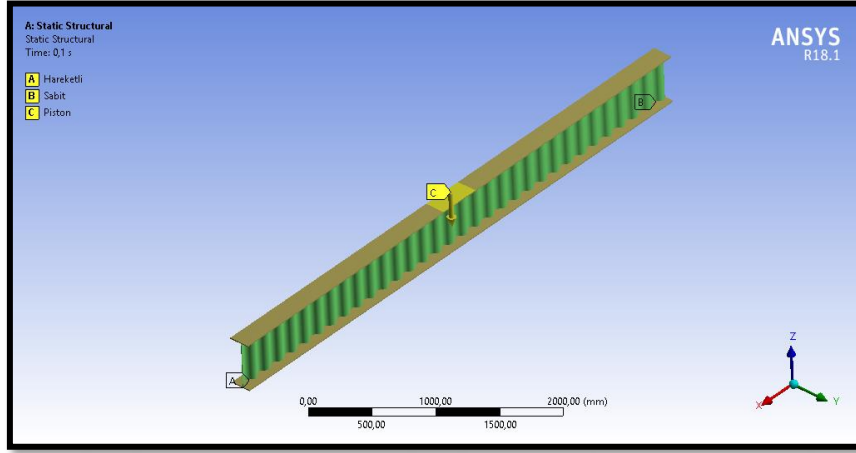


Şekil 4.80. OGK\_330 kirişinin yayılı yük altında sea ve deneySEL yük-deplasman eğrileri

#### 4.6.4. OGK\_415 kirişi sonlu elemanlar tekil yükleme durumu

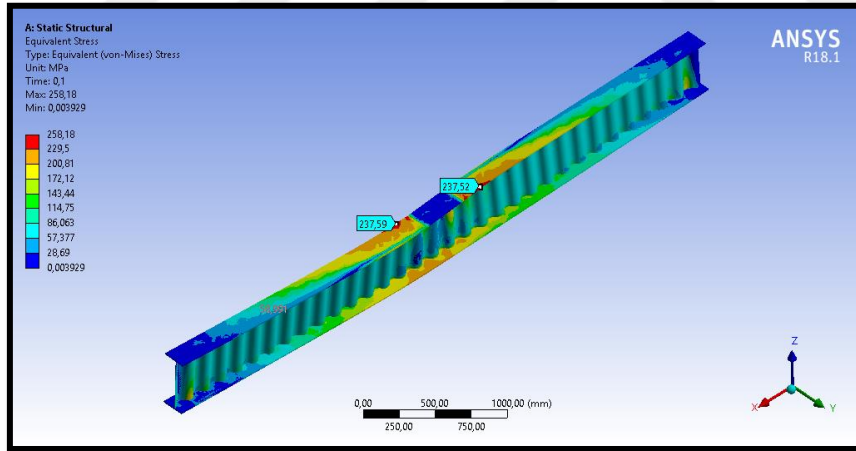
Şekil 4.81 OGK\_415 kirişinin ANSYS Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. DeneySEL çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen

göçme deplasmanı olan 85,44 mm'lik deplasman uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak üst flanşa basınç olarak 10 adımda ve 100 alt adımda etki ettirilmiştir.



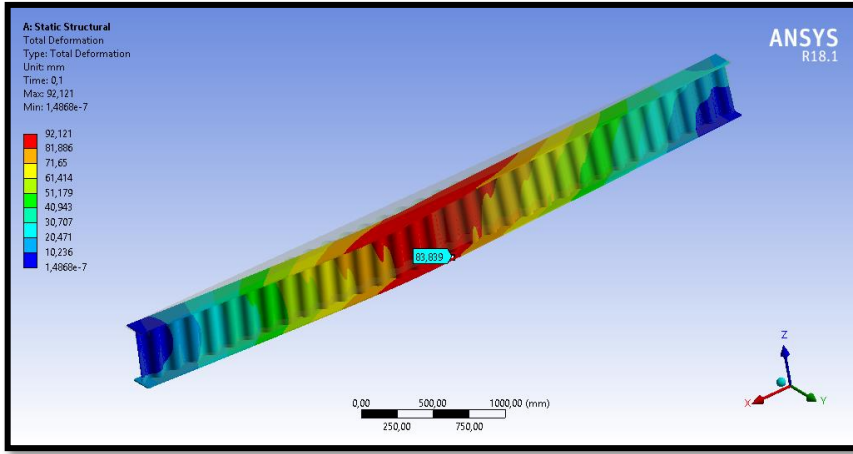
Şekil 4.81. OGK\_415 SEA ile uygulanan tekil yük

Deneyisel çalışmadan elde edilen 85,44 mm'lik göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesinde 258,18 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.82).



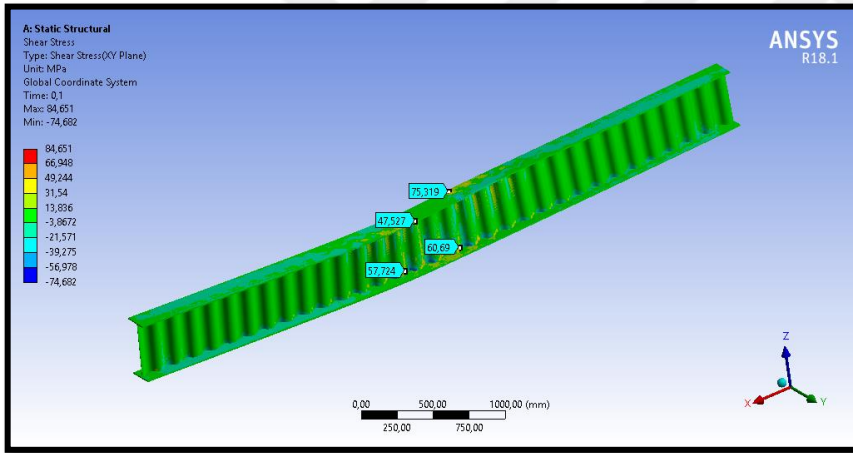
Şekil 4.82. OGK\_415 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme

Deneyisel çalışmadan elde edilen 85,44 mm'lik göçme deplasmanı kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman yanıl deplasmanlarla birlikte 92,12 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.83).



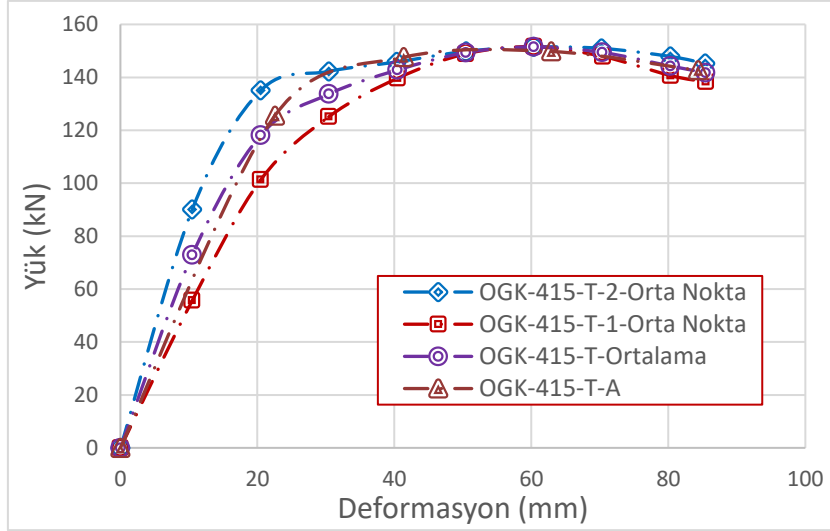
Şekil 4.83. OGK\_415 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman

85,44 mm'lik göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.84'te görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdenin orta noktasında 84,65 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.84. OGK\_415 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmesi

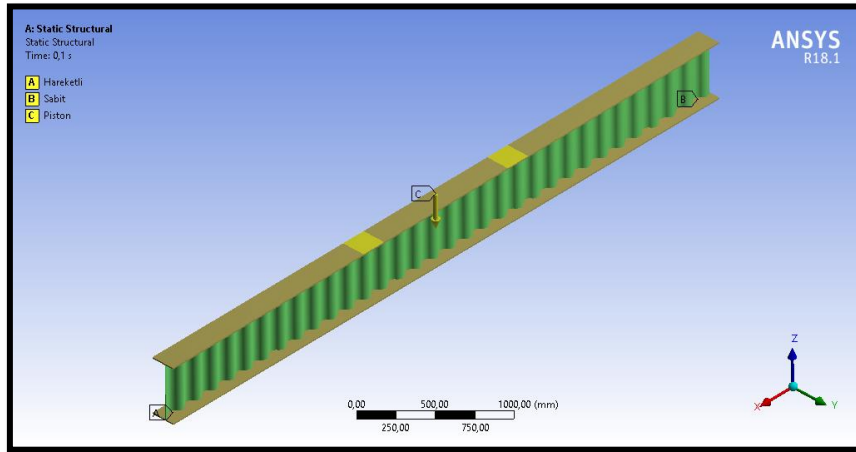
Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında deneysel çalışmada OGK\_415 kirişi üzerine tekil yük uygulandığı zaman pistonla bağlanan yük hücresi tarafından ölçülen ortalama göçme yükü 151,50 olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı deplasmanı 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta üst flanşında 150,49 kN olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.85'te verilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere laboratuvar ortamında göçme durumu oluşan kiriş ile SEA sonuçları uyusmaktadır.



**Şekil 4.85.** OGK\_415 kirişinin tekil yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri

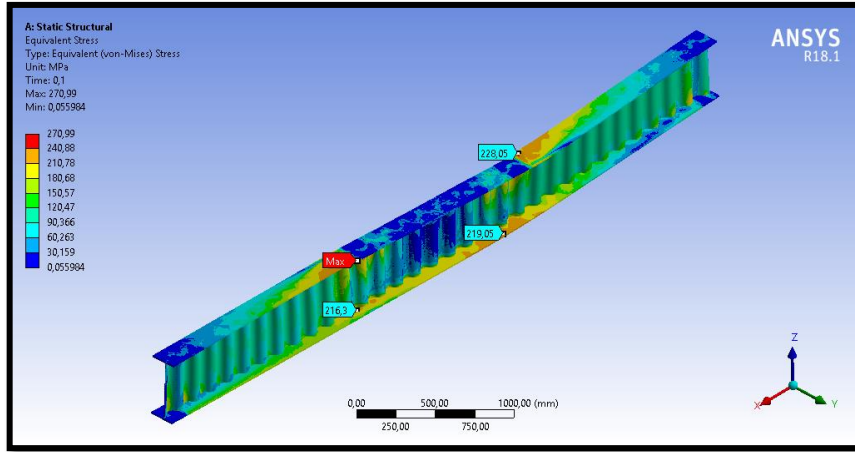
#### 4.6.5. OGK\_415 kirişi sonlu elemanlar iki noktadan yükleme durumu

Şekil 4.86 OGK\_415 kirişinin ANSYS-Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen göçme yükü olan 72,20 mm'lik deplasman değeri testlerde uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak üst flanşa 10 adımda etki ettirilmiştir.



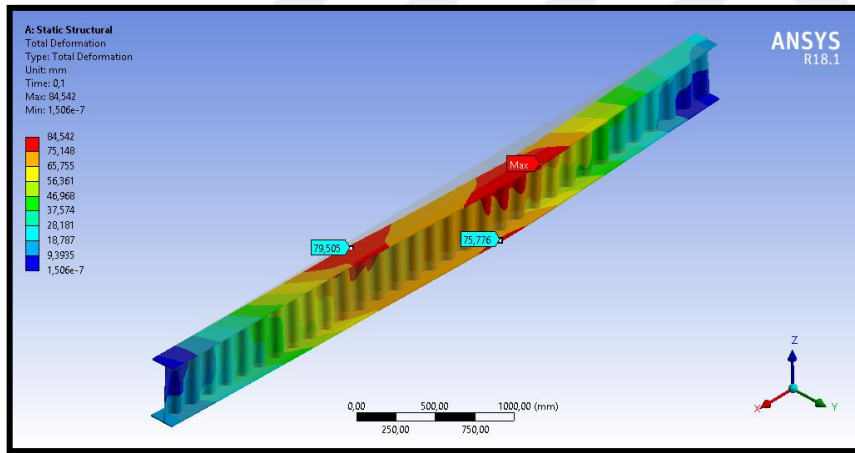
**Şekil 4.86.** Ondülin gövdeli kirişe SEA ile uygulanan iki noktasal yük

Deneysel çalışmadan elde edilen 72,20 mm'lik göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst flanşa 270,99 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.87).



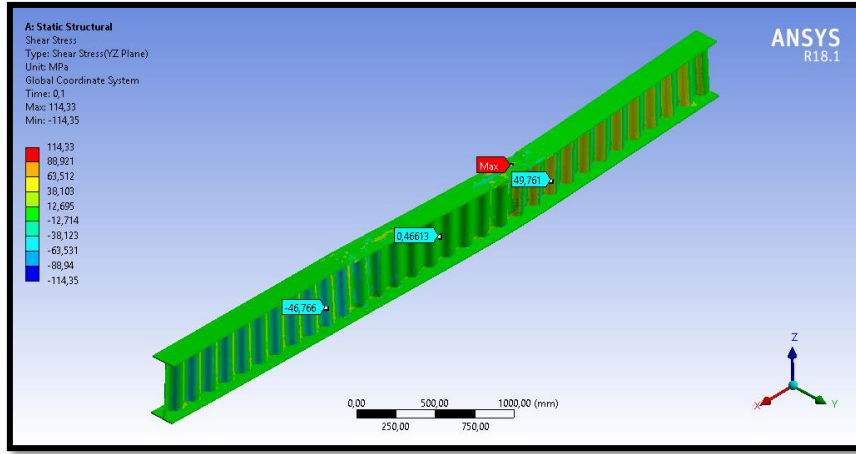
Şekil 4.87. OGK\_415 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum gerilme

Deneysel çalışmadan elde edilen 72,20 mm'lik deplasman değeri kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman yanal deplasmanlarda dikkate alınarak 84,54 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.88). Deneysel çalışmamızda deplasman ölçerler alt flanşa yerleştirildiği için ANSYS sonuçlarında da alt flanştaki deplasman dikkate alınmıştır.



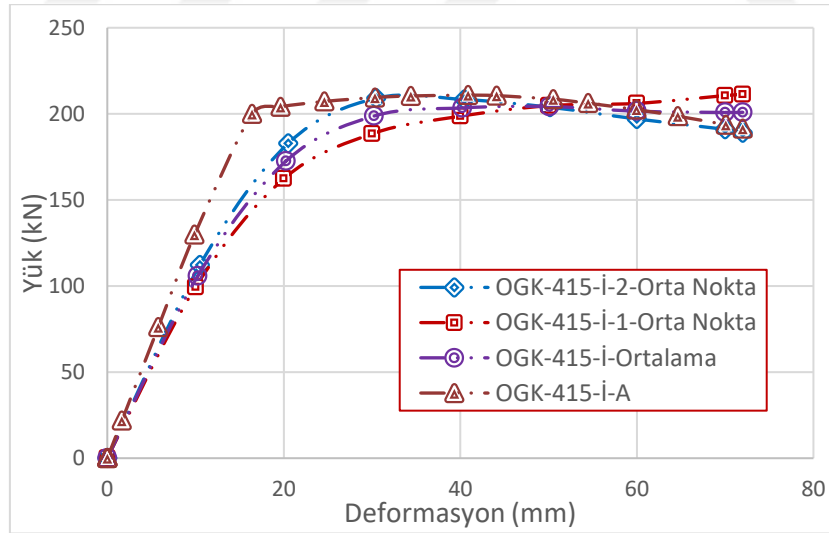
Şekil 4.88. OGK\_415 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum deplasman

72,20 mm'lik göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.89'da görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 114,33 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.89. OGK\_415 kirişi üzerindeki iki noktaysal yük altında kesme gerilmesi

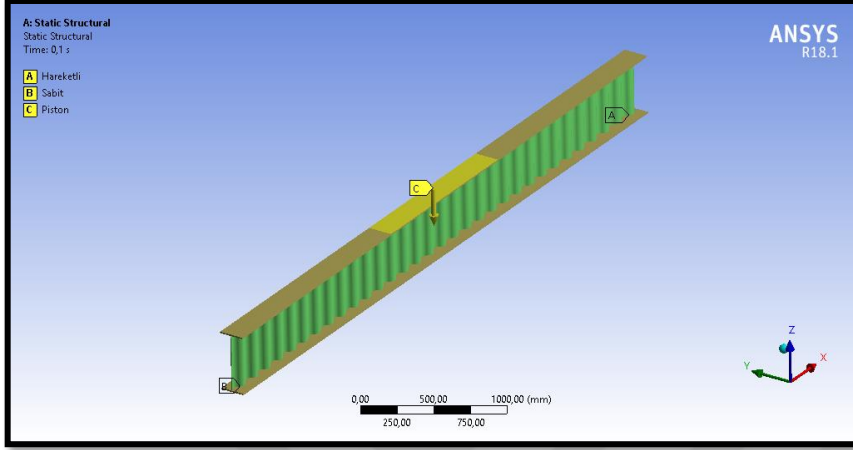
Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında, deneysel çalışmada OGK\_415 kirişi üzerine iki noktadan yük uygulandığı zaman pistonla bağlanan yük hücresi tarafından ölçülen ortalama göçme yükü 213,30 kN olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı deplasmanı 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta üst flanşında 210,84 kN olarak hesaplamıştır. Deneysel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.90'da verilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere laboratuvar ortamında iki noktasal yük altında göçme durumu oluşan kiriş ile SEA sonuçları uyusmaktadır.



