

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

**FRP VE BAL PETEĞİ PANELLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KİRİŞLERİN  
MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa KANTARCI**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar AYZ**

**HAZİRAN 2021**

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

**FRP VE BAL PETEĞİ PANELLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KİRİŞLERİN  
MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa KANTARCI**

**(36173621022)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar AYZ**

**Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Müslüm Murat MARAŞ**

**HAZİRAN 2021**

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, bana değerli zamanını ayıran ve her konuda yardımcı olan danışman hocam Sn. Doç. Dr. Yaşar AYZA'ya ve ikinci danışman hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi M. Murat MARAŞ'asaygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım için sağladığı teknik destekten dolayı teknisyen İlhami BAYSAL'a teşekkür ederim.

Malzeme temininde sağlamış oldukları desteklerden dolayı SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye ve Karçimsa Çimento San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Benden, her konuda desteklerini esirgemeyen, başta eşim olmak üzere tüm aile fertlerine

teşekkür ederim.

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “FRP ve Bal Peteği Paneller İle Güçlendirilmiş Kirişlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mustafa KANTARCI



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....	i
ONUR SÖZÜ .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER .....</b>	<b>3</b>
2.1 Kompozit Malzeme ve Tarihçesi .....	3
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	5
2.2.1 Matris malzeme cinsine göre sınıflandırma çeşitleri .....	5
2.2.1.1 Metal matris kompozitler.....	5
2.2.1.2 Seramik matris kompozitler.....	5
2.2.1.3 Polimer matris kompozitler .....	6
2.2.2 Donatı elemanlarının şekil veya yerleştirilme biçimine göre sınıflandırılması.....	6
2.2.2.1 Elyaf (fiber) donatı kompozitler (Tek Tabaka Kompozitler) .....	6
2.2.2.2 Parçacık takviyeli kompozitler .....	6
2.2.2.3 Tabakalı kompozitler .....	6
2.3 Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri .....	7
2.4 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	8
2.4.1 Avantajları .....	8
2.4.2 Dezavantajları .....	9
2.5 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları .....	9
2.6 Yapıların Güçlendirilmesi.....	11
2.6.1 Güçlendirme kavramı .....	12
2.6.2 Güçlendirme yöntemleri .....	12
2.7 Betonarme Yapı Elemanı Olarak Kirişler .....	13
2.7.1 Betonarme kirişlerin tasarım ilkeleri ve yönetmeliği.....	14
2.7.2 Kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı.....	15
2.8. Kiriş güçlendirme çalışmaları .....	16
2.8.1 Fiber takviyeli kompozit malzemelerle yapılan güçlendirme çalışmaları.....	16
2.8.2 Bal peteği kompozit malzemelerle yapılan güçlendirme çalışmaları.....	18
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>20</b>

3.1 Materyaller .....	20
3.1.1 Kalıp.....	20
3.1.2 Beton .....	20
3.1.3 Çelik Donatı .....	20
3.2 Deney Numunelerinin İmalatı .....	21
3.3 Güçlendirme Malzemeleri.....	22
3.3.1 Yapıştırıcı.....	22
3.3.2 FRP malzemesi .....	23
3.3.2.1 FRP'lerin mekanik özellikleri.....	23
3.3.2.2 Deneyde kullanılan fiber takviyeli polimer .....	24
3.3.3 Bal peteği sandviç panel .....	25
3.3.3.1 Bal peteği sandviç panelin mekanik özellikleri .....	25
3.3.3.2 Deneyde kullanılan bal peteği sandviç panel.....	26
3.4 Güçlendirme Prosedürü.....	28
3.5 Testlerin Kurulumu ve Prosedürü .....	33
<b>4-ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>35</b>
4.1 Yük- Yer değiştirme Eğrileri.....	35
4.2 Yük Taşıma Kapasitesi.....	38
4.3 Yer Değiştirme Sünekliği.....	41
4.4. Numunelerin Göçme Modları .....	43
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>47</b>
5.1 Sonuçlar .....	47
5.2 Öneriler.....	48
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>49</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>56</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2. 1 :</b> Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri (Bingöl ve Çavdar 2016).....	<b>7</b>
<b>Çizelge 2. 2 :</b> Kompozit malzemelerin uygulama alanları (Türkmen, 2010).....	<b>10</b>
<b>Çizelge 3. 1 :</b> Teknobond yapıştırıcının fiziksel özellikleri.....	<b>24</b>
<b>Çizelge 3.2 :</b> Teknobond yapıştırıcının mekanik özellikleri.....	<b>25</b>
<b>Çizelge 3.3 :</b> Bal peteği sandviç panellerin özellikleri.....	<b>29</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Eski dönemlerde kompozit şekilde üretilen malzemeler (Zorlu, 2018).....	3
Şekil 2.2 : Cam lifinden elde edilen eşyalar (Zorlu, 2018).....	4
Şekil 2.3 : Bazı fiberlerin mekanik davranışı (Sayman, 2007).....	8
Şekil 2.4 : Kompozit malzemeden üretilen crash test bariyerleri (Aydıncak, 2007).....	11
Şekil 2.5 : Kiriş kesit türleri (Doğangün, 2008).....	14
Şekil 2.6 : Belli yük altındaki kirişin davranışı (Doğangün, 2008).....	14
Şekil 2.7 : Basınç donatısının rijitlik katsayısına etkisi (Yüksel ve diğ, 2019).....	16
Şekil 2.8 : Kesme etkisi altındaki kirişte çatlak oluşumu (Doğangün, 2008).....	17
Şekil 2.9 : Bal peteği panelin kalınlığına bağlı enerji absorbe etme miktarı (Wang,2009) .....	20
Şekil 3.1 : Beton numune a) Küp numune, b) Slump deneyi.....	21
Şekil 3.2 : Betonarme kirişte kullanılan çelik donatılar.....	22
Şekil 3.3 : Deney kirişinin detayları.....	23
Şekil 3.4 : Bu çalışmada kullanılan CFRP kumaşı ve uygulanışı.....	26
Şekil 3.5 : Bal peteği sandviç panel detayı (Bekem vd, 2011).....	27
Şekil 3.6 : Alüminyum balpeteği sandviç paneller (AHSP).....	28
Şekil 3.7 : Kirişlerin güçlendirme aşamaları (AHSP uygulama öncesinde FRP'lerin uygulanışı) .....	30
Şekil 3.8 : AHSP ve CFRP'lerin güçlendirmede yerleşim planları.....	33
Şekil 3.9 : (a) Ön görünüş (çerçeve sistemi), (b) Test prosedürü (dört noktalı eğilme testi) .....	35
Şekil 4.1 : Betonarme kirişlerin yük-yer değiştirme eğrileri.....	38
Şekil 4.2 : Kirişlerin eğilme yükü taşıma kapasitesi.....	41
Şekil 4.3 : Özgül enerji soğurma hesabı (Spacone ve diğ, 2004).....	42
Şekil 4.4 : Deformasyona bağlı süneklik indisi değişimi.....	43
Şekil 4.5 : Betonarme kiriş numuneleri için çatlak modelleri.....	45
Şekil 4.6 : Referans kirişin çatlak desenleri ve harici olarak güçlendirilmiş kirişlerin göçme modları .....	48



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>FRP</b>	: Lif takviyeli Polimer
<b>CFRP</b>	: Karbon elyaf takviyeli Polimer
<b>AHSP</b>	: Alüminyum bal peteği sandviç panel
<b>LVDT</b>	: Deplasman ölçüm aleti
<b>HCRC1</b>	: Referans betonarme kiriş
<b>HCRC2</b>	: 6 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, orta noktası CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>HCRC3</b>	: 6 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, mesnet noktaları CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>HCRC4</b>	: 6 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, mesnet noktaları ve orta noktası CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>HCRC5</b>	: 10 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, orta noktası CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>HCRC6</b>	: 10 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, mesnet noktaları CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>HCRC7</b>	: 10 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, mesnet noktaları ve orta noktası CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>HCRC8</b>	: 15 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, orta noktası CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>HCRC9</b>	: 15 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, mesnet noktaları CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>HCRC10</b>	: 15 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kaplı, mesnet noktaları ve orta noktası CFRP kaplı betonarme kiriş
<b>TBDY 2018</b>	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
<b>TS 500</b>	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
<b>ANSYS</b>	: Analiz Sistemi Programı
<b>Solid65</b>	: 3-D Modelleme Programı
<b>CTP</b>	: Cam Takviyeli Polyester
<b>CNT</b>	: Karbon nanotüpü
<b>PAN</b>	: Poli Akrila Nitril

<b>E</b>	: Elastisite Modülü
<b>I<sub>0</sub></b>	: Atalet Momenti
<b>Φ</b>	: Donatı çap sembolü
<b>A<sub>s</sub></b>	: Çekme donatısı alanı
<b>A<sub>s</sub>'</b>	: Basınç donatısı alanı
<b>B<sub>w</sub></b>	: Kiriş eni
<b>H</b>	: Kiriş yüksekliği
<b>k<sub>e</sub></b>	: Eğilme Rijitliği
<b>p'</b>	: Rijitlik Katsayısı
<b>P</b>	: Kesite etkiyen tekil yük
<b>V<sub>a</sub></b>	: A mesnetindeki normal tepki değeri
<b>V<sub>b</sub></b>	: B mesnetindeki normal tepki değeri
<b>P<sub>d</sub></b>	: Hareketli Yük
<b>L</b>	: Kiriş mesnetler arası net açıklık
<b>Mm</b>	: Milimetre
<b>MPa</b>	: Mega paskal
<b>GPa</b>	: Giga paskal
<b>T.E</b>	: Tarafsız Eksen
<b>T1</b>	: Bal peteği üst levha kalınlığı
<b>T2</b>	: Bal peteği alt levha kalınlığı
<b>W</b>	: Bal peteği genişliği
<b>l</b>	: Bal peteği uzunluğu