Şekil 4.90. OGK\_415 kirişinin iki noktasal yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri

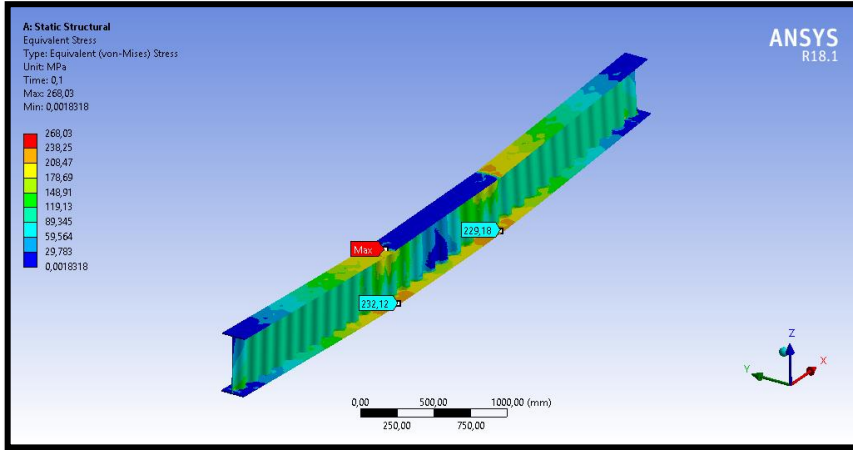
#### 4.6.6. OGK\_415 kirişin sonlu elemanlar yayılı yüklemeye durumu

Şekil 4.91 OGK\_415 kirişinin ANSYS Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada yayılı yüklemeye sonucunda elde edilen göçme deplasmanı olan 112,81 mm'lik deplasman uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak kirişin üst flanşa 10 adımda ve 100 alt adımda etki ettirilmiştir.



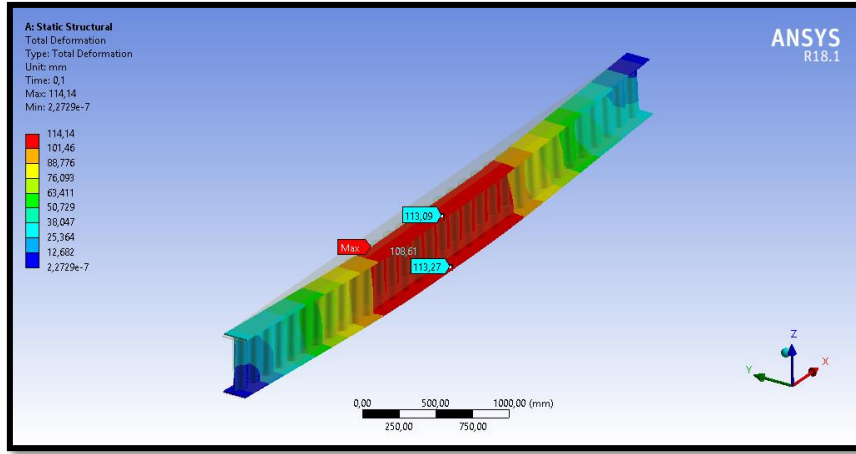
Şekil 4.91. Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan yayılı yük

Deneysel çalışmadan elde edilen 112,81 mm'lik göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst flanşa 268,03 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.92).



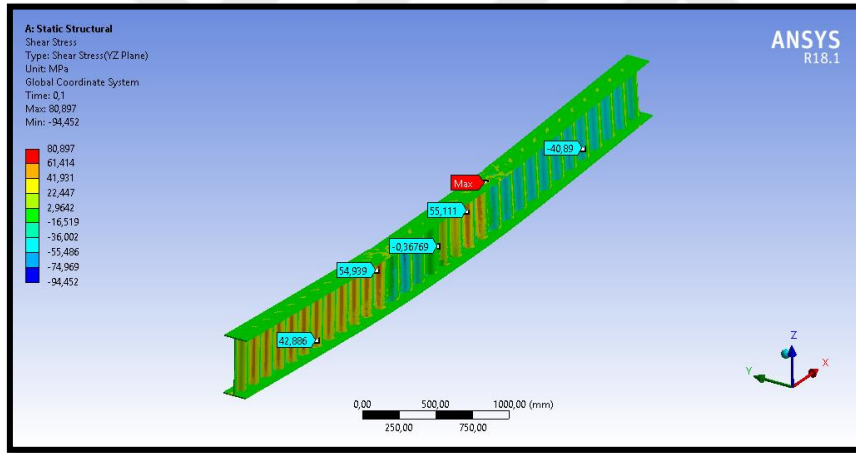
Şekil 4.92. OGK\_415 kirişin üzerindeki yayılı yük altında maksimum gerilme

Deneysel çalışmadan elde edilen 112,81 mm'lik ortalama göçme deplasmanı kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman yanıl deplasmanların da hesaba katılması sebebiyle 114,14 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.93).



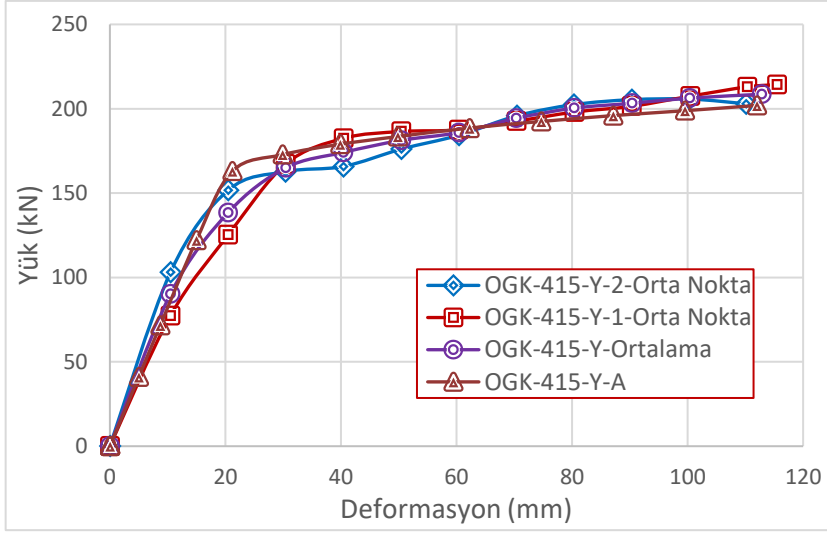
**Şekil 4.93.** OGK\_415 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman

112,81 mm'lik ortalama göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.94'te görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 80,89 MPa olarak bulunmuştur.



**Şekil 4.94.** OGK\_415 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmesi

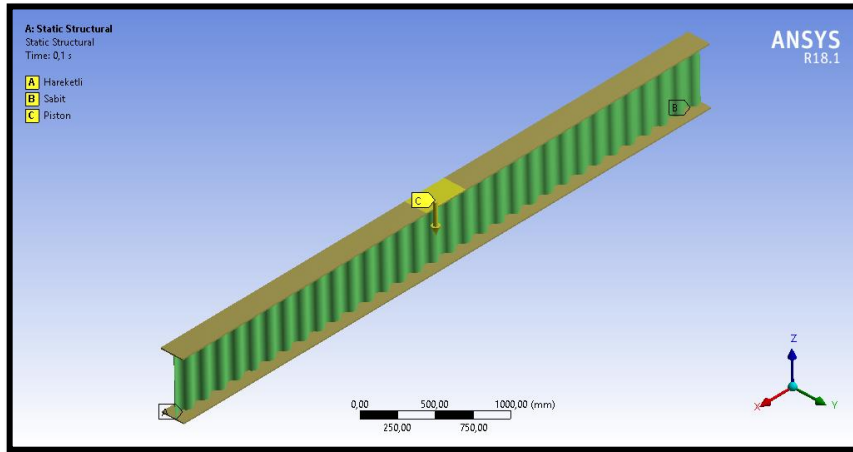
Deneyel çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında deneyel çalışmada OGK\_330 kirişi üzerine yayılı yük uygulandığı zaman pistonla bağlanan yük hücresi tarafından ölçülen ortalama göçme yükü 208,58 kN olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı deplasmanı 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta üst flanşında 201,96 kN olarak hesaplanmıştır. Deneyel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.95'te verilmiştir.



Şekil 4.95. OGK\_415 kirişinin yayılı yük altında sea ve deneysel yük-deplasman eğrileri

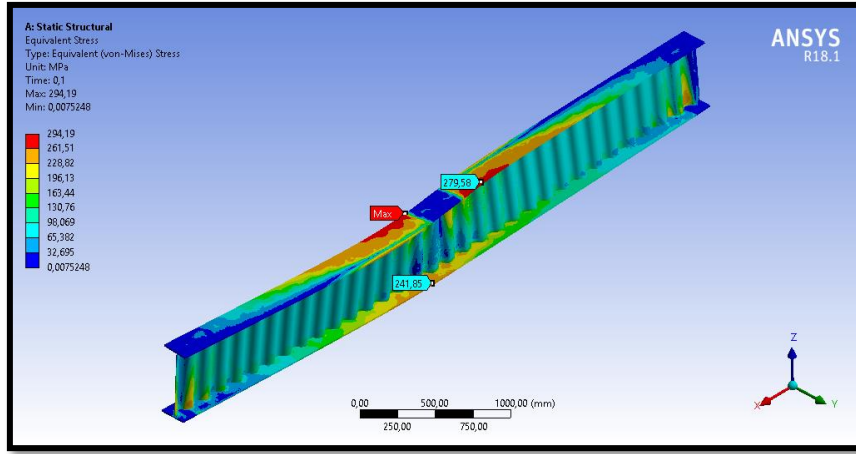
#### 4.6.7. OGK\_500 kirişi sonlu elemanlar tekil yükleme durumu

Şekil 4.96 OGK\_500 kirişinin ANSYS- Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen ortalama göçme deplasmanı değeri olan 85,37 mm'lik deplasman uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak kirişin üst flanşına 10 adımda etki ettirilmiştir.



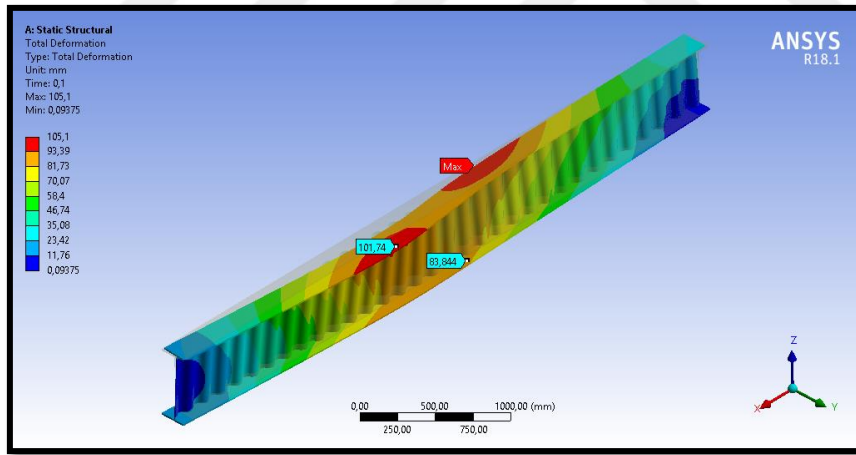
Şekil 4.96. Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan tekil yük

Deneysel çalışmadan elde edilen 85,37 mm'lik göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst flanşta 294,14 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.97).



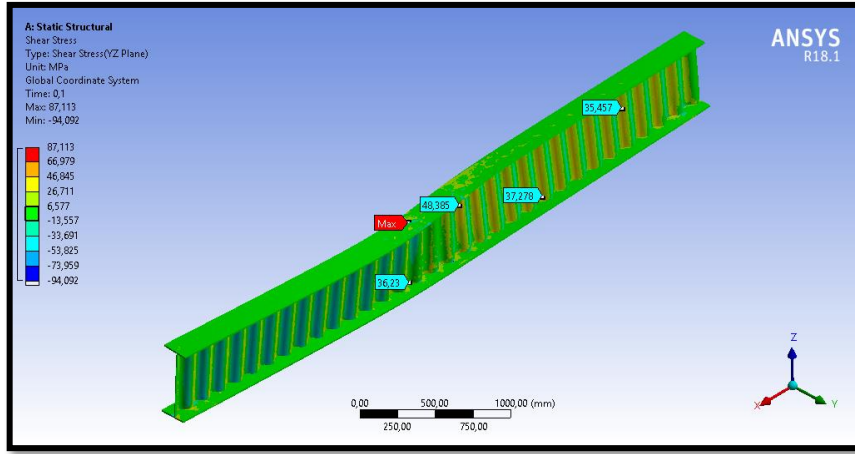
Şekil 4.97. OGK\_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme

Deneyisel çalışmadan elde edilen 85,37 mm'lik göçme deplasmanı kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman yanal deplasmanların da etkisiyle 105,10 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.98). Deneyisel çalışmamızda deplasman ölçerler alt flanşa yerleştirildiği için ANSYS sonuçlarında da alt flanştaki deplasman dikkate alınmıştır.



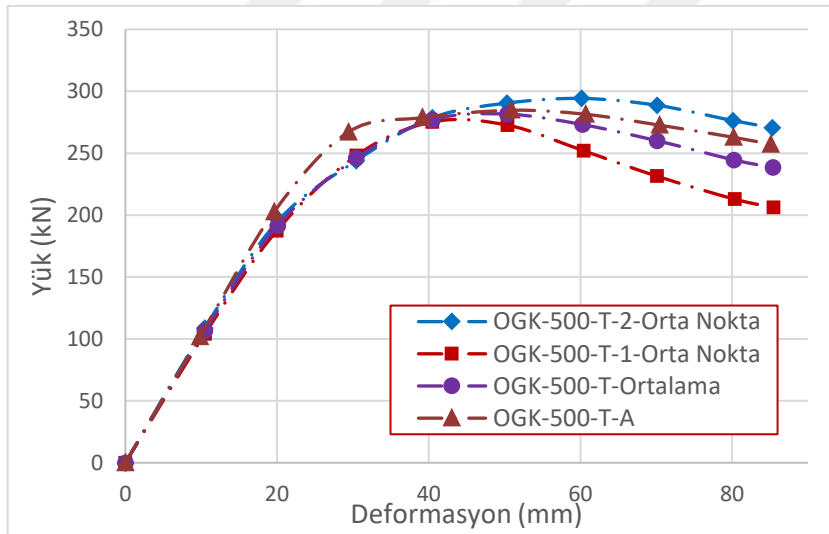
Şekil 4.98. OGK\_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman

85,37 mm'lik göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.99'da görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 87,113 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.99. OGK\_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmesi

Deneyel çalışmadan elde edilen sonuçlar *ANSYS-Workbench* sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında deneyel çalışmada OGK\_500 kirişi üzerine tekil yük uygulandığı zaman pistonla bağlanan yük hücresi tarafından ölçülen ortalama göçme yükü 281,95 kN olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı deplasmanı 10 adımda ve 100 alt adımda uyguladığımızda kiriş orta üst flanşında 284,64 kN olarak hesaplanmıştır. Deneyel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.100'de verilmiştir.