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FRP VE BAL PETEĞİ PANELLER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KİRİŞLERİN MEKANİK

DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

MUSTAFA KANTARCI

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

56+x sayfa

2021

Danışman: Doç. Dr. Yaşar AYZ

Betonarme binaların servis ömürleri süresince deprem yüklerine maruz kalmaları ve çevre ile olan fiziksel ve kimyasal etkileşimleri sonucu bünyesinde çeşitli hasarlar meydana gelmektedir. Oluşan hasarların onarım ve güçlendirilmesi ile binaya yeniden istenilen dayanım ve dayanıklılığın kazandırılması amaçlanmaktadır. Binanın esas taşıyıcı elemanlarına uygulanan çeşitli güçlendirme teknikleri vardır. Güçlendirme tekniklerinin uygulandığı ana elemanlardan biri de betonarme kirişlerdir. Kirişlerde dış yükler aracılığıyla oluşan hasarları en aza indirmek için çeşitli kompozit malzemelere başvurulmuştur. Hızlı ve kolay uygulanmaları, öz ağırlıklarının yapıya ilave bir yük getirmeyecek kadar düşük olması, yüksek rijitlik/ağırlık ve dayanım/ağırlık oranlarına sahip olmaları bu malzemelerin tercih edilme sebepleri arasında yer almaktadır. Özellikle son yıllarda kompozit malzeme türlerinin kirişlerin güçlendirilmesi üzerine etkileri araştırılmaktadır. Bu çalışmada, üç farklı kalınlığa (6, 10 ve 15 mm) sahip alüminyum petek sandviç paneller (AHSP) ve farklı kesit konfigürasyonuna sahip karbon fiber takviyeli kompozitler (CFRP) U-Ceketler şeklinde kullanılarak betonarme kirişler güçlendirilmiş ve eğilme davranışı incelenmiştir. İlk olarak 10 adet 150mm\*100mm en kesit boyutu olan 2000 mm uzunluğunda betonarme kirişler üretilmiştir. Güçlendirilmemiş bir referans betonarme kirişin eğilme yükü altında davranışı ortaya çıkarılıp kalan diğer dokuz betonarme kiriş CFRP kompozit ve bal peteği paneller ile güçlendirilerek yük altındaki yapısal davranışları incelenmiştir. Eğilme testleri ile eğilme dayanımları hesaplanmış, yük-deplasman değişimleri incelenmiş ve hasar analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda farklı kalınlıkta uygulanan AHSP ve CFRP'lerin, referans kirişe göre daha yüksek eğilme dayanımı sağladığı ve daha sünek bir davranış sergilediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** CFRP, AHSP, Güçlendirme, Süneklik, Eğilme Testi, Kırılma

## ABSTRACT

M.Sc. Thesis

### INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF BEAMS REINFORCED WITH FRP AND HONEYCOMB PANELS

Mustafa Kantarcı

Inonu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

56+x pages

2021

Supervisors: Assoc. Prof. Dr. Yaşar AYZ

Various damages occur within the structure of reinforced concrete buildings as a result of exposure to horizontal earthquake loads during their service life and physical and chemical interactions with the environment. It is aimed to restore the desired strength and durability to the building by repairing and strengthening the damages. There are various reinforcements applied to the main bearing elements of the building. One of the main elements to which reinforcement techniques are applied is reinforced concrete beams. Various composite materials have been used to minimize the damage caused by external loads in the beams. These materials are preferred because they are fast and easy to apply, their self-weights are so low that they do not impose an additional load on the structure, and they have high rigidity/weight and strength/weight ratios. Especially in recent years, the effects of composite material types on reinforcement of beams have been investigated. In this study, reinforced concrete beams were strengthened and bending behavior was investigated by using aluminum honeycomb sandwich panels (AHSP) with three different thicknesses (6, 10 and 15 mm) and carbon fiber reinforced composites (CFRP) with different cross-section configurations as U-Jackets. Initially, 10 reinforced concrete beams with a cross-section size of 150 mm\*100 mm and a length of 2000 mm were produced. The behavior of an unreinforced reference reinforced concrete beam under bending load was revealed, and the remaining nine reinforced concrete beams were strengthened with CFRP composite and honeycomb panels to examine their structural behavior under load. Bending strengths were calculated by bending tests, load-displacement changes were examined and damage analyzes were made. As a result of the experiments, it has been seen that AHSP and CFRPs applied in different thicknesses cause higher bending strength and exhibit a more ductile behavior compared to the reference beam.

**Keywords:** CFRP, AHSP, Strengthening, Ductility, Flexural Test, Fracture

## 1. GİRİŞ

Betonarme yapılar kullanım süresi boyunca maruz kaldığı çevresel etkiler veya deprem yüklerine maruz kalması sonucu zaman içerisinde dayanımlarını kaybeder, güçlendirme ihtiyaçları doğar. Güçlendirme ve onarım ihtiyacı deprem etkisi sonucu olabileceği gibi yapının kullanım amaçlarının değişmesi veya yapılara ait yönetmeliklerin değişmesi sonucu ortaya çıkabilir. Güçlendirme amacıyla binanın taşıyıcı sistemine yeni betonarme veya çelik elemanlar ilave etme yapıda ilave yüklere sebep olduğu için başta temel sistemini olumsuz etkilemekte, ciddi maliyet artışlarına sebep olmaktadır. Betonarme yapı elemanlarına ek bir yük ilave etmeden yapının taşıma kapasiteleri artırılmaya çalışılmaktadır. Yapının esas taşıyıcı elemanları olan kolon, kiriş, perde, taşıyıcı duvar ve döşemeler uygun metotlarla güçlendirilmektedir. Bu elemanların kapasitelerini artıran malzemelerin başında fiber donatılı polimerler (FRP) ve bal peteği paneller gelmektedir. FRP uygulamaları hızlı ve etkili bir güçlendirme yapılabilmektedir (Anania ve diğ., 2005). Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde, karbon elyafı çekme yüzeyine epoksi ile yapıştırmak etkili bir tekniktir.

FRP'ler sadece güçlendirilmiş duvar ve betonarme yapılarda değil (Mohammed ve diğ., 2019; Babamohammadi ve diğ., 2019; Carozzi ve diğ., 2017), aynı zamanda deniz ve kıyı yapılarının (Li ve diğ., 2019), otoyol köprüsünün (Demers, 1998), boru ve altyapı tesislerinin onarımı ve güçlendirilmesinde (Hota ve Liang, 2011; Hollaway ve Head, 2001) ve yapıların patlama ve darbelere karşı korunmasında da (Pham ve Hao, 2016) kullanılmıştır. Günümüz uygulamaları, FRP kompozitlerin mevcut yapıların hem geleneksel (Frigione ve Lettieri, 2018; Nystrom ve diğ., 2003) hem de yeni inşaat (Nanni, 2003) onarımı ve güçlendirilmesi için ekonomik ve etkili (Alsayed ve Siddiqui, 2013) bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir. FRP'ler en yaygın kullanılan yapısal kompozit malzemelerdir (Turco ve diğ., 2006). Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, korozyon direnci, düşük geçirgenlik ve uygulama kolaylığı gibi performans özellikleri nedeniyle hasarlı duvar (Triantafillou, 1998; Grande ve diğ., 2011)] ve betonarme binaların (Salloum ve diğ., 2011; Realfonzo ve diğ., 2014) onarımında ve güçlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, FRP ve bal peteği sandviç panelli lifler kullanılan betonarme elemanlar, dış etkiler altındaki güçlendirme çalışmalarında hem yüksek süneklik hem de mukavemet elde edilebilir (Qiao, 2007). Son yıllarda kompozit paneller, zemin kaplamalarında, uçak ve uzay endüstrilerinin inşaat alanlarında ve metro ve raylı

sistemlerin iç dekorasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Xu ve Qiao, 2002). Bal peteği kompozit malzemeler, iki ince yüksek mukavemetli katman arasına bir bal peteği çekirdeğinin yerleştirilmesi ve bileşenlerin bir yüzeyden diğerine yük aktarımını aktarabilen güçlü yapıştırıcılarla (Heimbs, 2009) birbirine bağlanmasıyla oluşturulmuş ve düşük ağırlıklarla yüksek sertlik elde edilmiştir (He ve Wenbin, 2008). Petek yapısının ve bileşenlerinin analizleri (Wang ve diğ, 2014; Bai ve diğ, 2018), kurucu malzemeler ve kat özellikleri (Davalos ve diğ, 2001), yüzey laminatları ve çekirdek duvar mekanik özelliklerini (Paik ve diğ, 1999) kendi içinde gösterir. Petek çekirdek geometrisi ile yüzey katmanları arasında kullanılan yapıştırıcı, her iki elemanın da güçlü bir şekilde bağlanarak bir bütün olarak hareket etmesini sağlar (Renji ve diğ, 1996).