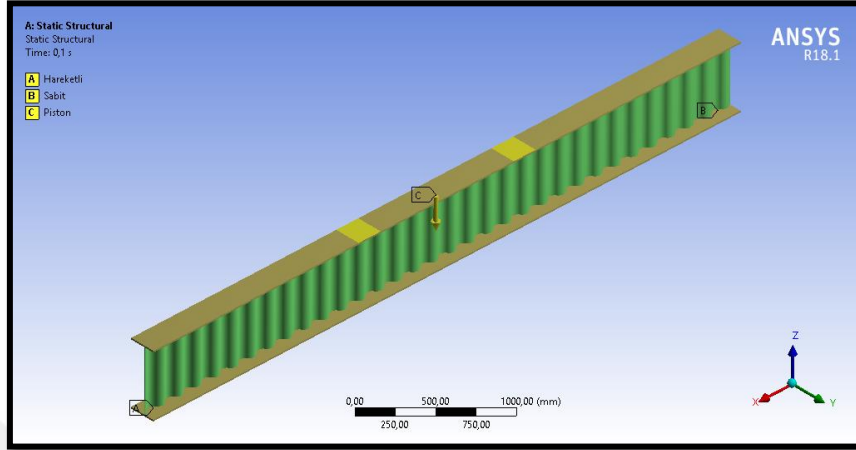


Şekil 4.100. OGK\_500 kirişinin tekil yük altında sea ve deneyel yük-deplasman eğrileri

#### 4.6.8. OGK\_500 kirişi sonlu elemanlar iki noktadan yükleme durumu

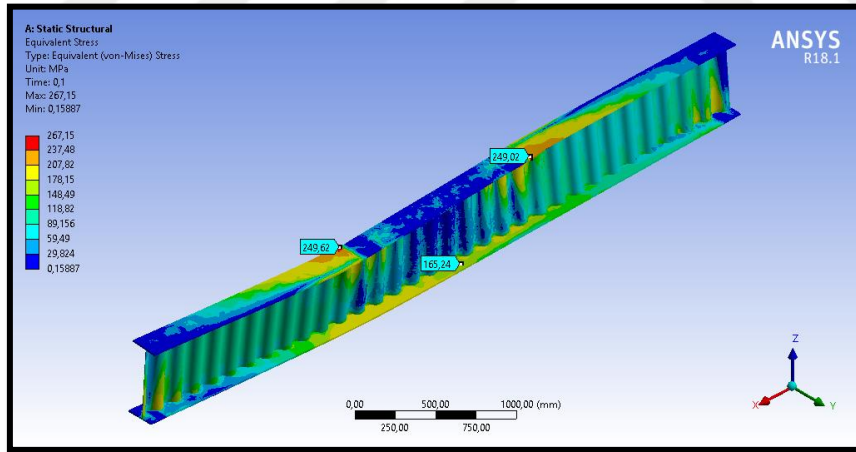
Şekil 4.101 OGK\_500 kirişinin ANSYS- Workbench programında analiz

ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada iki noktadan yükleme sonucunda elde edilen 71,71 mm'lik ortalama göçme deplasmanı uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak üst flanşa 10 adımda kirişe etki ettirilmiştir.



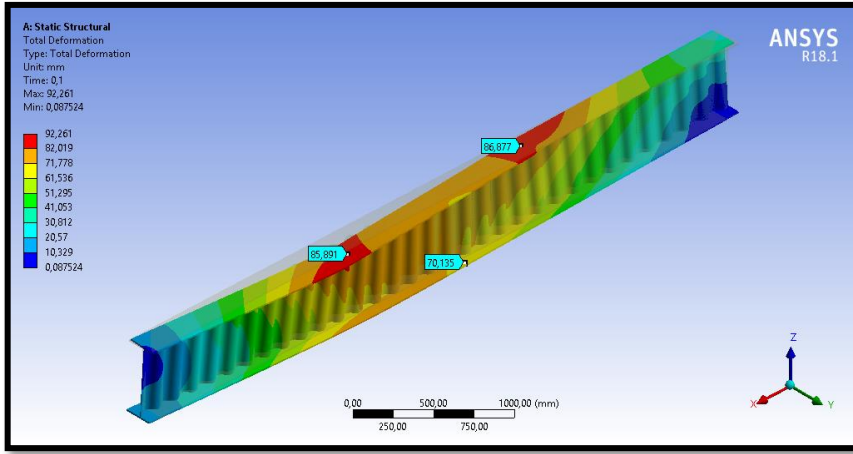
Şekil 4.101. Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan iki noktasal yük

Deneysel çalışmadan elde edilen 71,71 mm'lik ortalama göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst flanşa 267,15 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.102).



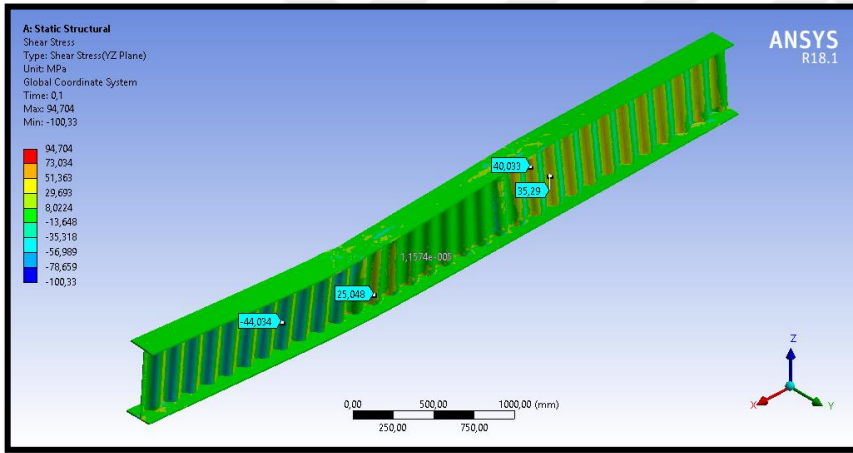
Şekil 4.102. OGK\_500 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum gerilme

Deneysel çalışmadan elde edilen 71,71 mm'lik ortalama göçme deplasmanı kirişe iki noktadan etki ettirildiği zaman maksimum deplasman beklendiği üzere 92,26 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.103).



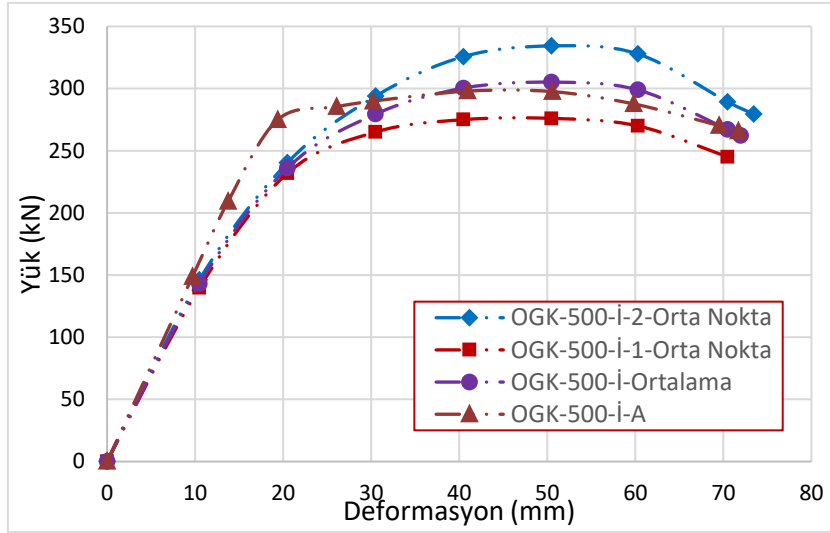
Şekil 4.103. OGK\_500 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum deplasman

71,71 mm'lik ortalama göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.104'te görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 94,70 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.104. OGK\_500 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında kesme gerilmesi

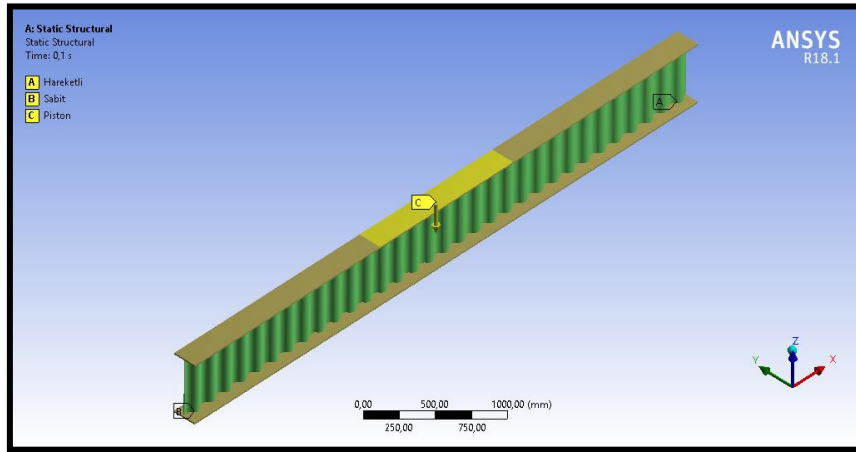
Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında deneysel çalışmada OGK\_500 kirişi üzerine iki noktadan yük uygulandığı zaman pistonla bağlanan yük hücresi tarafından ölçülen ortalama göçme yükü 305,15 kN olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı deplasmanı 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta üst flanşında 298,90 kN olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.105'te verilmiştir.



Şekil 4.105. OGK\_500 kirişinin iki noktasal yük altında sea ve deneysel yük-deplasman eğrileri

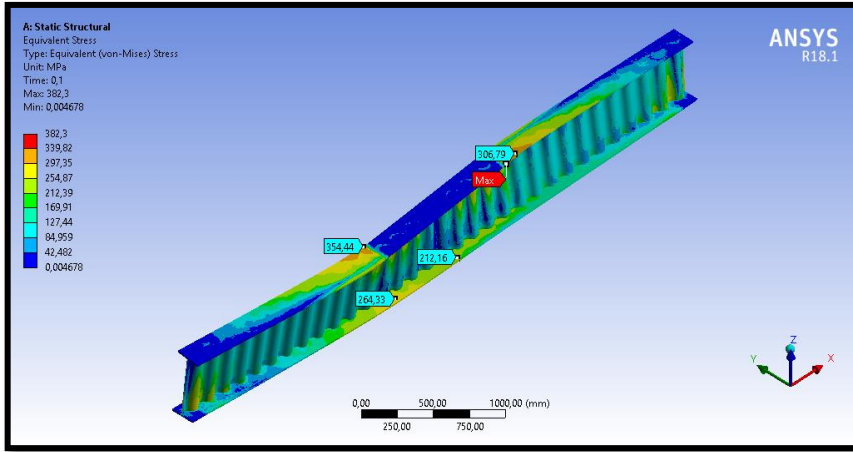
#### 4.6.9. OGK\_500 kirişi sonlu elemanlar yayılı yükleme durumu

Şekil 4.106 OGK\_500 kirişinin ANSYS- Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen 80,23 mm'lik ortalama göçme deplasmanı uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak üst flanşa 10 adımda kirişe etki ettirilmiştir.



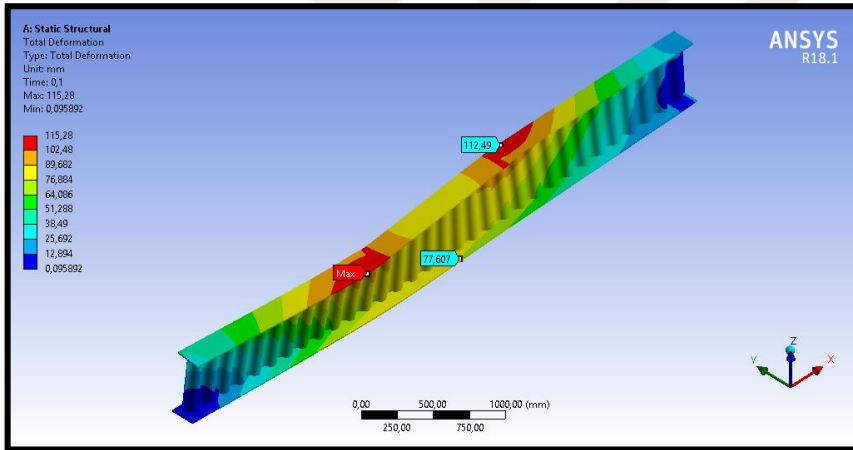
Şekil 4.106. Ondülin gövdeli kirişe sea ile uygulanan tekil yük

Deneysel çalışmadan elde edilen 80,23 mm'lik ortalama göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki alt flanşa 382,30 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.107).



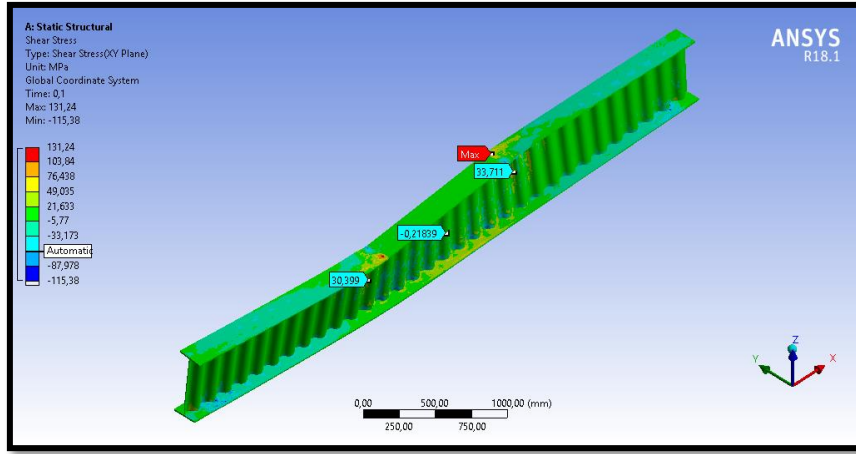
Şekil 4.107. OGK\_500 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum gerilme

DeneySEL çalışmadan elde edilen 80,23 mm'lik ortalama göçme deplasmanı kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman yanal deplasmanlar da dikkate alındığında 115,28 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.108).



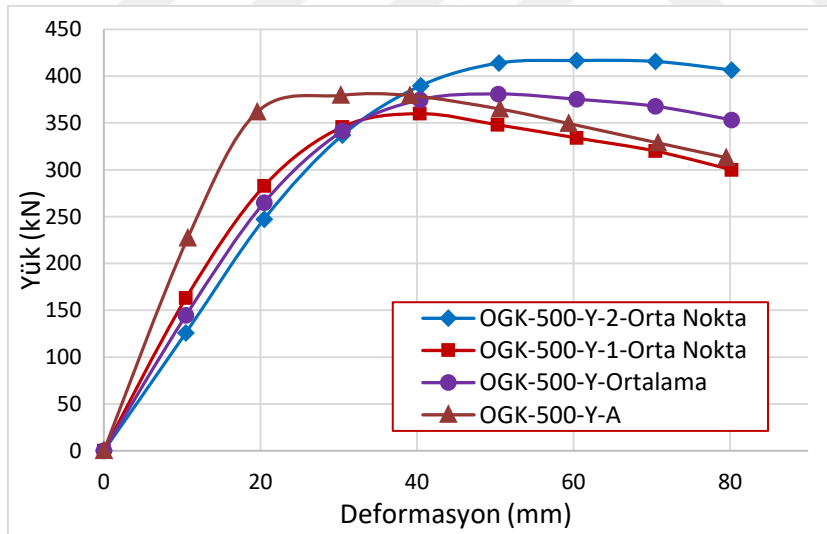
Şekil 4.108. OGK\_500 kirişi üzerindeki yayılı yük altında maksimum deplasman

80,23 mm'lik ortalama göçme deplasmanı kiriş ortasına etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.109'da görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 131,24 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.109. OGK\_500 kirişi üzerindeki yayılı yük altında kesme gerilmesi

Deneyel çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında deneyel çalışmada OGK\_500 kirişi üzerine yayılı yük uygulandığı zaman pistonla bağlanan yük hücresi tarafından ölçülen ortalama göçme yükü 381,00 kN olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı deplasmanı 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta üst başlığında 381,08 kN olarak hesaplanmıştır. Deneyel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.110'da verilmiştir.



Şekil 4.110. OGK\_500 kirişinin yayılı yük altında SEA ve deneyel yük-deplasman eğrileri

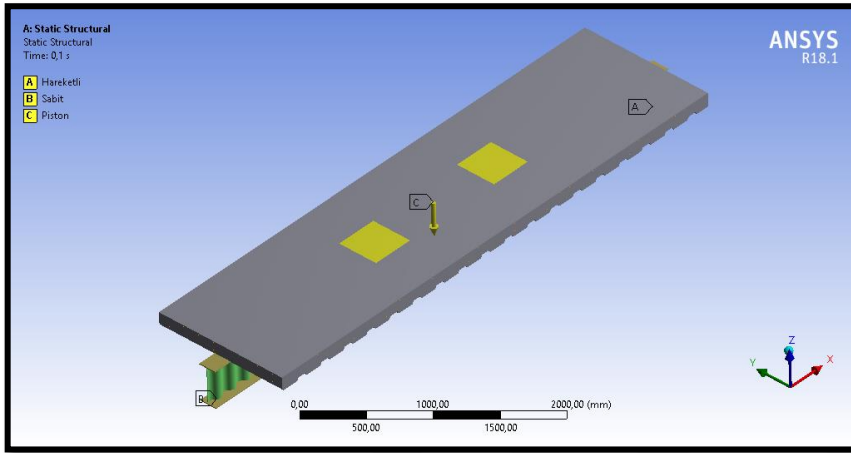
#### 4.7. OGKK Döşemelerinin Sonlu Elemanlar Modellerinin Oluşturulması

Tez çalışmasının son kısmında ondülin gövdeli kompozit döşeme kirişlerinin deneyel kısımda bulunan yük taşıma kapasitelerinin kıyaslanması amacıyla ANSYS Workbench programı yardımıyla SE analizleri yapılmıştır. Deneyel bölümde yükleme

çerçevesinde testleri yapılan döşeme kirişlerinin bulunan ortalama göçme yükleri ANSYS-Wokbench programında lineer olmayan analizi yapılacak şekilde simüle edilerek kiriş üzerinde oluşacak maksimum toplam deplasmanın yanısıra kesme gerilmesi ve maksimum gerilme değerleri hesaplanmıştır.