Sonuç olarak, yüksek burulma rijitliğine (Dharmasena, 2008) ve eğilme dayanımı (Huang ve Ng, 1998) sahip yapı elde edilir. Petek kompozit plakaların hücre (çekirdek) kısmı, altıgen bal peteği (Zhao ve diğ, 2017) olarak adlandırılır. Bal peteği hücrelerin üst ve alt yüzey örtüsüyle örtülmesi sonucu sandviç kompozit levhalar elde edilmiştir. Petek kompozit paneller hafif olması (Beulers, 1999) güçlendirme malzemelerinin ağırlığını kritik bir sorun olmaktan çıkarır ve yapıda yüksek mukavemeti elde etmemizi sağlar. Amaç, hafif yapılarla malzemenin kalınlığını (Zhong ve diğ, 2017) artırarak rijitliği artırmaktır. Bu malzemeler, yükü bir yüzeyden diğerine aktarabilen güçlü yapıştırıcılarla (Faroog ve diğ, 2017) yüksek mukavemetli (Yang ve diğ, 2018) alt ve üst yüzeylere yapıştırılır. Deneysel çalışmada, üç farklı çekirdek yüksekliğine sahip kaplamalı bal peteği sandviç panelin betonarme kirişlerin mekanik özelliklerine etkisi laboratuvar koşullarında araştırılmıştır. Güçlendirilmiş betonarme kiriş numunelerinin yapısal davranışı, dört noktalı eğilme testlerinde alüminyum petek sandviç paneller (AHSP'ler) ve karbon fiber takviyeli kompozitler (CFRP) kullanılarak test edilmiştir. Paneller, yüksek nem ve düşük geçirgenlik, daha yüksek korozyon direnci, hafif malzeme ve yüksek çekme ve basma mukavemeti nedeniyle geleneksel malzemelere göre birçok avantaj sergilemiştir. Araştırmaların büyük çoğunluğu FRP'lerle güçlendirilen betonarme elemanlarının deneysel davranışları ile ilgili olmakla birlikte yapısal onarım ve güçlendirme işlerinde AHSP'lerin kullanılması çok azdır. Bu nedenle, AHSP'ler, kargir ve betonarme yapılar için güçlendirme yöntemleri için önemli bir uygulama alanı olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, üç farklı kalınlığa (6, 10 ve 15 mm) sahip AHSP' ler ve farklı kesit konfigürasyonuna sahip CFRP U-Ceketler şeklinde kullanılarak betonarme kirişler güçlendirilmiş ve eğilme davranışı incelenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER

### 2.1 Kompozit Malzeme ve Tarihçesi

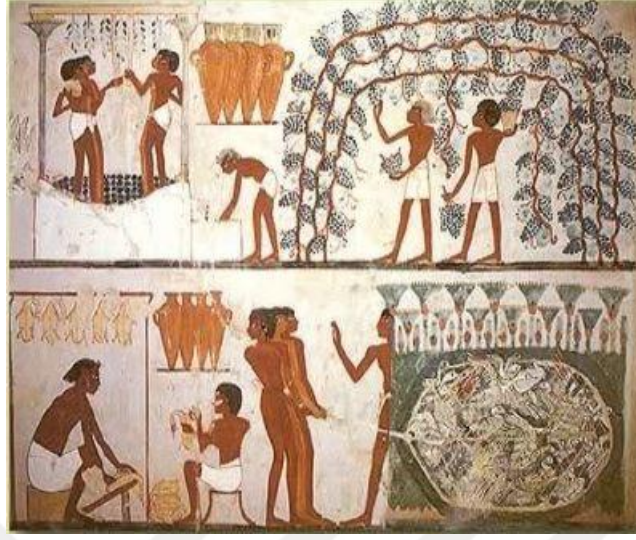
Sıradan malzemelerle karşılaştırıldığında, kompozit malzemeler, yalnız bir malzemenin zayıflığını iyileştirebilen veya ortadan kaldıracak değil, her malzemenin avantajlarına tam anlamıyla katkıda bulunan ve malzemeye yeni özellikler kazandıran birçok özelliğe sahiptir. Bileşenin yapısal ve gerilme gereksinimlerine göre, önceden belirlenmiş dağıtımın makul eşleştirme performansını verir ve malzemenin en iyi performansa ulaşmasını sağlar (Deng, 2007). Kompozit malzemelerin oluşum itibarıyla birçok bileşen türüyle üretimi mümkündür. Genel olarak sınıflandırmak istendiğinde iki ana başlık altında sınıflandırılır. Kompozitler matris (ana malzeme) ve takviye elemanı olacak şekilde iki bileşenden oluşurlar. Bileşenlerinin özellikleri biliniyorsa üretilen yeni kompozit malzemenin özellikleri yaklaşık olarak bilinilebilir. Kompozit malzemeler son yüzyılda ortaya çıkmış bir malzeme bilimi alanı değil bilakis insanlığın ilk dönemlerinden itibaren kullanılmaya başlanılmıştır. İnsanlar yapılar imar edip, savunma araçları üretip hayatlarını idame etmeye çalışmışlardır. Toprağın içine çeşitli bitkisel ve hayvansal lifler eklenerek malzemenin (harcın) hasar görülebilirliğinin azaltılması amaçlanmıştır. Kerpiç malzemeye saman, sarmaşık dalı, sap ve lifler ilave edilmiş, kılıç, ok gibi savunma ve saldırı araçları gibi çok çeşitli kompozitler üretilmiştir (Zorlu, 2018).



Şekil 2.1 Eski dönemlerde üretilen kompozit malzemeler (Zorlu, 2018)

Yapılan araştırmalarda, kompozitlerin donatılmasında yaygın olarak kullanılan liflerle ilgili uygulamanın çok yeni olmadığı anlaşılmaktadır. Örneğin cam liflerinin üretimi, Eski Mısır'a kadar dayanmaktadır. Dahası M.Ö.1600 yıllarında Mısır'da ince cam liflerinin

imalatının, XVIII. Hanedan devrinden kalan, farklı renkte cam liflerinden elde edilen çeşitli eşyalardan anlaşılmaktadır (Şekil 2.2.) (Zorlu, 2018).



**Şekil 2.2** Cam lifinden elde edilen eşyalar (Zorlu, 2018)

1800’li yıllarda kompozit malzemelerin üretimi hız kazanmış, birtakım yeni yöntemler denenip patentler oluşturulmuştur. Günümüzde de başta betonarme ve ahşap konutlar olmak üzere birçok sahada kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımının yaygınlaşması 2. Dünya Savaşında plastik materyaller halinde üretimi ile hız kazanmış ve 1946’dan sonra tüm dünyada rağbet görebilecek şekilde ticari ürün haline almıştır (Bolat, 2011). Kompozit malzeme bilimindeki gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda, sürekli yenilenen bir bilim dalı olduğu görülmektedir. Geçmişten günümüze kadar kompozit malzemeler çeşitli kombinasyonlarla üretilip verimliliği yüksek malzemeler elde edilmiştir.

Bir malzemenin kompozit malzeme olarak tanımlanması için iki temel bileşene sahip olması gerekir. Bunlar matris yapı ve donatı elemanı olarak tanımlanır. Matris yapısı mütemadi bir yapıya sahip olması ile takviye elemanını bir arada tutarak kendi aralarında bir bütünlük sağlar. Donatı elemanı matris yapı içerisinde çözünmeyerek matrisin dayanımını artırır ve kendi içinde belirgin bir arayüze sahip olurlar. Aksi taktirde iki temel bileşen atomal veya moleküler düzeyde birleşirse oluşan homojen mikroyapı nedeniyle kompozit malzeme olarak tanımlanamazlar. Kompozit malzeme kendisini oluşturan bileşenlerin özelliklerini muhafaza ederek hem matris yapısına hem takviye elemanına göre daha üstün özellikler gösterirler (Sasikamur ve diğ., 2014; Gecü ve Karaaslan, 2016;



Schwartz, 1983). Kompozit malzeme alanında günümüze kadar, hem takviye malzemelerinde, hem de matris malzemelerinde birçok nitelikte yenilikler elde edilmiştir.

## **2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması**

### **2.2.1 Matris malzeme cinsine göre sınıflandırma çeşitleri**

Kompozit malzemenin matris yapısı malzemeye uygulanan herhangi bir kuvveti arayüz vasıtasıyla takviye elemanına ileterek eleman içinde oransal bir dağıtım sağlar. Böylelikle malzemenin plastik deformasyona geçişinde oluşması muhtemel bir çatlakın ilerlemesini önleyici bir katkı sağlar ve malzemenin hasara uğramasını geciktirir. Ayrıca oksidasyon ve korozyon gibi çevresel faktörlerden etkilenmemesini sağlar. Matris malzemesine göre kompozitler;

- Metal matrisli
- Seramik matrisli
- Polimer matrisli, olmak üzere üç gruba ayrılır (Onaran, 2003; Kaya, 2016; Gülmez, 2018).

#### **2.2.1.1 Metal matris kompozitler**

Metalik malzemelere göre daha yüksek özgül dayanıma sahip malzemelere ihtiyaç duyulduğundan dolayı bu tür kompozit malzemelerin üretimi gelişmiştir. Metal matrisli kompozitler metal ve alaşımların matris malzemesi olarak kullanılırken seramik veya organik malzemelerin ise takviye elemanı olarak kullanıldığı malzemelerdir (Mohammed ve diğ, 2019; Babamohammadi ve diğ, 2019). Metal matrisli kompozitlerin çeşitliliği kullanım alanlarına göre farklılık göstermektedir. Tungsten takviyeli bakır, tungsten ağır alaşımları ve bakır-niyobyum süper iletken olanlar elektronik alanda ve sanayide kullanımı fazla olan kompozitlerdir (Evans ve Marchi, 2003).