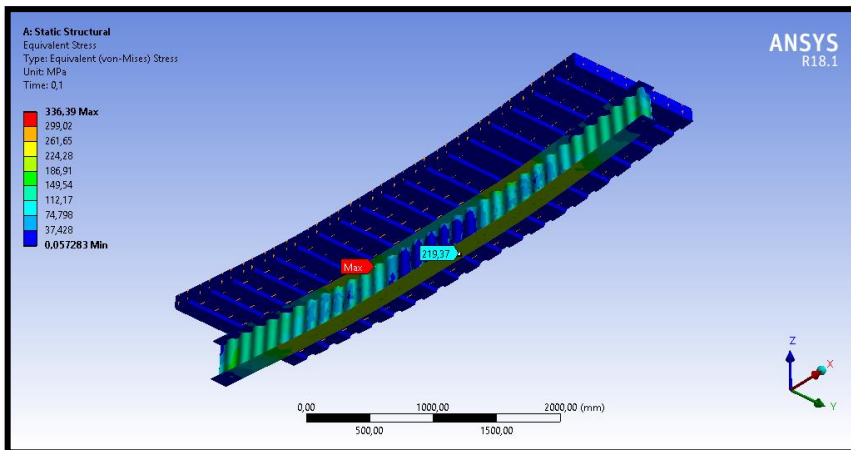
#### 4.7.1. OGKK\_330 kirişi sonlu elemanlar iki noktasal yükleme durumu

Şekil 4.111’de OGKK\_330 ondülin gövdeli kompozit kirişi SEA detayları verilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen 135,32 mm büyüklüğündeki ortalama göçme deplasmanı “Remote Displacement” komutu kullanılarak 10 adımda kompozit kiriş döşemesinin üst yüzeyinden aynı OGKK\_330 deneyinde olduğu gibi etki ettirilmiştir.



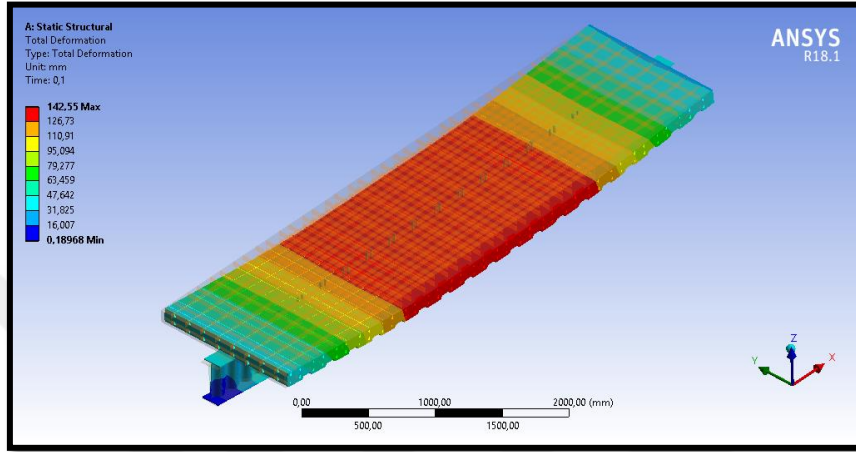
Şekil 4.111 OGKK\_330 kirişi SE statik yapısı

Deneysel çalışmadan elde edilen 135,32 mm büyüklüğündeki ortalama göçme deplasmanı 10 adımda döşemeye iki noktadan etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst flanşta 336,39 MPa olarak okunmuştur. (Şekil 4.112).



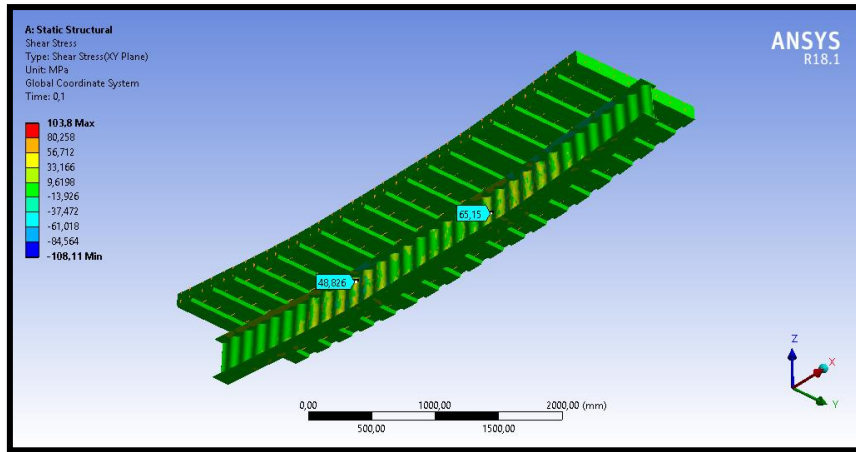
Şekil 4.112. OGKK\_330 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum Von-Mises gerilme dağılımı

Deneysel çalışmadan elde edilen 135,32 mm büyüklüğündeki ortalama göçme deplasmanı 10 adımda iki noktadan döşemeye etki ettirildiği zaman maksimum deplasman iki yükleme noktası arasında meydana gelen momentin de etkisi ile 142,55 mm olarak OGKK alt flanşının orta noktasında meydana gelmiştir (Şekil 4.113). Deneysel çalışmamızda düşey deplasman ölçerler alt ve üst flanşa yerleştirilmiş fakat üst flanşların başınç gerilmeleri altında burkulma durumlarından dolayı ANSYS sonuçlarında da alt flanştaki deplasman dikkate alınmıştır.



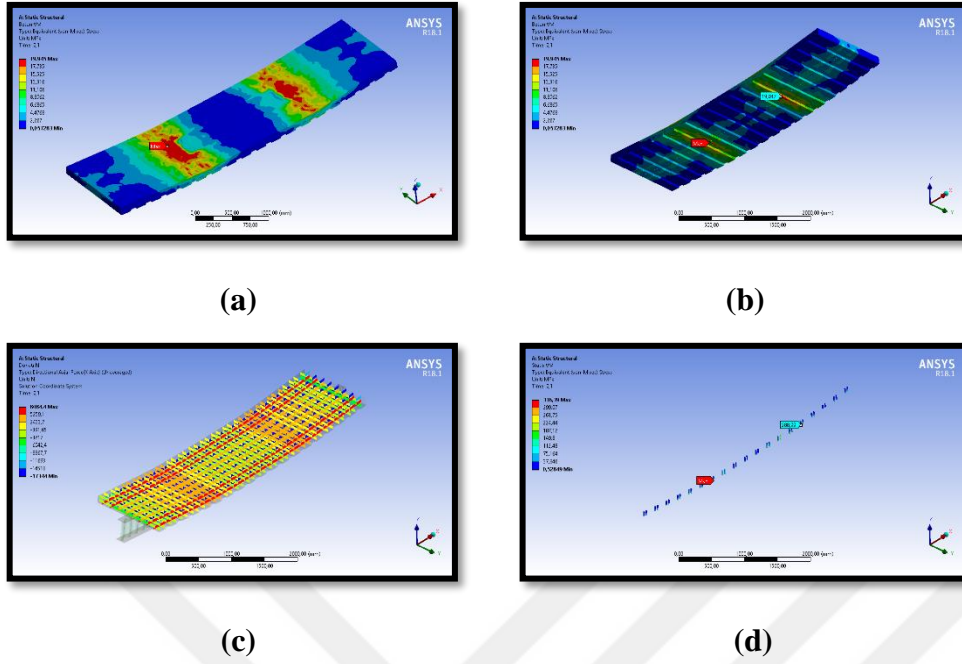
Şekil 4.113. OGKK\_330 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında maksimum deplasman

135,32 mm büyüklüğündeki ortalama göçme deplasmanı kirişe iki noktadan etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.114'te görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 103,8 MPa olarak bulunmuştur.



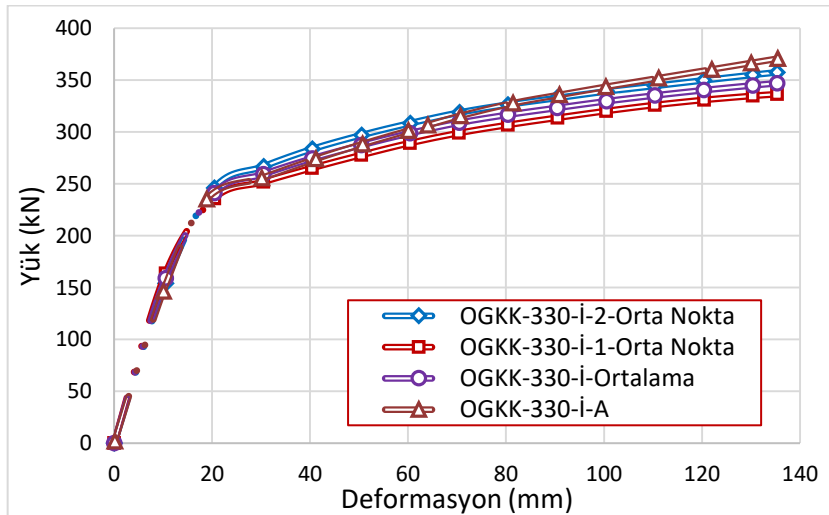
Şekil 4.114. OGKK\_330 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında kesme gerilmesi

Kompozit kirişe 10 adımda yayılı yük uygulandığında OGKK'i meydana getiren elemanlar üzerindeki gerilme dağılımı Şekil 4.115'te verilmiştir.



**Şekil 4.115.** OGKK\_330 kirişi üzerindeki iki noktasal yük altında **a)** Döşeme betonu üstten görünüm; **b)** Döşeme betonu alttan görünüm; **c)** Döşeme hasır donatı; **d)** Kesme sapsaması eşlenik gerilme dağılımı

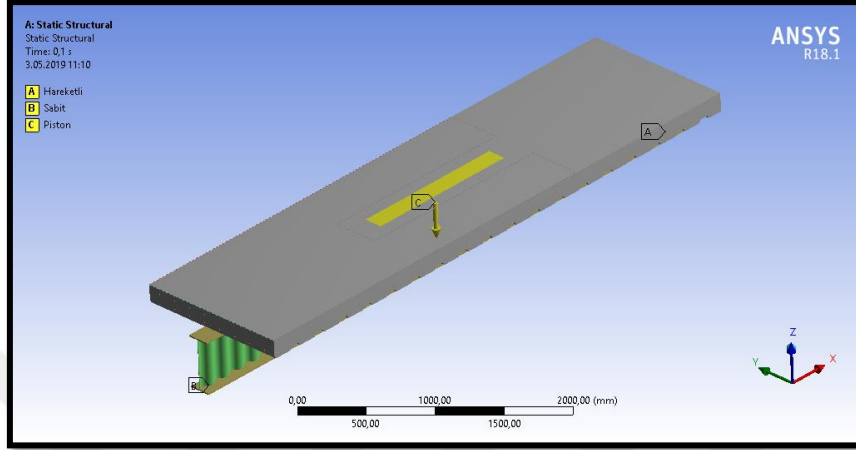
Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar *ANSYS-Workbench* sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığı zaman OGKK\_330 kirişi üzerine iki noktasal yük uygulandığı zaman kiriş orta alt flanşında deneysel çalışmadan elde edilen yük taşıma değeri 347,02 kN olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi aynı yükü 10 adımda uyguladığımızda 370,76 kN olarak hesaplamıştır. Deneysel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.116'da verilmiştir.



**Şekil 4.116.** OGKK\_330 iki noktasal yük altında SEA ve deneysel yük-deplasman eğrileri

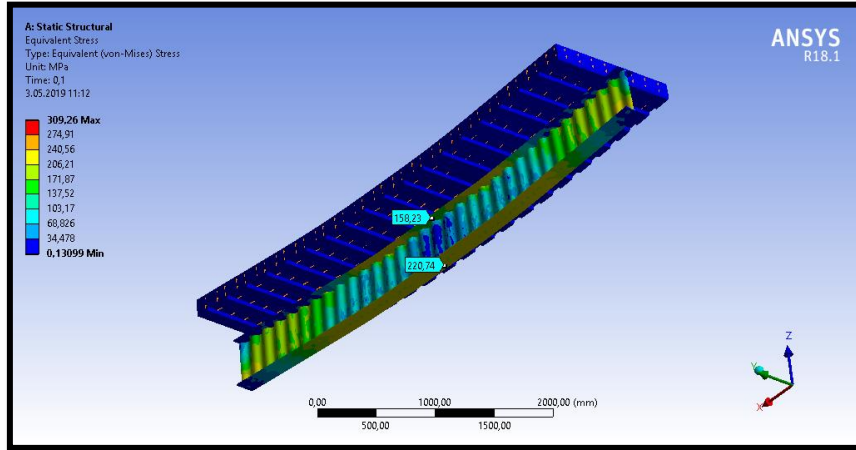
#### 4.7.2. OGKK\_415 kirişi sonlu elemanlar düzgün yayılı yüklenme durumu

Deneyisel çalışmada düzgün yayılı yüklenme sonucunda elde edilen ortalama göçme deplasmanı olan 135,49 mm büyüklüğündeki ortalama deplasman uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak döşemenin üzerine 10 adımda etki ettirilmiştir. (Şekil 4.117)



Şekil 4.117 OGKK\_415 SE düzgün yayılı yüklenme durumu

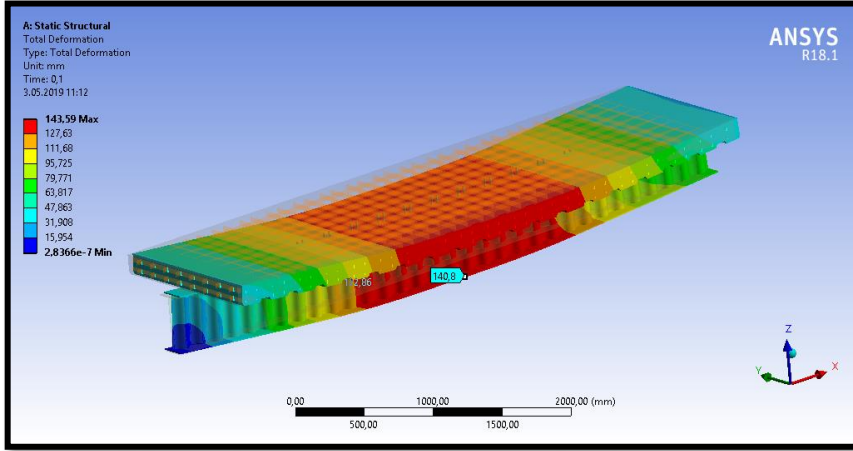
Deneyisel çalışmadan elde edilen 135.49 mm büyüklüğündeki ortalama göçme deplasmanı 10 adımda kirişin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin ondülin gövdesinin yayılı yükün bittiği noktaların hizalarında 309,26 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.118).



Şekil 4.118. OGKK\_415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yük altında maksimum gerilme

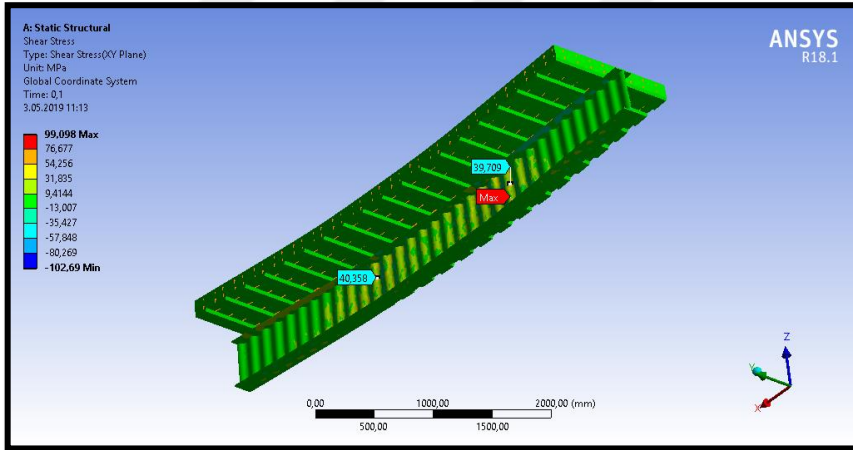
Deneyisel çalışmadan elde edilen 135.49 mm büyüklüğündeki ortalama göçme deplasmanı kiriş döşemesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman beklendiği üzere 143,59 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.119). Deneyisel

çalışmamızda alt flanşa yerleştirilen düşey deplasman ölçerler daha gerçekçi ölçümler yaptığı için ANSYS sonuçlarında da alt flanştaki deplasman dikkate alınmıştır.