#### **2.2.1.2 Seramik matris kompozitler**

Seramik malzemeler yoğunlukları düşük olması sebebiyle hafiftir. Yüksek yoğunluklu metallere alternatif olarak son yıllarda kullanımını artmıştır. Ergime noktaları yüksek ve rijit

yapısından dolayı şekil verilme yetenekleri zayıftır. Oksidasyona olan yüksek direncinden dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarına elverişlidir (Zhao ve diğ, 2014; Kalemtaş, 2015).

### **2.2.1.3 Polimer matris kompozitler**

Polimer matris kompozitler kendi içinde fiber takviye edilmiş polyester ve epoksi reçine matrisli gibi sınıflara ayrılır. Bu matris türleri daha çok otomotiv, spor aletleri, iç dekorasyon gibi alanlarda kullanılır (Sayman, 2007).

## **2.2.2 Donatı elemanlarının şekil veya yerleştirilme biçimine göre sınıflandırılması**

### **2.2.2.1 Elyaf (fiber) donatı kompozitler (Tek Tabaka Kompozitler)**

Kompozit malzemede matrisin türü, donatı elemanın malzeme içindeki dağılımı, elyafın hacimsel oranı ve kalınlığı elyafın matris içindeki yönelimi fiber takviye elemanın özelliklerini etkiler. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin matris içindeki dağılımı birim şekil değiştirme davranışını etkiler. Elyafın sürekli, süreksiz veya rastgele dağılımı gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinde önemli değişimlere yol açar (Yaşar ve Arslan, 2000; Bayraktar ve Turgut, 2013).

### **2.2.2.2 Parçacık takviyeli kompozitler**

Parçacık takviyeli kompozitler diğer donatı elemanlarına göre daha ekonomik ve izotropik olmakla beraber üretimi de kolaydır. Bundan dolayı kullanımı daha yaygındır. Bunun yanı sıra, haddeleme ve dövme gibi ikincil işlemlere uygun olduğu için birçok alanda kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozit, matris elemanına kıyasla çok daha yüksek rijitlik değeri olduğu için korozyon dayanımı yüksektir. (Mutlu, 2012; Rajravi ve diğ, 2016; Ahlatcı, 2003).

### **2.2.2.3 Tabakalı kompozitler**

Tabakalı kompozit malzemeler, kullanım sıklığı ve uygulama alanları bakımından en geniş yelpazeye sahip bir kompozit türüdür. Isıya ve neme dayanıklı olmasına rağmen metalik yapılara göre darbelere karşı daha hassas bir yapıya sahiptir (Yapıcı, 2012; Chawla, 2012).

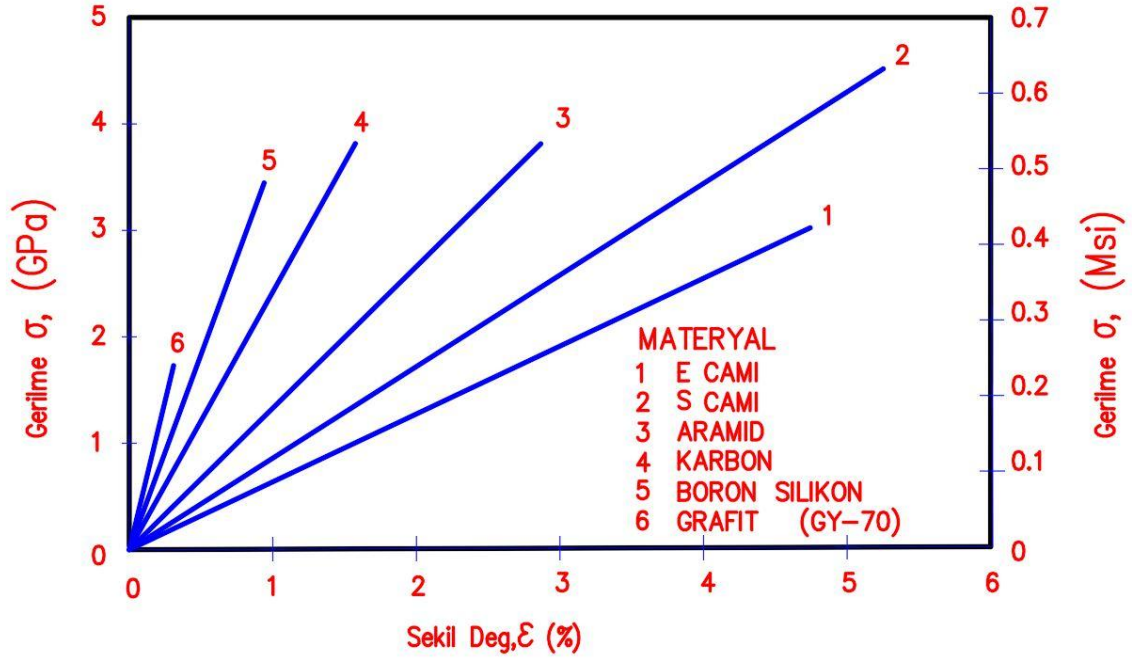
### 2.3 Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Kompozit malzemelerin mekanik değerlerini etkileyen en önemli bileşen donatı malzemeleridir. Kompozit malzemedeki donatı elemanın cinsi, oranı, matris içindeki dağılımı ve yönelimi malzemenin mukavemetini önemli ölçüde etkiler (Bingöl ve Çavdar, 2016). Elyaf donatılı kompozitler diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptir. Başlıca elyaf malzemelerinden olan cam elyafı, karbon (graphite) elyafı, aramid (keklar) elyafı, bor elyafı gibi malzemelerin bazı mekanik özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

**Çizelge 2.1** Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri (Bingöl ve Çavdar 2016)

MALZEMEÖZELLİK	E Camı	S Camı	Bor Elyafı	Karbon Elyafı	Kevlar49 (Aramid)
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,49	2,65	1,85	1,44
Çekme Muk. (MPa)	2000	4750	3450	2900	3750
Çekme Mod. (GPa)	80	89	414	525	136
Lif çapı (µm)	3-200	3-13	100-1000	5-13	12
Isıl G.K (°C-1.10-6)	5	2,9	3	-1	-2
Kopma Uz. (%)	2,75	0	0,7	0,5-1,3	2,5

Kompozit malzemenin ana bileşeni olan matrisler takviye elemanı olan fiberleri çevresel etkilerden çeşitli hasarlardan koruyup, fiberlerin kendi içinde homojen dağılımını sağlayıp fiberleri bir arada tutar. Matrisler fiber donatı malzemesine göre mekanik özellikleri daha düşük olmasına karşın kompozitin ısıl direnç, ısıl genleşme kat sayısı, ara yüzey kayma mukavemeti, yorulma mukavemeti, basınç mukavemetini etkiler (Dönmez, 2011). Kompozit malzemenin bir diğer ana bileşeni olan donatı elemanlarının çekme ve basınç gerilmelerine karşı dirençleri yüksektir. Şekil 2.3’de bazı fiber takviye elemanlarının bazı gerilmeler karşısındaki gerilme-birim şekil değiştirmeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Bazı fiberlerin mekanik davranışı (Sayman, 2007)

## 2.4 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin metalik malzemelere ve diğer malzeme türlerine göre farklı mekanik özellikleri vardır. Bazı malzemelerin özgül ağırlığının düşük olması olumlu katkılar yaparken, üretiminin zorluğu ve maliyet sınırları bu malzemelerin tercihinde önemli etkiye sahiptir.

### 2.4.1 Avantajları

- Kompozit malzemelerin çekme ve eğilme dayanımları birçok metale göre yüksek olduğundan çeşitli alanlarda kullanımında kolaylıkla istenilen bölgelere mukavemet verilebilir.
- Kompozit malzemeler tek parça halinde istifi ve taşınması mümkün olduğu için işçilikten kazanç sağlanır.
- Kompozit malzemeler kullanım yerine göre seçilen uygun malzemelerle yalıtkan ya da iletken malzeme olarak kullanılabilir.
- Kompozit malzemeler korozyon ve kimyasal etkilere karşı yüksek mukavemet gösterdiğinden gemi gibi araçlarda, boru ve aspiratörlerde, kimyasal madde taşıyan tankların üretiminde kullanılmaktadırlar.

- Isıl iletim katsayıları düşük olan kompozit malzemeler bazı özel katkı maddeler ile ısı dayanımı artırılıp yüksek ısı altında kullanılabilirler.
- Kompozit malzemelerin sünekliği, kompozite doğal titreşim sönümlenme ve darbe yutabilme özelliği kazandırır. Böylece malzemede oluşabilecek çatlaklar en aza indirilir. (Eryiğit, 2006).

#### **2.4.2 Dezavantajları**

- Kompozit malzemelerin metallere göre üretim maliyeti yüksektir. Bu maliyet farkı bazen 10-15 katı bulabilmektedir. Üretim yöntemlerinin sınırlı olması bu farkı ortaya çıkarmaktadır. Son zamanlarda üretim maliyetlerinin teknolojinin gelişmesi ile birlikte düşmesi maliyet farkında gittikçe azalma göstermektedir.
- Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilirken birden çok malzeme sabitine ihtiyaç duyulduğu deneysel ve teorik analizleri metal ve diğer malzeme türlerine göre daha karmaşıktır.
- Kompozit malzemelerde oluşabilecek bir hasarın tespiti ve tamiri oldukça zordur.
- Kompozitlerin ısıya, korozyona dirençleri fazla olmasına rağmen, mekanik özelliklerin hepsini aynı anda sağlaması çok zordur. Bu mekanik özelliklerin istenilen kısmı kullanım alanlarına göre uygun malzeme seçimi ile mümkün olur (Eryiğit, 2006).
- Kompozit malzemelerin mukavemet ve göçme toklukları metallere göre düşüktür (Dönmez, 2011).