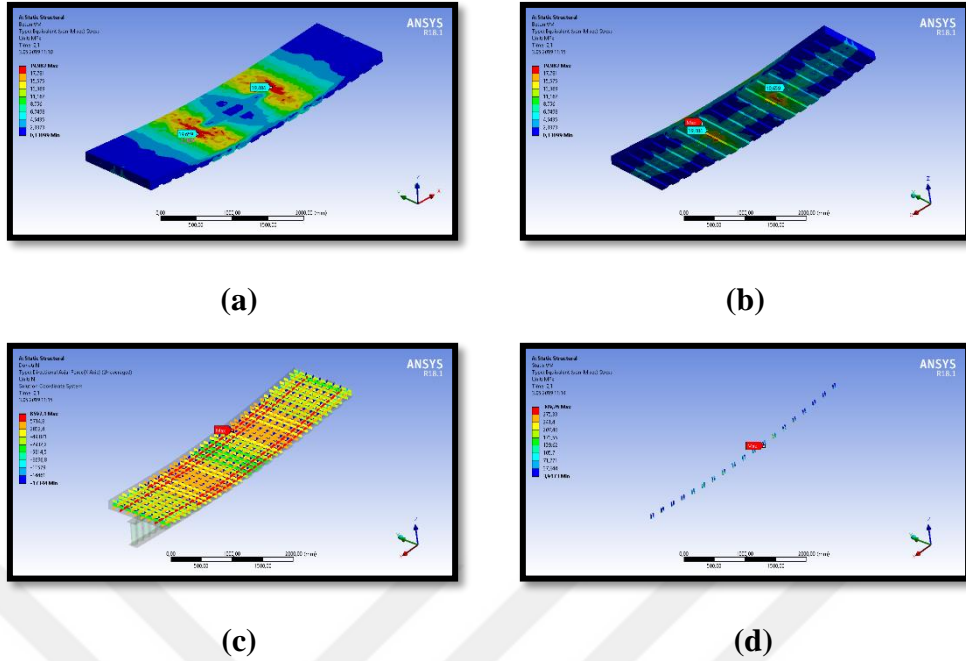
Şekil 4.119. OGKK\_415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yük altında maksimum deplasman

135.49 mm büyüklüğündeki ortalama göçme deplasmanı kiriş döşemesine etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.120’de görüldüğü üzere ondülin formdaki çelik gövdede 99,10 MPa olarak bulunmuştur.



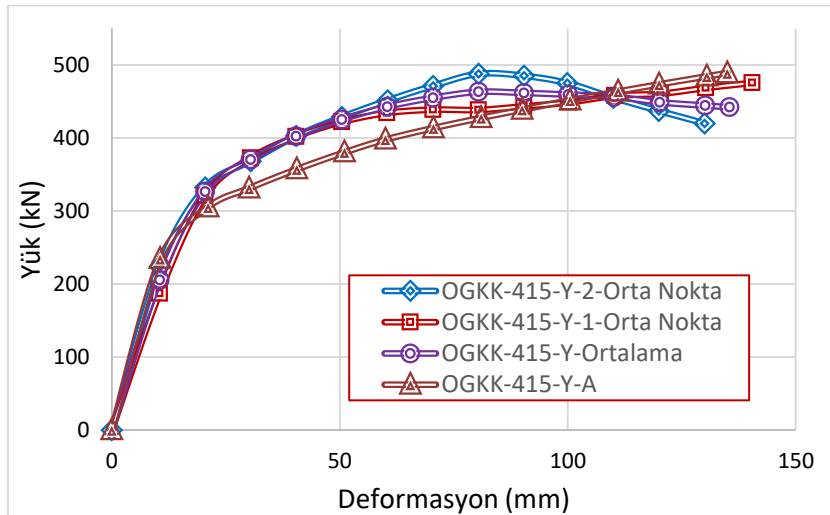
Şekil 4.120. OGKK\_415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yük altında kesme gerilmesi

Kompozit kirişe 10 adımda yayılı yük uygulandığında OGKK’i meydana getiren elemanlar üzerindeki gerilme dağılımı Şekil 4.121’de verilmiştir.



**Şekil 4.121.** OGKK\_415 kirişi üzerindeki düzgün yayılı yük altında **a)** Döşeme betonu üstten görünüm; **b)** Döşeme betonu alttan görünüm; **c)** Döşeme hasır donatı; **d)** Kesme sapslaması eşlenik gerilme dağılımı

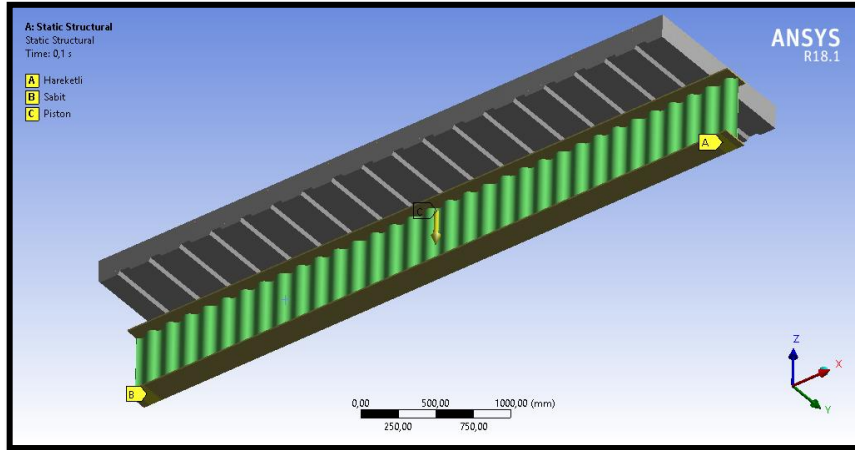
Deneyisel çalışmadan elde edilen sonuçlar *ANSYS-Workbench* sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığında OGKK\_415 kirişi üzerine düzgün yük uygulandığı zaman pistonla yerleştirilen yük hücresinden okunan nihai yük taşıma kapasiteleri ortalama 463,03 kN olarak ölçülürken sonlu elemanlar yöntemi aynı yükü 10 adımda uyguladığımızda 488,86 kN olarak hesaplamıştır. Deneyisel sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.122’de verilmiştir.



**Şekil 4.122.** OGKK\_415 düzgün yayılı yük altında SEA ve deneyisel yük-deplasman eğrileri

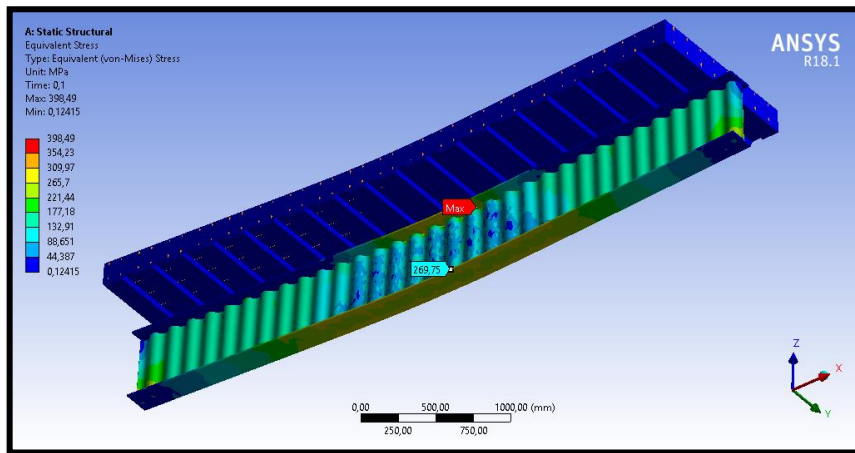
#### 4.7.3. OGKK\_500 kirişi sonlu elemanlar tekil yükleme durumu

Şekil 4.123 OGKK\_500 döşeme kirişinin ANSYS- Workbench programında analiz ayarlarının detaylarını göstermektedir. Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen ortalama göçme yükü olan 117,13 mm büyüklüğündeki ortalama deplasman uygulanan yüzey alanı dikkate alınarak kiriş döşemesine 10 adımda ve 100 alt adımda etki ettirilmiştir.



Şekil 4.123 OGKK'e uygulanan tekil yükleme

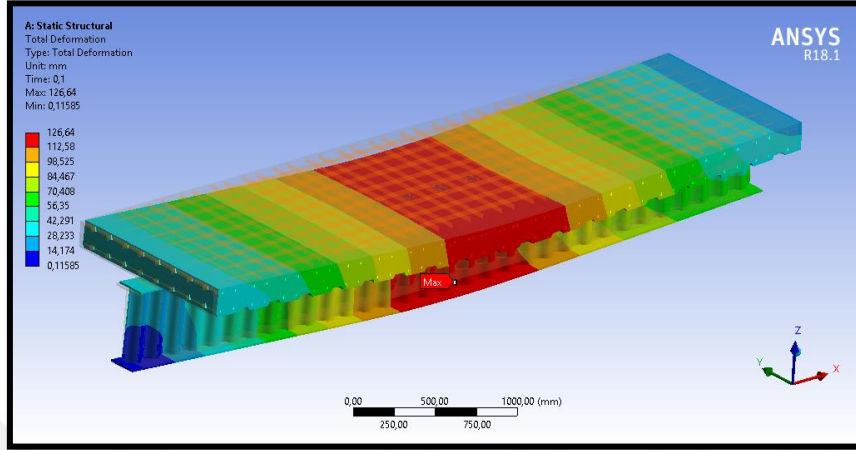
Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen 117,13 mm büyüklüğündeki ortalama deplasman 10 adımda kiriş döşemesinin orta bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum gerilme kirişin orta bölgesindeki üst flanşta 398,49 MPa olarak meydana gelmiştir (Şekil 4.124).



Şekil 4.124. OGKK\_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum gerilme

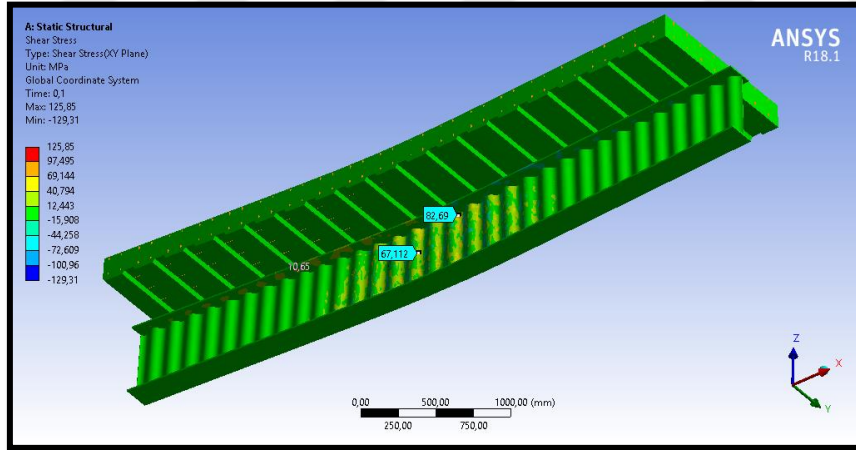
Deneysel çalışmada tekil yükleme sonucunda elde edilen ortalama göçme deplasmanı olan 117,13 mm büyüklüğündeki ortalama deplasman kirişin orta

bölgesine etki ettirildiği zaman maksimum deplasman 126,64 mm olarak kiriş ortasında meydana gelmiştir (Şekil 4.125). Deneysel çalışmamızda deplasman ölçerler alt flanşa yerleştirildiği için ANSYS sonuçlarında da alt başlıktaki deplasman dikkate alınmıştır.



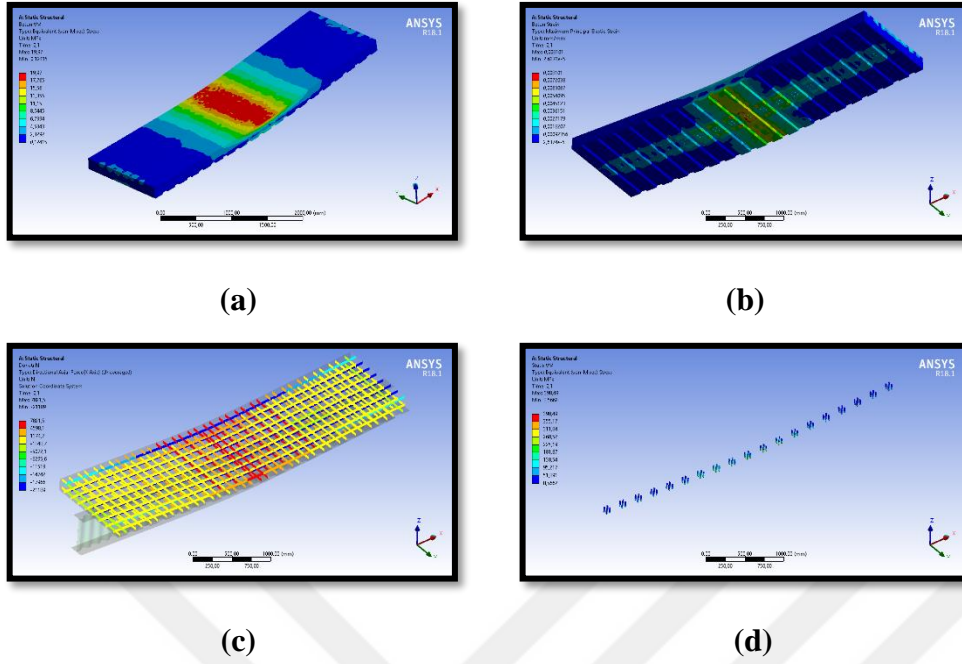
Şekil 4.125. OGKK\_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında maksimum deplasman

117,13 mm büyüklüğündeki ortalama deplasman kirişe tek noktadan etki ettirildiği zaman maksimum kesme gerilmesi Şekil 4.126’da görüldüğü üzere ondülin formdaki gövdede 125,85 MPa olarak bulunmuştur.



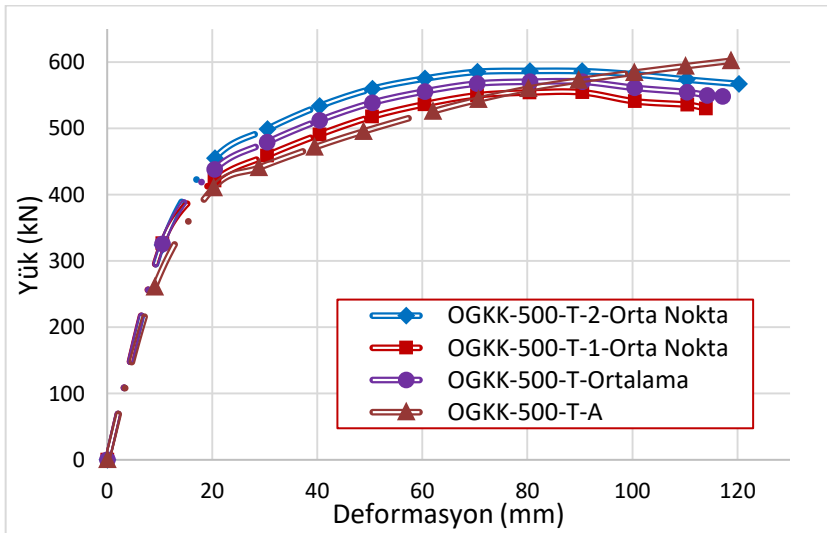
Şekil 4.126 OGKK\_500 kirişi üzerindeki tekil yük altında kesme gerilmesi

Kompozit kirişe 10 adımda yayılı yük uygulandığında OGKK’i meydana getiren elemanlar üzerindeki gerilme dağılımı Şekil 4.127’de verilmiştir.



**Şekil 4.127.** OGKK\_500 kirişi üzerindeki tek noktadan yük altında a) Döşeme betonu üsten görünüm; b) Döşeme betonu alttan görünüm; c) Döşeme hasır donatı; d) Kesme saplaması eşlenik gerilme dağılımı

DeneySEL çalışmadan elde edilen sonuçlar ANSYS-Workbench sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığı zaman OGKK\_500 kirişi üzerine deplasman uygulandığında kiriş orta alt başlığındaki yük hücresinden elde edilen ortalama yük 570,50 kN olarak hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi aynı yükü 10 adımda uyguladığımızda kiriş orta üst başlığında 602,02 kN olarak hesaplanmıştır. DeneySEL sonuçla SEA sonuçlarının kıyaslanması Şekil 4.128’de verilmiştir.



**Şekil 4.128.** OGKK\_500 tekil yük altında SEA ve deneySEL yük-deplasman eğrileri

## 5. TARTIŞMA

Eğilme etkisine maruz kalan çelik I-kesitli kirişlerde başlıklar kiriş ekseninde oluşan normal gerilmeleri taşıırken profilin gövde kısmı yüklerden dolayı oluşan kesme gerilmelerini aktarır. Eğilme etkisindeki çelik I kesitli kirişlerin yük taşıma kapasiteleri doğrudan kesitin atalet momenti ile ilgilidir. I kesitin atalet momenti artırılmak istendiğinde akla gelen ilk çözüm ise kiriş yüksekliğinin artırılmasıdır. Bu durumda ise hem kiriş gövde narınlığı artacağından hem de kirişin yük taşıma kapasitesindeki artışla orantılı olarak kiriş gövdesine etki eden kesme kuvvetlerindeki artıştan dolayı eğilme etkisindeki I kesitli çelik kirişin akma gerilmelerine ulaşmadan lokal veya global burkulmadan dolayı göçmesi beklenir. Gövde burkulmalarının engellenmesi için akla gelen ilk yöntem çelik kiriş gövde levhasının kalınlığını artırılmasıdır. Fakat bu yöntem özellikle geniş açıklıkların geçildiği durumlarda yüksek maliyete neden olmaktadır. İkinci bir yöntem olarak kiriş gövdesinin berkitme levhalarıyla desteklenmesi durumudur. Bu yöntem gövde kalınlığının artırılmasından daha etkili ve daha düşük maliyetli olmaktadır. Berkitme levhaları çelik I kesitli kirişlerin global burkulmasında etkili bir çözüm olarak karşımıza çıksa da berkitme elemanları kiriş gövdesini sadece belirli noktalardan desteklediği için lokal gövde burkulmaları kaçınılmaz bir durum olarak ortaya çıkmaktadır. Tüm bu durumlar ele alındığında son yıllarda özellikle Avrupa ülkelerinde hızla yayılan Ondülin Gövdeli Çelik Kirişler (OGK) yapı sektöründe geniş açıklıkların geçilmesinde yeni ve düşük maliyetli bir seçenek olarak ön plana çıkmaktadır. İnce çelik bir sacın geometrisine bağlı olarak zigzag, trapezoidal veya sinüsoidal forma getirilerek çelik I kesitli bir kiriş gövdesi olarak kullanılması şeklinde tasarlanan bu kirişler ince gövdeleri sayesinde yapı maliyetlerinin düşürmesiyle beraber kiriş gövdesi boyunca ondülin form tarafından desteklendiğinden mukavemet açısından da elverişli sonuçlar vermektedir.

Tez konusuyla alakalı literatür taraması incelendiğinde trapezoid gövdeli kirişlerin (TGK) araştırmacıların ilgisini uzun yıllar boyunca çektiğini görülmektedir. Trapezoid gövde formunun çelik OGK'in yük taşıma kapasitesini artırdığı fakat çelik kiriş gövde ve başlığını birleştiren kaynak bölgesinde trapez formunun büküm bölgelerinin yakınlarında gerilme yığılmalarından ötürü kaynak yırtılmalarının oluşabildiği birçok araştırmacı tarafından dile getirilmiştir. Yeni nesil OGK'lerden biri olan sinüsoidal gövdeli kirişler (SGK) üzerine yapılan bu tez çalışmasında sinüsoidal formun büküm noktalarındaki kavislerden dolayı daha yumuşak geçişler sebebiyle trapezoid kirişlerde görülen gerilme yığılmasının olmadığı görülmektedir. Sinüsoidal gövde yapısının yükleme esnasında meydana gelen gerilme yığılmalarını bu şekilde dağıtması SGK'lerin kullanımını daha cazip hale getirmektedir. OGK'lerle ilgili geçmişteki tüm çalışmalar incelendiğinde göze çarpan diğer bir önemli nokta, tüm çalışmaların sabit tasarım parametreleri üzerinden yapılmasıdır. Ülkemizde mühendislik uygulamalarında optimizasyon hemen hemen hiç kullanılmamaktadır. Oysa yapı optimizasyonu ile elemanları hazır çelik sac kalınlığı listelerinden seçilerek boyutlandırılan çelik elemanların ayrıntı değişken metoduyla en düşük ağırlıkla tasarlanması, dolayısıyla en düşük maliyetle inşa edilmesi mümkündür. Bu tez çalışmasında sinüsoidal gövde yapısına sahip 3 (üç) farklı gövde yüksekliğinde ondülin gövdeli çelik I kesitli kirişlerin Av Arama Algoritması (AAA) ve Ateşböceği Algoritması (ABA) gibi yeni nesil 2 (iki) adet stokastik optimizasyon algoritması kullanılarak minimum ağırlığa sahip olacak şekilde optimum boyutlandırmaları yapılmıştır. OGK

elemanlarının tasarımları için BS EN1993-1:2005 (Annex-D, Eurocode 3) ve DIN 18-800 Teil-1 şartnamelerinde öngörülen tasarım kıstasları esas alınmıştır. Optimum boyutlandırma sürecinde OGK'lerin minimum ağırlık amaçlanılarak boyutlandırılmasında AAA'sının çözüme daha hızlı yakınsadığı fakat ABA'nın daha düşük ağırlıkta çözümler verdiği görülmüştür. ABA'ndan elde edilen 3 farklı OGK'in yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan standart IPN profillerle karşılaştırmasına bakıldığı zaman;

Çizelge 5.1'de yeni nesil optimizasyon algoritmaları kullanılarak boyutlandırılan OGK\_300 çelik kirişinin standart IPN haddeli profillerle hem ağırlık hem de atalet momenti açısından karşılaştırılması verilmiştir. 7312 cm<sup>4</sup> atalet momenti ile OGK\_330 kirişi IPN\_260 ile IPN\_280 profilleri arasında kalmaktadır. Aynı kiriş kesitinin metreye düşen birim ağırlık cinsinden IPN profillerle karşılaştırılmasına bakılacak olursa 35 kg/m ile IPN\_220 ve IPN\_240 arasında kaldığı görülmektedir.

**Çizelge 5.1.** OGK\_330 kirişinin ve IPN profillerle karşılaştırılması

Parametreler	OGK-330		
<b>Atalet Momenti (cm<sup>4</sup>)</b>	IPN-260	7312	IPN-280
	5740		7590
<b>Ağırlık (kg/m)</b>	IPN-220	35	IPN-240
	31,1		36,2

Çizelge 5.2'de tezin deneysel süreci için optimum boyutlandırılan OGK\_415 çelik kirişinin standart IPN profillerle ağırlık ve atalet momenti açısından karşılaştırılması verilmiştir. 16256 cm<sup>4</sup> atalet momenti ile OGK\_415 kirişi IPN\_340 ile IPN\_360 profilleri arasında kalmaktadır. Aynı kiriş kesitinin metreye düşen birim ağırlık cinsinden IPN profillerle karşılaştırılmasına bakılacak olursa 43 kg/m ile IPN\_260 ve IPN\_280 arasında kaldığı görülmektedir.

**Çizelge 5.2.** OGK\_415 kirişinin ve IPN profillerle karşılaştırılması

Parametreler	OGK-415		
<b>Atalet Momenti (cm<sup>4</sup>)</b>	IPN-340	16256	IPN-360
	15700		19610
<b>Ağırlık (kg/m)</b>	IPN-260	43	IPN-280
	41,9		47,9

Son olarak, Çizelge 5.3'te yeni nesil optimizasyon algoritmaları kullanılarak boyutlandırılan OGK\_500 çelik kirişinin standart IPN haddeli profillerle hem ağırlık hem de atalet momenti açısından karşılaştırılması verilmiştir. 31457 cm<sup>4</sup> atalet momenti ile OGK\_500 kirişi IPN\_400 ile IPN\_450 profilleri arasında kalmaktadır. Aynı kiriş kesitinin metreye düşen birim ağırlık cinsinden IPN profillerle karşılaştırılmasına bakılacak olursa 60 kg/m ile IPN\_300 ve IPN\_320 arasında kaldığı görülmektedir.

**Çizelge 5.3.** OGK\_500 kirişinin ve IPN profillerle karşılaştırılması

Parametreler	OGK-500		
	IPN-400	31457	IPN-450
<b>Atalet Momenti (cm<sup>4</sup>)</b>	29210		45850
<b>Ağırlık (kg/m)</b>	IPN-300	60	IPN-320
	54,2		61

Optimum boyutlandırılan tüm kirişlerin atalet momentlerindeki artış ve birim ağırlıklarındaki düşüş dikkate alındığında sayısal anlamda bu kirişlerinin yapı sektöründe özellikle de geniş açıklıkların mevcut olduğu yapılarda oldukça etkili bir kullanım alanı bulabileceği görülmektedir. Gelişmiş ülkelerde son yıllarda etkin bir şekilde kullanılmaya başlanan bu kirişler ülkemizde yaygın olarak tercih edilen uzay kafes, makas sistem ve petek kirişlere alternatif olarak çatılarda, kat kirişleri olarak döşemelerde ve normal kuvvet etkisine maruz kolon eleman olarak etkin bir şekilde kullanılabilirler.

Ondülin gövdeli çelik kirişlerde kiriş gövdesinin ondülin yapısı kirişin taşıyabileceği kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım sağlamaktadır. Elde edilen ilave dayanım kiriş gövdesinin inceltilmesiyle malzeme tasarrufunda kullanılabilmesi gibi tasarıma betonarme bir döşeme eklenip OGK ile beraber çalışması sağlanarak eğilmeye karşı çok daha dayanıklı kompozit kirişler de üretilebilir. Elde edilecek bu kompozit kirişte güçlü eksende eğilme etkisi altında basınca çalışan kiriş başlığının yanal burkulması da kiriş boyunca engellenmiş olmaktadır. Bu şekilde optimum boyutlandırılması yapılan Ondülin Gövdeli Kompozit Kiriş hem dayanım açısından hem de maliyet bakımından büyük avantajlar sağlamaktadır.

Tez çalışmasının ikinci aşaması olan deneysel süreçte optimum boyutlandırılan OGK'ler ve bu kirişlerin betonarme döşemelerle birleştirilmesi ile tasarlanan Ondülin Gövdeli Kompozit Kirişler (OGKK) farklı yük koşulları altında 100 ton kapasiteli yükleme çerçevesi kullanılarak testleri yapılmıştır. OGK'lerin eleman bazındaki testlerinde bu kirişlerin yapı sektöründeki kullanım şekilleri düşünülerek belirli aralıklarla yerleştirilen yanal deplasman engelleyicilerle yanal burulmalı burkulma davranışı engellenmiştir. Yapılan OGK\_330 testlerinde mevcut yanal tutucuların yeterince rijit olmadığı düşünülerek kalan daha büyük kesitlerdeki OGK\_415 ve OGK\_500 kirişleri için daha dayanıklı ve rijit yanal deplasman tutuculara ihtiyaç duyulmuştur. Yeni yanal deplasman engelleyicilerle devam edilen bu testlerde kiriş nihai yük taşıma kapasitesine ulaşana kadar dikkate değer bir yanal burkulma yapmamış ve bu sayede optimum boyutlandırılan bu kirişlerin eğilme davranışları sağlıklı bir şekilde incelenmiştir. Yanal burkulması engellenen bu kirişlerin hiçbirinde göçme durumu gövde burkulması, kaynak yırtılması gibi sebeplerden meydana gelmemiştir. Bu durum ince olmasına rağmen dalgalı gövdenin ne kadar dayanıklı olduğunu göstermektedir. Tüm kirişlerde nihai yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra göçme durumu eğriliğin yüksek olduğu yükleme noktalarının yakınında kiriş başlığının lokal burkulması ile meydana gelmiştir. Nihai yük taşıma kapasitelerine ulaştıktan sonra göçmesi gerçekleşen bu kirişlerin yanal tutuculara bu kadar ihtiyaç duymasının yapı sektöründeki kullanımına etkisini ve döşemelerdeki davranışını araştırmak üzere OGKK testleri yapılmıştır. Kompozit sistemler için OGK tasarımında dikkate alınan şartnamelere ek olarak BS-

8110'de öngörülen tasarım kıstasları esas kabul edilmiştir. Bu kapsamda OGKK\_330 kirişi iki noktadan yükleme altında, OGKK\_415 kirişi yayılı yük altında ve OGKK\_500 kirişi tek noktadan yüklemeye maruz bırakılarak her bir testten deneysel niteliği taşıması amacıyla ikişer adet yapılmıştır. Yapılan OGKK testlerinde yanal deplasman engelleyici herhangi bir deney aparatı kullanılmamıştır. Test esnasında OGKK'lerin davranışları incelendiğinde beklenildiği gibi OGKK tasarımında kullanılan betonarme döşeme kesme çivileri vasıtasıyla OGK'in üst başlığını tutarak kirişin yanal burulmalı burkulma davranışını kiriş boyunca engellemiştir. OGKK'ler tüm yükleme koşulları altında betonarme döşemenin ezilmesi sonucunda göçmüştür. Göçme aşamasına kadar herhangi bir gövde burkulması ya da ezilmesi davranışı göstermeyen bu kirişlerin kapasiteleri betonarme döşemeyle beraber elemen bazında yapılan OGK testlerinden hesaplanan nihai yük taşıma kapasitesine nazaran yaklaşık %100 fazladır.

Yapılan deneysel çalışmalarda yük hücresi, deplasman ölçer, gerinim pulu gibi sensörler kullanılmıştır. Kullanılan bu sensörler vasıtasıyla deney esnasında yalnızca çelik kirişin belirli kritik noktalarından yük, deplasman ve birim şekil değiştirme ölçümleri alınabilmektedir. Deneyi yapılan ondülin gövdeli çelik ve kompozit kirişlerin yükleme boyunca üstlerinde meydana gelen tüm gerilme dağılımlarını görebilmek amacıyla SEA'leri güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır. Tezin üçüncü ve son kısmında ise, dalgalı gövdeli çelik kiriş numunelerinin gövde levhası burkulma analizleri ve taşıyabilecekleri kritik yüklerin hesabı *ANSYS Workbench v18.1* sonlu eleman programı kullanılarak hesaplanıp farklı gövde kalınlığına ve boyuna sahip ondülin gövdeli her kiriş için kaydedilen sonlu elemanlar analiz sonuçları deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Malzeme testleri de dikkate alınarak yapılan nümerik çalışmalarda kirişlerin nihai yük taşıma kapasiteleri bakımından deneysel çalışmalardaki sonuçlara oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 5.4).

**Çizelge 5.4.** Ondülin gövdeli çelik ve kompozit kirişlerin nihai yük taşıma kapasitelerinin deneysel ve nümerik karşılaştırması

Kiriş Adı	Yükleme Tipi	Deneysel Sonuçlar (kN)	Nümerik Sonuçlar (kN)	% Fark
<b>OGK_330</b>	Tek Noktadan	125,17	118,17	-5,59
<b>OGK_330</b>	İki Noktadan	188,72	190,17	0,77
<b>OGK_330</b>	Yayılı	182,14	179,69	-1,35
<b>OGK_415</b>	Tek Noktadan	151,50	150,49	-0,67
<b>OGK_415</b>	İki Noktadan	213,30	210,84	-1,15
<b>OGK_415</b>	Yayılı	208,58	201,96	-3,17
<b>OGK_500</b>	Tek Noktadan	281,95	284,64	0,95
<b>OGK_500</b>	İki Noktadan	305,15	298,90	-2,05
<b>OGK_500</b>	Yayılı	381,00	381,08	0,02
<b>OGKK_330</b>	İki Noktadan	347,02	370,76	6,84
<b>OGKK_415</b>	Yayılı	463,03	488,86	5,58
<b>OGKK_500</b>	Tek Noktadan	570,50	602,02	5,52

Yukarıdaki çizelgede elde edilen sonuçlar ışığında yük altındaki göçme durumları standart I-kesitli çelik profillerden farklılıklar gösteren ve tasarımları basit analiz

yöntemleri ile yapılamayan ondülin gövdeli çelik kirişlerin optimum boyutlandırmalarının nasıl yapılması gerektiği ve ülkemizdeki uygulama alanlarında tercih edilmelerinin sağlayacağı avantajlar vurgulanmıştır.





## 6. SONUÇLAR

Ondülin gövdeli çelik kirişlerin (OGK) optimum boyutlandırmalarında kullanılacak bilgisayar yazılımlarının geliştirilmesi tez çalışmasının başarı ile gerçekleştirildiğine dair ilk bulgu olarak ortaya çıkmaktadır. Tez çalışmasının başarı ölçütleri arasındaki vazgeçilmez diğer bir unsur olan stokastik optimizasyon yöntemleri ile yük altında boyutlandırılması yapılmış OGK'lerin eleman bazında farklı yükler altında nihai taşıma kapasitelerinin belirlenmesi ve sonrasında sistem bazında moment aktarmayan ondülin gövdeli kompozit kiriş (OGKK) performanslarının analizlerinin yapılması deney sürecinin etkin bir şekilde tamamlanmasını sağlamıştır. Testleri yapılan optimum boyutlandırılmış kiriş numunelerinin taşıma gücü analizleri ve taşıyabilecekleri kritik yüklerin sonlu elemanlar yazılımı *ANSYS Workbench v18.1* kullanılarak gerçekleştirilmesi ve her bir kiriş için deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılarak uyumluluklarının karşılaştırılması da tez çalışmasında deneysel ve nümerik bulguların karşılaştırılmasına imkân tanımıştır.