#### **2.5 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları**

Kompozit malzemeler hafifliği ve yüksek mukavemet değerlerinden dolayı geniş kullanım alanlarına sahiptir. Mekanik özelliklerine ve üretim şekillerine göre uzay sektörü, tıp, savunma sanayi ve havacılık sektörü, elektrik ve elektronik aletler, kimya sanayi ve inşaat malzemeleri gibi birçok alanda geniş kullanım ağına sahiptir. Ulaşım sektöründe her türlü aracın neredeyse kaplama ve temel taşıyıcı kontrüksiyonları kompozit malzemelerle sağlanır (Özer, 2015). Çizelge 2.2'de kompozit malzemelerin kullanıldığı uygulama alanları gösterilmektedir.

**Çizelge 2.2** Kompozit malzemelerin uygulama alanları (Türkmen, 2010)

Endüstri	Uygulama Alanları	Kullanılan Kompozit Malzemeler
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, vantilatör, tirbün kanatları	B/Al, SiCw, Gr/Al, cam, epoksi, C epoksi, süper alaşımlar
Helikopter	Tranmisyon kutusu, giriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , GR//AL, GR/MGİ, SiC/Al
Uzay	Uzay,yapıtları, antenleri, robot kolları	B/AL, B/Mg, Gr/Mg
Otomotiv	Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, aks mili, yaylar, itme çubukları, piston kolları	Kevlar/Epoksi, SiCp/Al, SiCw/Al, B/Al
Gemi	Gemi teknesi, gemi güvertesi	Kevlar/Epoksi, Karbo/Epoksi
Kimya	Borular, basınçlı kaplar, tanklar	Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi
Spor	Oltalar, golf kulüpleri, yüzme havuzları, tenis raketleri bisiklet/motosiklet gövdesi	Gr/Al, B/Al, C/Epoksi, B/Epoksi, SiCw/Al, B/Al, Gr/Al
Elektrik	Motor parçaları, kablo ve akü parçaları	Gr/Cu, Gr/Pb, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pb
Tekstik	Mekikler	B/Al, C/Al, SiC/Al
Uçak-uzay	Uçak frenleri, roket mermileri, tirbun pervaneleri, rokwt çıkış sistemleri	Karbo/Karbon kompozit
Tıp	Röntgen masaları, protezler, tekerlikli sandalyeler	B/Al, SiC/Al

Sandviç kompozitler otomotiv sektöründe dolaylı olarak da kullanılmaktadır. Şekil 2.4’de direkt olarak kullanıldığı gibi dolaylı olarak da kullanılabilir. Yüksek hızda gelen şokları emebilme yeteneği sayesinde çarpma test bariyerlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Aydıncak, 2007).



Şekil 2.4 Kompozit malzemeden üretilen çarpma test bariyerleri (Aydıncak, 2007)

## 2.6 Yapıların Güçlendirilmesi

Yapı elemanları servis ömrünü tamamlayana kadar muhtelif etkilere maruz kalırlar. Bu etkiler, iç ve dış etkiler olarak ayrılması mümkündür. İç etkiler yapının kendi muhtevasında barındırdığı malzeme kusurları olarak söylenebilir. Örneğin, betonarme bir yapı imalatında üretilen betonun çimento dojazındaki eksik, su/çimento oranının yanlış hazırlanması, agrega granülometrisinin yanlış tahkiki ve imalat sırasında eksik veya hatalı işçiliklerin olması gibi etkenler sayılabilir. Dış etkenler ise yapının doğa ile olan etkileşimi sonucunda oluşur. Betonarme çeliğinin suyla ve oksijen ile teması ile gözlemlenen korozyon, betonun çeşitli element veya bileşiklerle yaptığı etkileşimler ve deprem yükleri olarak sıralanabilir. Dış etkilerin başında gelen deprem yükleri ciddi tahkikler gerektirir. Deprem yüklerine dayanıklı yapılar inşa etmek için yapı yönetmeliklerini sağlamak esastır (Erdağı, 2006). Yönetmeliklerde sağlanması istenen kriterlerin amacı yapıyı en az hasarla yani can ve mal kaybını minimize ederek depremi atlattır. Yapıların zamanla gerek deprem yükleri gerekse diğer dış yüklere maruz kalması ile yapı taşıma kapasitesinde azalmalar ve tükenmeler olur. Bu durumda yapının yıkılması veya onarılması gerekir.

### 2.6.1 Güçlendirme kavramı

Betonarme yapıların uygulama öncesinde yapılan statik analizlerin hatalı olması, uygulama ve kullanım süresi boyunca devam eden yanlış ve hatalar yapının taşıyıcı elemanlarının zamanla onarım ve tadilatlarla gidilmesine neden olur. Betonarme yapının taşıyıcı elemanlarında yapılması gereken değişikliklerle yapının iyileştirilmesi yani güçlendirilmesi gerekir. Taşıyıcı elemanlara müdahalenin sınırlı bir hasar için giderilmesi için veya deprem öncesinde taşıma kapasitesi azalmış elemanlara yeniden kapasite kazandırma işlemine onarım denir (Özgen, 1990). Onarım ve güçlendirme işlemleri bir mühendislik bilimi olduğu kadar aynı zamanda bir sanattır. Bu uygulamaları yapan mühendis yapı davranışı hakkında iyi bir bilgi birikimine sahip olmalıdır. Güçlendirme çalışması hazır bir şablon olarak kullanılamaz. Güçlendirme çalışması yapının bulunduğu coğrafi şartlara ve yapının özelliklerine göre şekillenmelidir. Doğru yapılmayan bir çalışma güçlendirmenin eksik kalmasına ve dahi yapının zayıflamasına sebebiyet verebilir (Ersoy, 2007).

Betonarme yapılarda güçlendirme çalışması, yapı faaliyet halinde iken veya taşıyıcı sistemde yapılması gereken değişimler gerektiğinde uygulanabilmektedir. Bu yöntemler uygulanırken beklenen performans kriterleri; taşıma gücü kapasitesine ulaşması ve maliyet-performans oranının uygun olması dikkate alınır ( Köse ve Özgen, 2003).

### 2.6.2 Güçlendirme yöntemleri

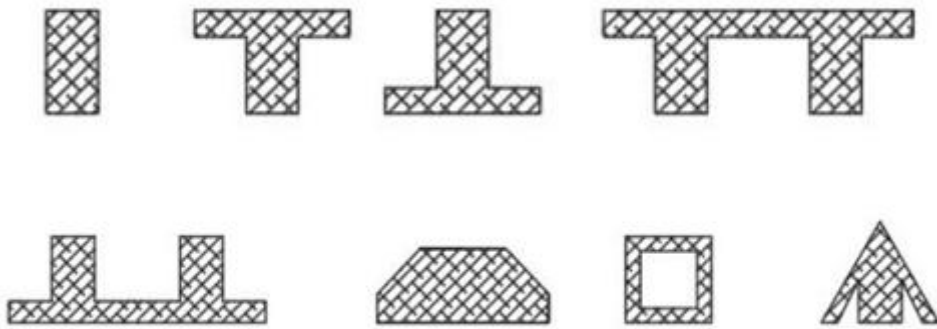
Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesi gelişen teknoloji ile daha da gelişmiş yapı türüne uygun spesifik yöntemler ile uygulanmaktadır. Yapı elemanlarının mantolanması, çelik plakalarla güçlendirilmesi ve çeşitli kompozit malzemelerle güçlendirilmesi gibi çeşitli yöntemler ile yapılması söz konusudur. Yapı elemanlarının kullanım amacına göre yüklerin uygun boyutlandırılması yapılır ve yeniden düzenlenir. Mantolama ile yapı elemanının kullanım yüküne uygun boyutlandırılması yapılmakta ve yeniden düzenlenmektedir. Fakat bu uygulama yapının ağırlığını artırdığı gibi uzun zaman almaktadır. Bir diğer güçlendirme yöntemi olan çelik plakalar ile güçlendirmede karşımıza çıkan zorluk plakalara şekil verilmesinin güç olmasıdır. Bunun yanında çeliğin yangın ve korozyon gibi dış etkilere açık bir hedef olması da bu yöntemin uygulanmasını engelleyen



diğer nedenler arasında sıralanabilir. En çok başvuru yapılan güçlendirme yöntemi kompozit malzemeler ile güçlendirmedir. Kompozit malzemenin mekanik özelliklerine göre seçilen uygun epoksi yapıştırıcılar elemanın kritik noktalarına uygulanmaktadır. Kompozit malzeme yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırmakta ve hafif olması sebebiyle yapıda ek bir ağırlığa neden olmamaktadır. Kompozit malzemeler ile güçlendirmenin önemli dezavantajı ise maliyetin yüksek olmasıdır. Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde fiber takviyeli kompozitler (FRP) ve özellikle karbon takviyeli polimerler (CFRP, **C**arbon **F**iber **R**einforced **P**olymers) sık kullanılmaktadır. Bu kompozitlerin yapı elemanlarının eğilmeye ve kesme kuvvetine karşı güçlendirmede önemli katkıları vardır.