Bu tez çalışmasında ilk olarak, son dönemlerde kullanılmaya başlanan av arama (AA) ve ateş böceği (AB) meta-bulgusal yöntemlerinin yapısal optimizasyon problemlerinin çözümünü bulmadaki performansları karşılaştırılmıştır. Araştırma kapsamında literatürden alınan iki adet yapısal konfigürasyonları birbirinden farklı olan düzlem çerçeve ile ızgara sistemi tasarım örnekleri olarak alınıp bahsi geçen meta-bulgusal optimizasyon algoritmaları ile analiz edilmiş ve bu algoritmaların diğer yöntemlere göre performansları karşılaştırılmıştır. Optimizasyon kısmının ikinci aşamasında düzlem çerçeve ve ızgara sistem örneklerinde etkinlikleri belirlenen AA ve AB yöntemlerinin kıyaslanması amacıyla yeni nesil kirişlerden olan ondülin gövdeli çelik kirişlerin (OGK) optimum boyutlandırma problemi; ondülin gövde yüksekliği, gövde dalga boyu, dalga yüksekliği, başlık kalınlığı ve başlık genişliği gibi tasarım değişkenleri kullanılarak geometrik ve davranışsal sınırlayıcıları altında çözülmüştür. Tasarım probleminin minimum ağırlığının bulunmasında bahsi geçen her iki yöntem de kullanılmıştır. Ondülin gövdeli çelik kiriş sistemlerinin tasarımları için BS EN1993-1:2005 (Annex-D, Eurocode 3) ve DIN 18-800 Teil-1 şartnamelerinde öngörülen tasarım kıstasları esas olarak kabul edilmiştir. Kompozit sistemler için bu şartnamelere ek olarak BS-8110'de öngörülen tasarım sınırlayıcıları dikkate alınmıştır. Tasarım örneği, AA yönteminin OGK'lerin optimum boyutlandırılmasında daha hızlı bir şekilde minimum ağırlığa yakınsadığını fakat belirli bir iterasyon sayısı aşıldıktan sonra AB yönteminin minimum ağırlığı elde etmede daha etkili olduğunu göstermiştir.

Tezin deneysel kısmında ise optimum boyutlandırılması yapılan yeni nesil OGK'lerin farklı yük kombinasyonları altında yük taşıma kapasiteleri yükleme çerçevesi kullanılarak test edilmiştir. I-kesitli profillerin narin gövdelerinde yükleme sonucunda oluşan stabilite kaybı, gövdede lokal burkulmalar ve deformasyonlar OGK\_330, OGK\_415 ve OGK\_500 kirişlerinde yapılan testlerde dalgalı gövdeden dolayı meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Kirişin dalgalı gövde formu; uygulanan yük kombinasyonları altında kirişin plastik limit noktasına gelmeden rijitlik kaybına bağlı burkulmasını engelleyerek kesme kuvvetine ve yerel etkilere karşı kirişin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. OGK\_330, OGK\_415 ve OGK\_500 kiriş gövdelerinin dalgalı yapısı ile kiriş öz ağırlığının azalması ve yük taşıma kapasitesinin artması sağlanarak ekonomik kazanç elde edilmiştir. Eleman bazında testleri yapılan OGK'lerinin moment aktarmayan döşemelerdeki testlerinde de kiriş performansları test edilmiş, OGK'lerin döşemelerde

kiriş üst başlığının betonarme döşeme tarafından kesme çivileri vasıtasıyla kiriş boyunca tutmasıyla daha etkin bir şekilde kullanılabilceği farklı yükleme koşullarında yapılan altı döşeme testi ile gözlemlenmiştir.

Tezin son kısmında ise, dalgalı gövdeli çelik kiriş numunelerinin gövde levhası burkulma analizleri ve taşıyabilecekleri kritik yüklerin hesabı sonlu elemanlar yazılımı olan *ANSYS-Workbench v18.1* kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her farklı gövde kalınlığına ve boyuna sahip OGK'ler için kaydedilen sonlu elemanlar analiz sonuçları deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. Ondülin gövdeli çelik kirişlerden alınan kupon örnekleri üniversal test cihazında çekilerek akma ve kopma dayanımlarının yanı sıra elastisite modülü değerleri belirlenmiştir. Kompozit testlerde ise dökülen beton üzerinde alınan örneklerinden ortalama beton dayanımları bulunmuştur. Sonlu elemanlar analizlerinin malzeme özellikleri kısmında çelik ve beton için bulunan değerler kullanılmıştır. Nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığı zaman SEA'lerinde elde edilen deplasmanlar ve kiriş yük taşıma kapasiteleri deneysel sonuçlar ile %-5,6 ile %6,8 arasında değişen aralıklarda yakınsama göstermiştir. Böylelikle deneysel süreçte ölçüm yapılamayan bölgelerdeki gerilme dağılımları gösterilmiştir. Yapılan nümerik çalışma, deneysel süreçte yük taşıma kapasiteleri hesaplanan kirişlerden elde edilen değerlerin doğruluğunu izin verilebilir bir hata payı ile ortaya çıkarmıştır.

## 7. KAYNAKLAR

- 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.
- Abbas, H. H., Sause, R. and Driver, R. G. 2006. Behavior of corrugated web I-girders under in-plane loads. *Journal of Engineering Mechanics*, 132 (8): 806-814.
- Abraham, L. P. 2013. Behaviour of encased cold-formed trapezoidally corrugated web beam. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 2 (10): 2657-2663.
- Acevedo, H. G. S., Eskobar, C. A. M. and Estrada, O. A. G. 2018. Damage detection in a unidimensional truss using the firefly optimization algorithm and finite elements. Research Group on Energy and Environment, A009, Bucaramanga, Colombia, <http://arxiv.org/abs/1706.04449>.
- Agarwal, K., Wu, S. and Papangelis, J. 2018. Finite element analysis of local shear buckling in corrugated web beams. *Engineering Structures*, 162: 37-50.
- Agharghor, A. and Riffi, M. E. 2015. Hunting search algorithm to solve the traveling salesman problem. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 74 (1): 1-10.
- 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 trapezoidal corrugation in web by varying depth. *International Journal of Innovative Research & Development*, 2 (5): 938-950.
- Aydın, A. C., Maali, M., Kılıç, M. and Sağıroğlu, 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 behaviour of beam-to-column connections of corrugated web I-sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 100: 183-196.
- Aydın, R., Yüksel, E. and Yardımcı, N. 2016. İnce sinüzoidal gövdeli çelik 1 kesitlerden oluşturulan bir kolon-kiriş birleşiminin davranışı. Prof. Dr. M. Hasan Boduroğlu Sempozyumu, ss. 139-152, 9-10 Mayıs, İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Aydoğdu, İ., Kubar, M. M., Şen, D. Tunca, O. and Çarbaş, S. 2018. Optimum design of purlin systems used in steel roofs. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 4

(3): 89-94.

- Bartholome, S. and Pasternek, H. 2013. Girders with structured web- ongoing research. Annual Stability Conference Structural Stability Research 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 trapezoidally corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (6): 947-956.
- Basinsski, W. 2018. Shear buckling of plate girders with corrugated web restrained by end stiffeners. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3): 757-771.
- Brajevic, I. and Ignjatovic, J. 2018. An upgraded firefly algorithm with feasibility-based rules for constrained engineering optimization problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10.1007/s10845-018-1419-6.
- British Standards, BS 5950, 2000. Structural Use of Steelworks in Building, Part 1. Code of Practice for Design in Simple and Continuous construction, hot rolled sections, British Standard Institution, London, U.K.
- British Standards, BS 8110, Structural Use of Concrete, Part 1. Code of Practice for Design and Construction, British Standard Institution, London, U.K.
- 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.
- Cheng, J. and Yao, H. 2016. Simplified method for predicting the deflections of composite box girders. *Engineering Structures*, 128: 256-264.
- Cheng, M. Y. and Hoang, N. D. 2015. A Swarm-Optimized Fuzzy Instance-based Learning approach for predicting slope collapses in mountain roads. *Knowledge-Based Systems*, 76: 256-263.
- Chou, J. S., Yang, K. H., Pampang, J. P. and Pham, A. D. 2015. Evolutionary metaheuristic intelligence to simulate tensile loads in reinforcement for geosynthetic-reinforced soil structures. *Computers and Geotechnics*, 66: 1-15.
- Chou, J. S. and Ngo, N. T. 2016. Time series analytics using sliding window metaheuristic optimization-based machine learning system for identifying building energy consumption patterns. *Applied Energy*, 177: 751-770.
- Chou, J. S. and Ngo, N. T. 2017. Modified firefly algorithm for multidimensional optimization in structural design problems. *Struct Multidisc Optim*, 55: 2013–2028.

- Dabon, M. and Elamary, A. S. 2006. Flange compactness effects on the behavior of steel beams with corrugated webs. *Journal of Engineering Sciences*, 34 (5): 1507-1523.
- Denan, F. B., Saad, S. B. and Osman, M. H. B. 2009. Determination of the second moment of area of trapezoid web profile steel section. *Meniti Pembangunan Lestari dalam Kejuruteraan Awam*, January, Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Universiti Sains Malaysia.
- Denan, F. and Hashim, N. S. 2011. The effect of web corrugation angle on bending performance of triangular web profile steel beam section. *International Conference on Multimedia Technology*, ss. 6588-6591, 26-28 Jun, Hangzhou, China.
- Denan, F., Omar, N. and Mustapha, M. 2012. Finite element analysis of torsion behaviour of triangular web profile beam section. *PMM Research Colloquium*, ss. 1-4, January, Politeknik Merlimau, Melaka.
- Denan, F. and Mustar, M. 2012. The effect of web opening on lateral torsional behavior of triangular web profile steel beam section. *Proceeding of International Conference on Science, Technology & Social Sciences*, ss. 617-621, 20-22 November, Pahang, Malaysia.
- Denan, F. and Omar, N. 2012. Beam to column connections for triangular web profiled steel section (TRIWP). *PMM Research Colloquium*, ss. 1-5, January, Politeknik Merlimau, Melaka.
- Denan, F., Mustar, M., Hassan, A. and Omar, N. 2013. Effect of triangular web profile on the shear behaviour of steel I-beam. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 4 (3): 219-222.
- Denan, F. and Hashim, N. S. 2013. Experimental study on bending behaviour of triangular web profile steel beam section. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 21 (10): 384-390.
- Denan, F., Osman, M.H., Saad, S., Hashim, N.S. and Sharizal, N. 2015. Finite element analysis of the bending behaviour for triangular web profile with opening steel section. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5 (4): 1-7.
- Denan, F., Hasan, H., Osman, M.H. and Saad, S. 2016. Torsional behavior of triangular web profile (TRIWP) steel section by experimental study. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(4): 409-419.
- DIN 18 800 Teil1-3, Stahbauten; Bemessung und Konstruktion.
- DIN V ENV 1993-1-1, EUROCODE 3: Design of Steel Structures; Part 1- General Rules and rules for buildings.
- Divahar, R. and Joanna, P. S. 2018. Experimental study on lateral-torsional buckling of trapezoidally web profile cold formed steel beam by varying depth-thickness ratio using non-linear graphic solution. *TAGA Journal of Graphic Technology*, 14:

3292-3301.

- Dorigo, M., Stützle, T., 2004. Ant Colony Optimization, A Bradford Book, Massachusetts Institute of Technology, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, U.K, 301 s.
- Doğan, E., Şeker, S., Saka, M. P. and Kozanoğlu C. 2018. Investigating the effect of joint behavior on the optimum design of steel frames via hunting search algorithm. *Advanced Steel Construction*, 14(2): 166-183.
- Driver, R. G., Abbas, H. H. and Sause, R. 2006. shear behavior of corrugated web bridge girders. *Journal of Structural Engineering*, 132 (2): 195-203.
- Eldip, M. E. A. H. 2009. Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (12): 2129-2139.
- 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 webs up to failure using non-linear finite element analysis. *Advances in Engineering Software*, 29 (3-6): 195-208.
- Elkawas, A. A., Hassanein, M. F. and El-Boghdadi, M. H. 2017. Numerical investigation on the nonlinear shear behaviour of high-strength steel tapered corrugated web bridge girders. *Engineering Structures*, 134: 358-375.
- Erdal, F., Tunca, O. and Doğan, E. 2017. Optimum design of composite corrugated web beams using hunting search algorithm. *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)*, 9 (2): 156-168.
- Erdal, F. 2017. A firefly algorithm for optimum design of new-generation beams, *Engineering Optimization*, 49 (6): 915-931.
- Frans, R., Muhiddin, A. B. and Irmawaty, R. 2018. Sizing Optimization of Retaining Wall by Firefly Algorithm. *International Journal of Engineering and Science Applications*, 5 (1): 61-68.
- Fraser, A. F. 1956. Experiniental Investigation of the strength of multiweb beams with corrugated webs. National Advisory Committee for Aeronautics. Technical Note 3801, Washington.

- Gandomi, A. H., Yang, X. S. and Alavi, A. H. 2011. Mixed variable structural optimization using Firefly Algorithm. *Computers and Structures*, 89 (23-24): 2325-2336.
- Gandomi, A. H., Kashani, A. R., Roke, D. A. and Mousavi, M. 2015. Optimization of retaining wall design using recent swarm intelligence techniques. *Engineering Structures*, 103: 72-84.
- Gholizadeh, S. 2015. Performance-based optimum seismic design of steel structures by a modified firefly algorithm and a new neural network. *Advances in Engineering Software*, 81:50-65.
- Gil, H., Lee, S., Lee, J. and Lee, H. Shear Buckling Strength of Trapezoidally Corrugated Steel Webs for Bridges. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 11: 473-480.
- Gocic, M., Motamedi, S., Shamshirband, S., Petkovic, D., Ch, S., Hashim, R. and Arif, M. 2015. Soft computing approaches for forecasting reference evapotranspiration. *Computers and Electronics in Agriculture*, 113: 164-173.
- Goldberg D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing.
- Gorecki, M., Pienko, M. and Lagoda, G. 2018. Numerical analysis of beam with sinusoidally corrugated webs. *AIP Conference Proceedings*, 1922 (1): 1-10.
- Gönen, H. G. G. 2007. Endüstriyel yapı tasarımında H profillerle ondülin gövdeli profillerin karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 161 s.
- Gremza, G. and Basinski, W. 2019. Resistance of steel – concrete composite girders with corrugated web. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471: 1-10.
- Guo, Y. L., Chen, H., Pi, Y. L., Duo, C. and Bradford, A. 2015. In-plane failure mechanism and strength of pin-ended steel I-section circular arches with sinusoidal corrugated web. *Journal of Structural Engineering*, 142: 1-15.
- Guo, Y. L., Chen, H., Pi, Y. L. and Bradford, M. A. 2016. In-plane strength of steel arches with a sinusoidal corrugated web under a full-span uniform vertical load: Experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, 110: 105-115.
- Hajsadeghi, M., Zirakian, T., Keyhani, A., Naderi, R. and Shahmohammadi, A. 2014. Energy dissipation characteristics of steel coupling beams with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 10:124-132.
- Hering, A., Tensing, D. and Jacob, P. A. 2013. Studies on plate girder with various types of web plates. *International Journal of Engineering Research and Development*, 6 (2): 14-21.

- Hestenes, M.R., 1969. Multiplier and gradient methods. *Optimization Theory and Applications* 4: 303-320.
- Hoang, N. D. and Pham, A. D. 2016. Hybrid artificial intelligence approach based on metaheuristic and machine learning for slope stability assessment: A multinational data analysis. *Expert Systems with Applications*, 46: 60-68.
- Ibrahim, S. A., El-Dakhakhni, W. W. and Elgaaly, M. 2006a. Fatigue of corrugated-web plate girders: Experimental study. *Journal of Structural Engineering*, 132 (9): 1371-1380.
- Ibrahim, S. A., El-Dakhakhni, W. W. and Elgaaly, M. 2006b. Fatigue of corrugated-web plate girders: Analytical study. *Journal of Structural Engineering*, 132 (9): 1381-1392.
- Jager, B., Dunai, L. and Kövesdi, B. 2016. Experimental based numerical modelling of girders with trapezoidally 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 web. *Thin-Walled Structures*, 119: 72-82.
- Johnson, R.P. and Cafolla, J. 1998. Local flange buckling in plate girders with corrugated webs. *Structures and Buildings (ICE)*, 123: 148-156.
- Khalid, Y. A., Chan, C. L., Shari, B. B. and Hamouda, A. M. S. 2004. Bending behaviour of corrugated web beams. *Journal of Materials 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.
- Kim, K. S., Lee, D. H., Choi, S. M., Choi, Y. H. and Jung, S. H. 2011. Flexural behavior of prestressed composite beams with corrugated web: Part I. Development and analysis. *Composites*, 42 (6): 1603-1616.
- Kim, K. S. and Lee, D. H. 2011. Flexural behavior of prestressed composite beams with corrugated web: Part II. Experiment and verification. *Composites*, 42 (6): 1617-1629.
- Kirkpatrick, S., Gerlatt, C. D. and Vecchi, M. P., 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220: 671-680.
- Kollar, D. and Kövesdi, B. 2018. Effect of imperfections and residual stresses on the shear buckling strength of corrugated web girders. *Eighth International Conference on Thin-Walled Structures*, ss. 1-19, July, Lisbon, Portugal.