## 2.7 Betonarme Yapı Elemanı Olarak Kirişler

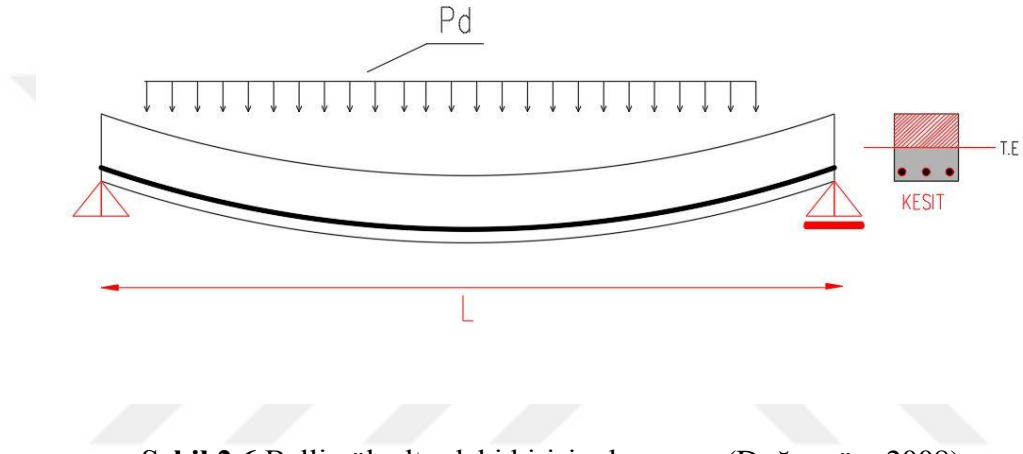
Kirişler, duvar, döşeme, hareketli yük ve kendi ağırlığını taşıyan ve bu yükleri kolona aktaran yatay betonarme elemanıdır. Bir başka deyişle kirişler genelde duvarların altına yapılan, duvar, döşeme ve kendi yükünü taşıyan; çoğunlukla yatay betonarme elemanlardır. Kirişler yataydan gelen deprem ve rüzgar yüklerinin döşeme ile birlikte çalışarak kolona aktarır. Kiriş kesitleri yönetmelik ve mimari talepler doğrultusunda dikdörtgen, tablalı, trapez, kutu ve üçgen gibi farklı şekillerde oluşturulabilir.



**Şekil 2.5** Kiriş kesit türleri (Doğangün, 2008)

## 2.7.1 Betonarme kirişlerin tasarım ilkeleri ve yönetmeliği

Kirişler basit eğilme etkisinde iken tarafsız bölge tanımlaması Şekil 2.6’da görüldüğü gibi basınç bölgesi ve çekme bölgesi olarak karşımıza çıkar. Kirişte başlayan ilk yükleme başta herhangi bir çatlak oluşturmaz iken yükün zamanla artması ile en dış çekme liflerindeki birim uzamalar ve betonun çekme bölgesindeki birim uzama sınır değerlere ulaşacak ve çatlak oluşarak şekil değiştirmeler meydana gelecektir.



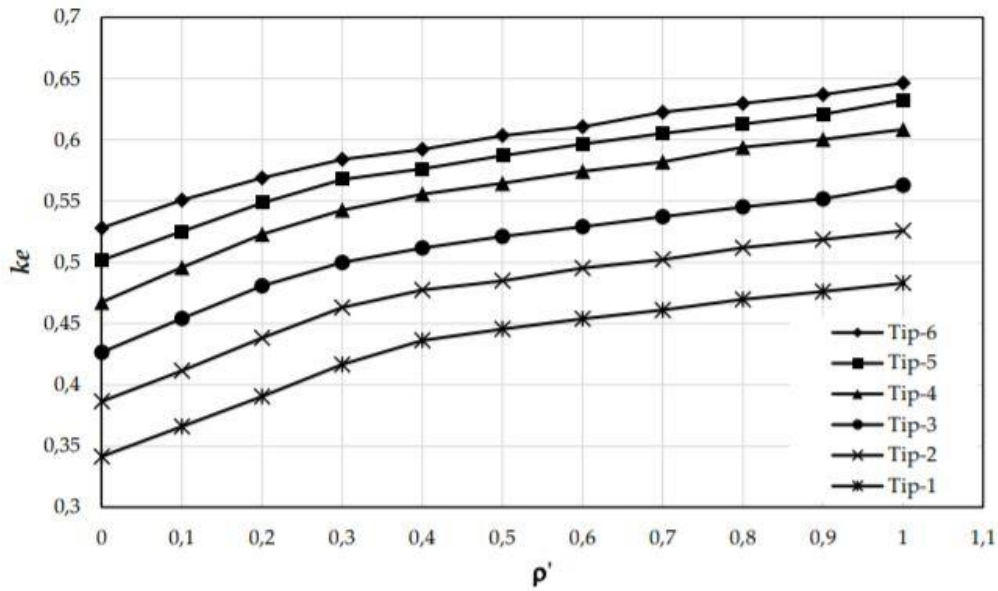
Şekil 2.6 Belli yük altındaki kirişin davranışı (Doğangün, 2008)

Kiriş kesitleri, basınç ve çekme bölgesinde bulunan donatılara göre yapılan hesaplar doğrultusunda tek ve çift donatılı olarak boyutlandırılabilir. Tek donatılı kirişlerde donatı çekme bölgesinde iken, çift donatılı kirişlerde donatı hem çekme hem basınç bölgesinde konumlandırılır. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS500) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) boyuna donatılara getirilen koşullar nedeniyle kiriş boyunca çekme ve basınç bölgelerinin her ikisinde de boyuna donatının sürekli olarak belirli oranlarda bulundurulmasını zorunlu kılar. Basınç kırılması ve dengeli kırılma (gevrek kırılma) istenmeyen bir göçme durumu iken çekme kırılması (sünek kırılma) istenen bir göçme durumudur. Çift donatılı kesitte basınç bölgesine konstrüktif nedenlerle yerleştirilen donatı aynı zamanda boyuna donatıya sarılan etriyeleri tuttuğu için montaj donatısı olarak adlandırılır. Basınç bölgesine yerleştirilen montaj donatısı kirişin davranışında birçok olumlu etkiye sebep olur. Montaj donatısı kesitin taşıma gücü

momentini artırırken zamana bağlı sehimleri azaltır, sünekliği ve kesit rijitliklerini ( $EI_0$ ) ise artırır. Şekil 2.7'deki grafikte kesit rijitliğinin artmasına bağlı olarak kesit eğilme rijitlikleri ( $k_e$ ) o oranda artış gösterir.

Yüksel ve diğ. (2019) yaptıkları bir çalışmada basınç donatısının kesite yaptığı etkileri incelemek için on kirişte deneyler yapmış ve Denklem 1'de görülen formülasyonu elde etmişlerdir. Şekil 2.7'de rijitliğin basınç donatısındaki donatı alanının ( $A_s'$ ) artması ile arttığı görülmüştür.

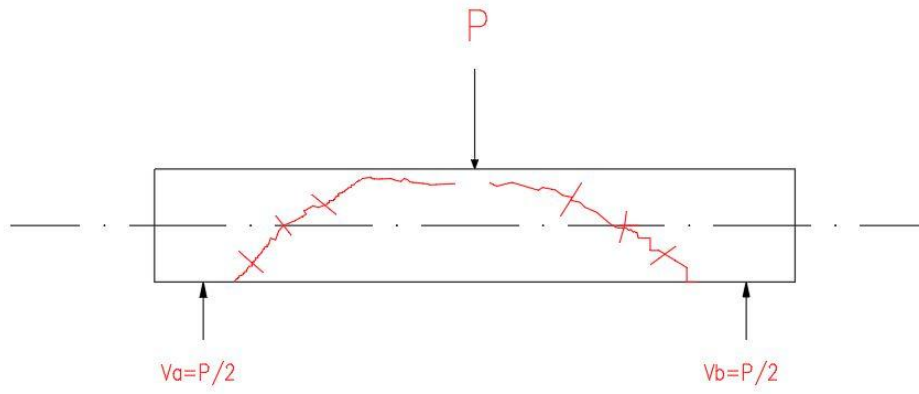
$$k_e = EI_0 / EI \quad (\text{Denklem 1})$$



Şekil 2.7 Basınç donatısının rijitlik katsayısına etkisi (Yüksel ve diğ, 2019)

### 2.7.2 Kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı

Betonarme kirişler yük altında eğilmeye ve kesme kırılmasına uğrarlar. Kesme kırılması eğilme kırılmasına göre gevrek ve ani bir göçmedir. Kesme kırılması eğilme gibi çatlak oluşumlarını önceden haber vermez. Kesme durumunda asal çekmeler asal basınç gerilmelerine eşit olurlar. Asal çekme gerilmeleri kesme gerilmesine  $45^0$ 'lik açı yapan yüzeye etkidiğinden kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde olur. Çatlakların yönü asal çekme gerilmelerinin yönüne bağlıdır (Ersoy ve Özcebe, 2001). Kesme etkisi altındaki kirişte çatlak oluşumu Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.8** Kesme etkisi altındaki kirişte çatlak oluşumu (Doğangün, 2008)