- 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: 204-215.
- Kudryavtsev, S. 2019. Lateral-torsional buckling behaviour of triangularly corrugated web beam. *Materials Science and Engineering*, 471: 1-7.
- Kulluk S. 2013. A novel hybrid algorithm combining hunting search with harmony search algorithm for training neural networks. *Journal of the Operational Research Society*, 64 (5):748-761.
- Leblouba, M, Barakat, S., Maalej, M., Al-Toubat, S. and Karzad, A. S. 2019. Normalized shear strength of trapezoidal corrugated steel webs: Improved modeling and uncertainty propagation. *Thin-Walled Structures*, 137: 67-80.
- Lee, K.S., Geem, Z.W., 2004. A New structural optimization method based on the harmony search algorithm. *Computers and Structures*, 82: 781-798.
- Leblouba, M., Junaid, M. T., Barakat, S., Altoubat, S. and Maalej M. 2017. Shear buckling and stress distribution in trapezoidal web corrugated steel beams. *Thin-Walled Structures*, 113: 13-26.
- 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.
- 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.
- Li, G. Q., Jiang, J. and Zhu, Q. 2015. Local buckling of compression flanges of H-beams with corrugated webs. *Journal of Constructional Steel Research*. 112: 69-79.
- Li, Y., Zhang, W., Zhou, Q., Qi, X., Widera G.E.O., 2000. Development and Research on H-beams with Wholly Corrugated Webs. *Journal of Materials Processing Technology*, 101, 1-3, 115-118.
- Li, X., Zhang, Z. and Li, G. 2019. Local bearing capacity of steel beams with corrugated webs. *International Journal of Steel Structures*, 19 (1): 44-57.
- Li, Y., Zhang, W., Zhou, Q. Qi, Z. and Widera, G. E.O. 2000. Buckling strength analysis of the web of a WCW H-beam: Part 2. Development and research on H-beams with wholly corrugated webs (WCW). *Journal of Materials Processing Technology*, 101 (1-3): 115-118.
- Lin, X., Far, H. and Saleh, A. 2019. Structural behaviour and mechanical properties of welded steel I-girders with corrugated webs. *International Journal of Steel Structures*, <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00209-3>.

- 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.
- Machimdamrong, C., Watanabe, E. and Utsunomiya, T. 2003. An extended elastic shear deformable beam theory and its application to corrugated steel web girder. *Journal of Structural Engineering*, 49(A) :29-38.
- Mathe, S. and Parthasarathi, N. 2015. Experimental study and behaviour of encased cold formed beam with triangular corrugated web. *International Journal of Advanced Research in Engineering Technology & Sciences*, 2 (12): 5-13.
- Mejlej, V. G., Falkenberg, P., Turck, E. and Vietor, T. 2017. Optimization of variable stiffness composites in Automated Fiber Placement Process Using Evolutionary Algorithms. 1st Cirp Conference on Composite Materials Parts Manufacturing, cirp-ccmpm2017, ss. 79-84, 8-9 June, Karlsruhe, Germany.
- Metwally, A. and Loov, R. E. 2003. Corrugated steel webs for prestressed concrete girders. *Materials and Structures*, 36: 127-134.
- Miguel, L. F. F. and Miguel., L.F. F. 2012. Shape and size optimization of truss structures considering dynamic constraints through modern metaheuristic algorithms. *Expert Systems with Applications*, 39(10): 9458-9467.
- Miguel L. F. F., Lopez R. H. and Miguel L. F. F. 2013. Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the Firefly algorithm. *Advances in Engineering Software*, 56: 23-37.
- Miguel L. F. F., Lopez R. H., Torii, A., Miguel L. F. F. and Beck, A. T. 2016. Robust design optimization of TMDs in vehicle-bridge coupled vibration problems. *Engineering Structures*, 126: 703-711.
- Mo, Y. L., Jeng, C. H. and Krawinkler, H. 2003. Experimental and analytical studies of innovative prestressed concrete box-girder bridges. *Materials and Structures*, 36: 99-107.
- Moon, J., Yi, J., Choi, B. H. and Lee, H. E. 2009. Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs. *Journal of Constructional Steel Research*, 65 (5): 1198-1205.
- Nayak, J. R., Shaw, B., Das, S. and Sahu, B.K. 2018. Design of MI fuzzy PID controller optimized by Modified Group Hunting Search algorithm for interconnected power system. *Microsystem Technologies*, 24(9): 3615-3621.
- Nguyen, N. D., Kim, S. N., Han, S. R. and Kang, Y. J. 2010. Elastic lateral-torsional buckling strength of I-girder with trapezoidal web corrugations using a new warping constant under uniform moment. *Engineering Structures*, 32 (8): 2157-2165.
- Oftadeh, R., Mahjoob, M.J., Shariatpanahi, M., 2010. A novel meta-heuristic

- optimization algorithm inspired by group hunting of animals: Hunting search. *Computers and Mathematics with Applications*, 60: 2087-2098.
- Oliveira, J. P. S., Calenzani, A. F. G., Fakury, R. H. and Ferreira, W. G. 2016. Elastic critical moment of continuous composite beams with a sinusoidal-web steel profile for lateral-torsional buckling. *Engineering Structures*, 113: 121-132.
- Pasternak, H., Kubieniec, G., 2010. Plate girders with corrugated webs. *Journal of Civil Engineering and Management*, 16 (2): 166-171.
- Pedro, R. L., Demarche, J., Miguel, L.F.F. and Lopez, R.H. 2017. An efficient approach for the optimization of simply supported steel-concrete composite I-girder bridges. *Advances in Engineering Software*, 112:31-45.
- Perez, R.E., Behdinin, K., 2007. Particle swarm approach for structural design optimization, *Computers and Structures*, 85 (19-20): 1579-1588.
- 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.
- Revathi, N., Satheshkumar, G.K., Arunkumar, G. 2016. Numerical investigation on flexural behaviour of cold formed steel I section with triangular corrugated web. *International Journal of Research and Innovation in Engineering Technology*, 2 (12): 48-53.
- Riahi, S., Behraves, A. Fard, M. Y. and Armaghani, A. 2018. Shear buckling analysis of steel flat and corrugated web I-girders. *KSCE Journal of Civil Engineering* 22 (12): 5058-5073.
- 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.
- Sayed-Ahmed, E. Y. 2005. Lateral torsion-flexure buckling of corrugated web steel girders. *Structures & Buildings*, 158 (1): 53-69.
- Satheshkumar, G. K. and Arunkumar, G. 2016. Effect of sinusoidal corrugation depth on flexural behavior of cold formed steel I beam. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 2 (6): 648-651.
- Sause, R. and Braxtan, T. N. 2011. Shear strength of trapezoidal corrugated steel webs.

*Journal of Constructional Steel Research*, 67 (2): 223-236.

- Savkovic, M. M., Bulatovic, R. R., Gasic, M. M., Pavlovic, G. V. and Stepanovic, A. Z. 2017. Optimization of the box section of the main girder of the single-girder bridge crane by applying biologically inspired algorithms. *Engineering Structures*, 148: 452-465.
- Shanmugam, N. E., Basher, M. A. and Rashid, K. A. 2014. An approximate method for the ultimate shear strength of horizontally curved composite plate girders. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20 (3): 330-337.
- Sherman, D. and Fisher, J. 1971. Beams with Corrugated Webs. International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, ss. 196-204, 20 August, University of Missouri-Rolla, USA.
- Souza, R. R., Miguel, L. F. F., Lopez, R. H., Miguel, L. F. F. and Torii, A. J. 2016. A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures. *Engineering Structures*, 111:162-184.
- Steelwork design Guide to BS 5950: Part 1, 1990. Section Properties, Member Capacities, Vol.1, 4th edition, The Steel Construction Institute, U.K.
- 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.
- Sumathi, A. and Babu, M. C. 2017. Flexural behavior of cold formed steel i-section beam with corrugated web. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 18 (1): 31-38.
- Şeker, S., Doğan, E. ve Kozanoğlu, C. 2017. Yarı rijit çelik çerçevelerin stokastik arama yöntemleri kullanılarak optimum boyutlandırılması. *Celal Bayar University Journal of Science*, 13(3): 785-795.
- Tahir, M. M., Sulaiman, A. and Saggaff, A. 2008. Structural behaviour of trapezoidal web profiled steel beam section using partial strength connection. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 8: 55-66.
- Turan, M.E. 2016. Fuzzy systems tuned by swarm based optimization algorithms for predicting stream flow. *Water Resour Manage*, 30: 4345-4362.
- 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.
- Vaez, S. R. H. and Qomi, H. S. 2018. Bar layout and weight optimization of special RC shear wall. *Structures*, 14: 153-165.
- Venkayya, V.B., Khot, N.S., Berke, L., 1973. Application of optimality criteria approaches to automated design of large practical structures, Second Symposium

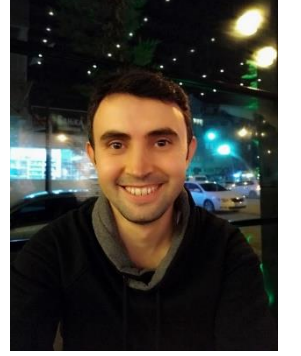
Structural Optimization, AGARD-CP-123, ss. 3.1-3.19, April, Milano, Italy.

- Yang, X. S. 2009. Firefly algorithms for multimodal optimization. stochastic algorithms: foundations and applications. 5th International Symposium, SAGA 2009, ss. 169-178, 26-28 October, Sapporo, Japan.
- Yang, X.S., 2011. Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2 (2) 78–84.
- Yi, J., Gil, H., Youm, K. and Lee, H. 2008. Interactive shear buckling behavior of trapezoidally corrugated steel webs. *Engineering Structures*, 30 (6): 1659-1666.
- Wahid, F., Ghazali, R. and Ismail, L. H. 2019. Improved firefly algorithm based on genetic algorithm operators for energy efficiency in smart buildings. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44: 4027-4047.
- Zhang, A. L., Li, S. H., Jiang, Z. Q., Fang, H. and Dou, C. 2017. Design theory of earthquake-resilient prefabricated sinusoidal corrugated web beam-column joint. *Engineering Structures*, 150: 665-673.
- Zubkov, V., Lukin, A. and Alpatov, V. 2018. Experimental research of beams with corrugated web. *MATEC Web of Conferences*, 196: 1-6.



## ÖZGEÇMİŞ

**OSMAN TUNCA**  
osmantunca@kmu.edu.tr



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2015-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Yüksek Lisans 2010-2013	Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep
Lisans 2005-2010	Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi 2014-Devam ediyor	Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman
--	---

### ESERLER

#### Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- Yıldız S. A., Çarbaş S. and Tunca O. (2018). Cost Comparison of Traditional Glass Fiber Test Methods and Computer Aided Neural Prediction Supported Systems. Smart Construction Research, 2(4), 1-8., Doi: 10.18063/scr.v0i0.738.

2- Aydoğdu İ., Kubar M. M., Şen D., Tunca O. and arbaŐ S. (2018). Optimum design of purlin systems used in steel roofs. Challenge Journal of Structural Mechanics, 4(3), 89-94., Doi: 10.20528/cjsmec.2018.03.002.

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

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

5- Tunca O., Aydoğdu İ., and arbaŐ S. (2017). Optimum Design of Braced Barrel Vault Systems Using Cold-Formed Steel Sections. European Council of Civil Engineers, 15, 9-16.

6-Tunca O. and arbaŐ S. (2016). Biogeography Based Optimization Algorithm for Designing of Planar Steel Frames. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 4, 53-57., Doi: 10.18201/ijisae.266128.

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

8- Erdal F., Taş S., Tunca O. and arbaŐ S. (2016). Effect of Random Number Sequences on The Optimum Design of Castellated Beams with Improved Harmony Search Method. International Journal of Engineering Applied Sciences, 8(3), 25-39.

9-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.

10- Erdal F., Tunca O. and Taş S. (2016). Nonlinear finite element analysis of optimally designed steel cellular beams. Research on Engineering Structures and Materials, 2(2), 59-66., Doi: 10.17515/resm2015.22me0903.

11-Güneyisi E. M., Tunca O. and Azez I. (2015). Nonlinear dynamic response of reinforced concrete building retrofitted with buckling restrained braces. Earthquakes and Structures, 8(6), 1349-1362., Doi: 10.12989/eas.2015.8.6.1349.

### **Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler**

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

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

3- Tunca O, Güneyisi E. M. (2013). Burkulması Önlenmiş Çaprazların Betonarme Çerçeve Yapının Deprem Performansı Üzerine Etkisi. 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı.

### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler**

1- Çarbaş S., Tunca O. and Yıldız S. A. (2018). Contemporary Optimization Assessment of Complicated Engineering Problems. International Conference on Mathematical Studies and Applications 2018, 61-66.

2- Çarbaş S., Tunca O. and Yıldız S. A. (2018). Impact of Geometric Nonlinearity on the Analysis of Spatial Steel Frames. International Conference on Mathematical Studies and Applications, 348-354.

3- Erdal F. Tunca O. and Çarbaş S. (2018). A Firefly Algorithm for Optimum Design of Corrugated Steel Web Beams. International Conference on Civil and Environmental Engineering, 28, 53-59.

4- Yıldız S. A., Tunca O., Uzun M. ve Çarbaş S. (2018). Ermenek ve Çevresinde Bulunan Yapıların Sıvalarının İncelenmesi. Uluslararası Geçmişten Günümüze Ermenek ve Çevresi Sempozyumu.

5- Tunca O., Aydoğdu İ., Ömercioğlu T. O. and Çarbaş S. (2018). Grasshopper Optimization Algorithm Based Design of Structures. International Conference on Applied Mathematics in Engineering, 170-170.

6- Tunca O., Aydoğdu İ., Erdal F. and Çarbaş S. (2018). Structural Design Optimization through Water Cycle Algorithm with Evaporation Rate. International Conference on Applied Mathematics in Engineering, 169-169.

7- Tunca O., Aydoğdu İ. and Çarbaş S. (2018). Symbiotic Organisms Search Based Optimal Design of Steel Rigid Frames. International Congress on Computational Mechanics, 57-57.

8- Tunca O., Aydoğdu İ., Erdal F. and Çarbaş S. (2018). Optimal Discrete Design of Steel Truss Systems Using Symbiotic Organisms Search. International Congress on Computational Mechanics, 58-58.

9- Yıldız S. A., Tunca O., Öztürk A. U. and Doğan E. (2018). Mono Fiber Reinforced Expanded Glass Aggregate Added Gypsum Composites. International Congress on Engineering and Life Science, 75-75.

- 10- Yıldız S. A., Tunca O., Öztürk A. U. and Çarbaş S. (2018). Micro Glass Fiber Reinforced Concrete. 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 329-329.
- 11- Yıldız S. A., Tunca O. and Öztürk A. U. (2018). Prefabricated Concrete Production Quality Management. 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 330-330.
- 12- Tunca O., Aydoğdu İ. and Çarbaş S. (2017). Soğukta Şekillendirilmiş Çelik Profiller Kullanılarak Yapılan Tonoz Sistemlerin Optimum boyutlandırmaı. Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, 221-231.
- 13- Aydoğdu İ., Kubar M. M., Şen D., Tunca O. and Çarbaş S. (2017). Çelik Çatılarda Kullanılan Aşık Sistemlerinin Optimum boyutlandırmaı. Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, 241-250.
- 14- Tunca O., Erdal F. Sağsöz A. E. ve Çarbaş S. (2017). Soğukta Şekillendirilmiş Çelik Profillerin Yapısal Özellikleri. Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, 233-240.
- 15- Erdal F., Tunca O., Taş S. and Çarbaş S. (2017). Experimental Tests of Optimally Designed Composite Corrugated Web Beams. 3rd International Conference on Mechanics of Composite, 1, 41, Doi: 10.15651/978-88-938-5029-2.
- 16- Tunca O., Aydoğdu İ., Erdal F. and Çarbaş S. (2017). Structural Shape Design Optimization of Steel Lamella Domes. 2 International Congress on Engineering Architecture and Design, 420-421.
- 17- Tunca O., Aydoğdu İ. and Çarbaş S. (2017). Melez Metabulğusal Yöntemler Vasıtasıyla Optimal Çelik Yeşi Bina Tasarımı. 2. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 422-423.
- 18- Tunca O., Erdal F., Çarbaş S. and Taş S. (2016). Finite Element Analysis and Experimental Studies of Optimum Designed Angelina Steel Beam. International Energy and Engineering Conference.
- 19- Erdal F., Tunca O., Taş S. and Çarbaş S. (2016). Nonlinear Finite Element Analysis of Optimally Designed Steel Angelina Beams. 18th International Conference on Civil, Structural and Earthquake Engineering, 60-64.
- 20- Tunca O. and Çarbaş S. (2016). Biogeography Based Optimization Algorithm for Designing of Planar Steel Frames. 3rd International Conference on Advanced Technology Sciences.
- 21- Erdal F., Tunca O. and Taş S. (2016). The Comparative Analysis of Optimal Designed Web Expanded Beams via Improved Harmony Search Method. 4th International Conference on Advances in Civil, Structural and Construction Engineering, 68-72., Doi: 10.15224/978-1-63248-101-6-56.

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

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

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