## 2.8. Kiriş güçlendirme çalışmaları

### 2.8.1 Fiber takviyeli kompozit malzemelerle yapılan güçlendirme çalışmaları

Kiriş güçlendirme türlerine ilişkin yapılan çalışmalar literatürde yerini almıştır. Güçlendirmeler gerek sonlu elemanlar yöntemiyle, gerekse deneysel çalışmalar ile birçok şekilde incelenmiştir. Yapılan araştırmalarda kirişin eğilmeye, kesmeye ve hem eğilme hem kesmeye karşı güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Güçlendirme çalışmaları öncelikle bir veya birden fazla hazırlanan referans kirişler ile oluşturulmuş ve daha sonra diğer numunelere fiber takviyeli (FRP) ve diğer kompozitler uygulanmıştır. Jia (2003) yaptığı kiriş güçlendirme çalışmasında karbon fiber takviyeli (CFRP) şeritlerini epoksi ile yapıştırarak uygulama yapmış daha sonra betonarme kirişleri sonlu elemanlar yöntemi ile lineer davranıştan kırılma anındaki nonlineer davranışını deneysel sonuçlar ile mukayese etmiştir. Deneysel numunesi olarak aynı boyutlarda 20 adet kiriş üretilip kiriş üst ve alt kısımlarına FRP kompozitleri uygulanıp dört noktalı yükleme yapılarak şekil değiştirmeleri ölçülmüştür. ANSYS ile modellenen betonda Solid65, CFRP şeritleri için Solid46 elemanları kullanılmıştır. Beton ile donatı arasında tam bir aderans sağlanmış olup modellemenin deneyden daha fazla rijit olduğu sonucuna varılmıştır. Göçme yükü sonlu eleman modelinde % 5 ile % 25 kadar daha fazla çıkmıştır. Bu fazlalığın beton dayanım süresinin göz ardı edilip ölçülen değer yerine malzemenin kendine ait değerlerinin alınmış olması ile açıklanabileceği belirtilmiştir. (Jia, 2003).

Özcan (2015), FRP ile yaptığı kiriş güçlendirme çalışmasında 8 adet betonarme kiriş düzeneği hazırlamıştır. Hazırladığı kiriş gruplarını ikisi kontrol kirişi (Grup A) olarak hazırlayıp diğer 3 kirişi Grup B olarak çekme bölgesine 25 mm kalınlığında epoksi ile FRP uygulamış son 3 kirişi de (Grup C) iki kat FRP malzemesi ile hazırlayıp eğilme testine tabi tutmuştur. 20 ton yük kapasiteli manuel hidrolik krika ile kirişin orta noktasındaki düşey yerdeğişimler, kirişin çekme bölgesindeki çekme şekil değiştirmeleri ve kirişin basınç bölgesindeki şekil değiştirme değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerlere baktıklarında Grup-B kirişlerinde beton basınç şekil değiştirmeleri sınıra ulaşmadan karbon liflerin taşıma kapasitelerinin azaldığı, istenilen şekilde göçme durumu elde edildiği, Grup-C kirişlerinde beton basınç sınırına yaklaşım karbon lifler ile beton eş zamanlı dağılıp dengeli bir kırılma olduğu gözlemlenmiştir. Şekiller incelendiğinde FRP miktarının artmasının donatı akma sınırını artırdığı görülmüştür. Bunun yanında yük miktarı arttıkça kirişlerdeki yük taşıma değerlerinin kontrol kirişlerine göre Grup-C kirişlerinde %10, Grup-B kirişlerinde %36 oranında arttığını gözlemlemişlerdir.

Irshidat vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada karbon-fiber plakaların epoksi ile yapıştırılarak betonarme kirişin güçlendirilmesi için karbon nanotüplerin (CNT) etkileri incelenmiştir. CNT'ler epoksi reçine ve fiber tabakalar yardımıyla hazırlanıp test edilmiştir. Betonarme kirişler on altı adet üretildikten sonra dört noktalı yükleme deneyinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda CNT'lerin kirişlerin taşıdığı maksimum yük kapasitesini ve elemanlarda arttığı gözlemlenmiştir. CNT'nin dağılımının ankrajların uzunluğuna ve sayısına bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Altın ve Anıl (2004) betonarme kirişlerin güçlendirmesi üzerine yaptıkları çalışmada, çelik levhaları kiriş yüzeyine dıştan yapıştırarak uygulamışlardır. Çelik levha ve çelik lamalar ile kirişlerin kesme dayanımlarının arttırılması amaçlanmıştır. Epoksi yapıştırıcı ile kiriş yüzeyine yapıştırılan çelik levhaların kirişin kesme dayanımı, rijitliği, enerji tüketimi, göçme biçimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Hazırlanan numuneler yapıştırma işleminden 15 gün sonra 4 noktalı yükleme ile test edilmiştir. Nihayetinde güçlendirilmiş betonarme kirişlerde kesme dayanımı artmış, süneklik gelişmiş ve kirişler eğilme kırılması ile göçme olmuştur. Dikkate alınan analitik eşitliklerin deney sonuçları ile benzerlik gösterdiği rapor edilmiştir.

## 2.8.2 Bal peteği kompozit malzemelerle yapılan güçlendirme çalışmaları

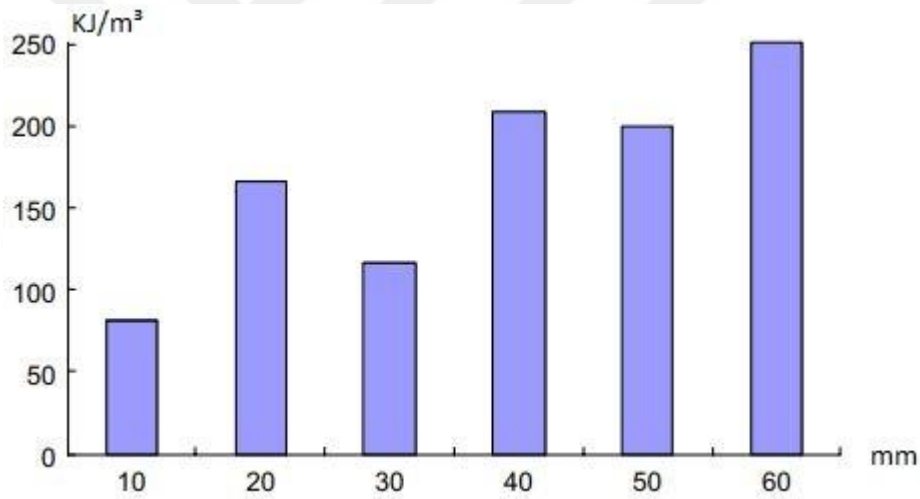
Arslan ve Kaman (2002) tarafından kağıt, bakır, alüminyum ve cam elyaf yapılı takviye elemanı içeren kompozitlerin üretim yöntemleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yaptıkları deneylerde petek yapılı kompozit panellerin enerji yutma kapasitesi, şekil değıştirme değerleri basınç yükleri altında takip edilmiştir. Et kalınlığı arttıkça panellerin maksimum yüke olan dayanımları artmış, et kalınlığı sabit bir kalınlıkta tutulduğunda ise hücre boyutları artış maksimum dayanım değeri arttırdığı gözlenmiştir. Yine et kalınlıkları sabit tutulup alüminyum petek yerine bakır petek yapılı paneller kullanıldığında dayanım artmıştır. Aynı dayanım farkı cam elyaf ile polyester kompozit petekler arasında da gerçekleşmiştir. Cam elyaf ve kağıt şekil değıştirme değerleri kıyaslandığında alüminyum ve bakıra göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Çarpma testlerinde aynı hücre boyutları olan alüminyum panellerde et kalınlığı arttıkça çökmelerin azaldığı tersi durumda da et kalınlığı sabit tutulduğunda hücre boyutları büyüdükçe çökmelerin arttığı görülmüştür. Yine diğer takviye elemanları ile karşılaştırıldığında et kalınlığı ve hücre boyutu sabit olan cam elyaf ve kağıt bakır ve alüminyum panellere göre çökme değerleri daha yüksek çıkmıştır.

Şakar vd. (2010) tarafından bal peteği kompozitlerin dinamik analizleri tahkik edilmiştir. Panellerin serbest titreşim analizi ANSYS programı yardımıyla panelin alt ve üst levhalarının özellikleri, çekirdek malzemenin yüksekliğinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen numerik analizler sonucunda fiberlerin uzanım yönleri ve çekirdek yüksekliği doğal frekans üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Levha kalınlığındaki değışmelerinde sonuçları etkilediği görülmüştür.

Solmaz vd. (2010) tarafından yapılan deneysel çalışmada bal peteği kompozitlerin eğilme altındaki davranışları incelenmiştir. Bal peteği panellerin üst yüzey kısmına polyester/cam fiber ile kaplanıp peteğin çekirdek kısmında hücre boyutlarındaki değışmeler ile parametre oluşturulup hücre yükseklikleri 5, 15, 25 mm olan paneller tercih edilmiştir. Hacimsel büyüklükleri aynı bırakılan numuneler üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda hücre yoğunluğu artışı ile birlikte kayma rijitliklerinde artma saptanmıştır. Fakat hücre boyutunun artırılması maksimum yük değerinin azalmasına sebep olmuştur. Kağıt hücreli levhaların eğilme dayanımları

alüminyum hücrelere göre daha yüksek olmakla birlikte bu hasarlara ilave olarak çatlaklar ve hücre ayrılması gözlemlenmiştir.

Wang (2009) kağıt bal peteği panellerin yük dayanımına etkisini araştırdığı çalışmada, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi kağıt kalınlıkları birbirinden farklı bal peteği panellerin farklı sıkıştırma dirençlerine ve enerji absorbe etme miktarlarına sahip olduğunu aktarmışlardır. 10 mm kalınlığındaki bal peteği panelin 4–5 MPa statik gerilimi taşıyabilirken 60 mm kalınlığındaki panellerin 10 MPa'dan fazla dayanım gösterdiği görülmüştür. Ayrıca panelin kalınlığındaki artışın yük aktarım hızında da artmaya neden olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, kağıt bal peteği hücre duvarı kalınlığındaki artışın bal peteği çekirdek kalınlığında ve astar malzemesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 2.9 Bal peteği panelin kalınlığına bağlı enerji absorbe etme miktarı (Wang, 2009)

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Materyaller

##### 3.1.1 Kalıp

Deneyde kullanılmak üzere üretilen 10 adet kiriş için yandan açmalı çelik kalıplar kullanılmıştır. Beton dökümü sonrasında kalıpların bir yüzü açılıp numuneler çıkarıldı.

##### 3.1.2 Beton

Betonarme kirişleri üretmek için yeterli miktarda beton temin edilmiştir. Kiriş imalatı için hazırlanan betonun basınç dayanımı 150x150x150 mm küp numuneleri kullanılarak incelenmiştir. Üç numunenin 28 günlük ortalama test sonuçları 23,2 MPa olarak tespit edilmiştir. Taze beton üzerinde slump deneyi yapılmıştır. Çökme hunisi üç eşit aşamada dolduruldu, her kademedede standart bir şiş çubuğu ile şişlenmiştir. Elde edilen çökme değeri yaklaşık olarak 9 cm ölçülmüştür. Betonarme kiriş üretimi için kullanılan betonun taze beton özelliklerinin tespiti için yapılan deneyler Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



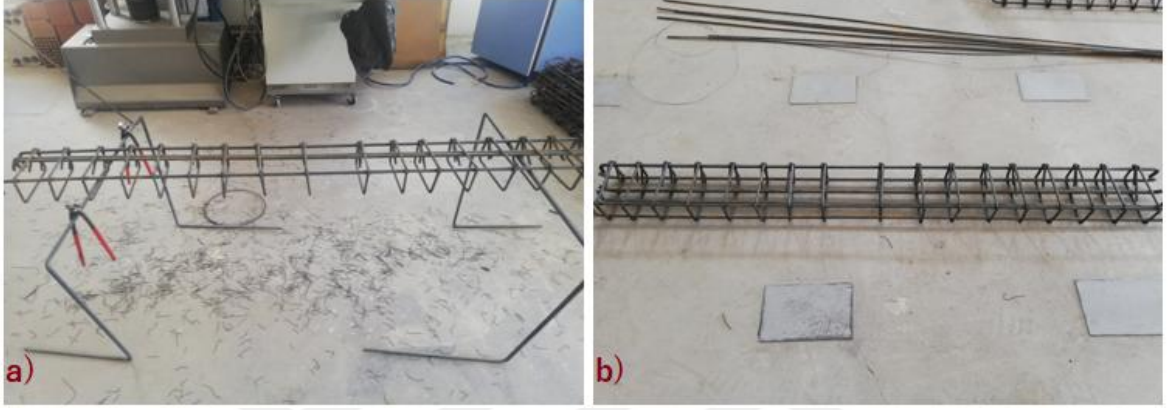
Şekil 3. 1 Tze beton özellikleri; a) Küp kalıplara doldurulma işlemi, b) Slump deneyi

##### 3.1.3 Çelik Donatı

Betonarme kiriş numunesini hazırlamak için bağlantı ve ana donatı olarak iki tip çelik donatı çubuğu kullanılmıştır. 516 MPa ve 510 MPa nihai mukavemete sahip 10 mm ve 12 mm çapına sahip üst ve alt çelik donatılar, boyuna takviye olarak kullanılmıştır. Kiriş



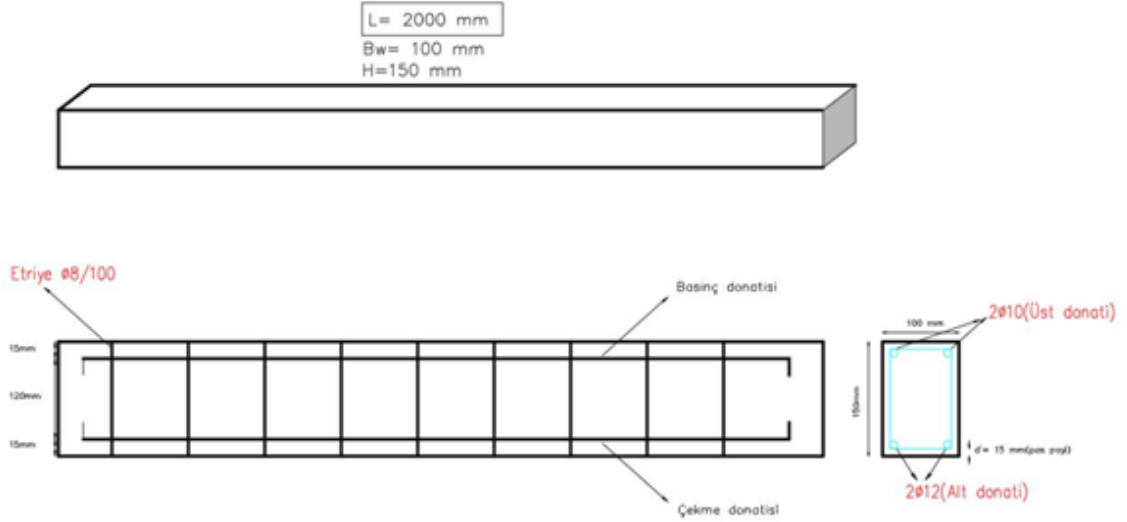
elemanında basınç bölgesinde  $2\Phi 10$  ( $A_s: 1,57 \text{ cm}^2$ ), çekme donatısı olarak  $2\Phi 12$  ( $A_s: 2,26 \text{ cm}^2$ ) nervürlü demir kullanılmıştır. Akma dayanımı 410 MPa olan çapı 8 mm olan çelik donatılar da etriye olarak kullanılmıştır. Çelik donatıların Young modülüne göre elastisite modülü (E) 200 GPa'dır. Betonarme kirişlerde kullanılan çelik çubuklar Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Betonarme kirişte kullanılan çelik çubuklar

### 3.2 Deney Numunelerinin İmalatı

Betonarme kirişler, 100 mm genişliğinde, 150 mm yüksekliğinde ve 2000 mm uzunluğunda dikdörtgen kesitlidir. Çelik donatılar iki adet çapı 10 mm basınç bölgesinde ve iki tane çapı 12 mm çekme bölgesinde olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.3). Ayrıca enine çelik çubuklar betonarme kiriş numunelerinin iki kesme açıklığı boyunca 100 mm'lik bir mesafede 8 mm çapında etriye demirleri oluşturuldu. Kirişin ayrıntılı donatı detayları Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Deney kirişinin donatı detayları

### 3.3 Güçlendirme Malzemeleri

#### 3.3.1 Yapıştırıcı

Beton alt tabaka ile betonarme kiriş numunelerinin takviye çeliği etriyeleri arasında yapıştırıcı kompozit malzeme olarak Teknobond 300 TIX yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu yapıştırıcı iki bileşenli olup, solventsiz, tiksotropik özellikli, epoksi esaslı doyum reçinesi ve yapıştırıcısı olarak tanımlanır. Teknobond 300 TIX yapıştırıcılar, elyafların kuru yüzeylerine, ıslak uygulama sistemi için astar olarak ve düzgün yüzeylerde teknobar plakaların yapıştırılmasında kullanılır. Uygulaması belli bir karıştırma süresinden sonra mala ve doyum rulosu ile yapılmadan önce betonarme kiriş yüzeyi her türlü toz, kir, zayıf, oynak parçacıklardan, çimento şerbeti kalıntılarında, yağ ve gresten iyice arındırılıp, yüzey kurutulur. Yapışkan bileşenler, homojen bir gri renk elde etmek için yaklaşık 3:1 oranında hazırlanmış ve homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırıldıktan sonra spatula veya rulo ile kiriş yüzeyine sürülmüştür. Hazırlanan karışımın tam mukavemete ulaşma süresi ve diğer fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Teknobond yapıştırıcının fiziksel özellikleri

Renk (A+B)	Gri
Yoğunluk sıvı (kg./lt.)	A: 1,30 - B: 1,03
Alevlenme Noktası	180 °C
Karışım Oranı	3/1
Pot Life	45 dakika (+20 °C)
Tam Mukavemete Ulaşma Süresi	7 gün

Üretici tarafından sağlanan epoksi yapıştırıcının çekme, eğilme, aderans mukavemeti ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 3.2’de sırasıyla 30 MPa, 40 MPa, 4 MPa ve 80 MPa’dır.

**Çizelge 3.2** Teknobond yapıştırıcının mekanik özellikleri

Adı	Tipi	Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Aderans Mukavemeti (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
Teknobond	300 TIX	30	40	4	80

### 3.3.2 FRP malzemesi

Fiber donatılı polimer kompozitler lif takviyeli bir kompozit malzeme olup, yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptir. Cam elyaf ve aramid takviye elemanına göre çok daha yüksek çekme dayanımı ve yorulma yeteneği olması sebebiyle çelik ve betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılır.

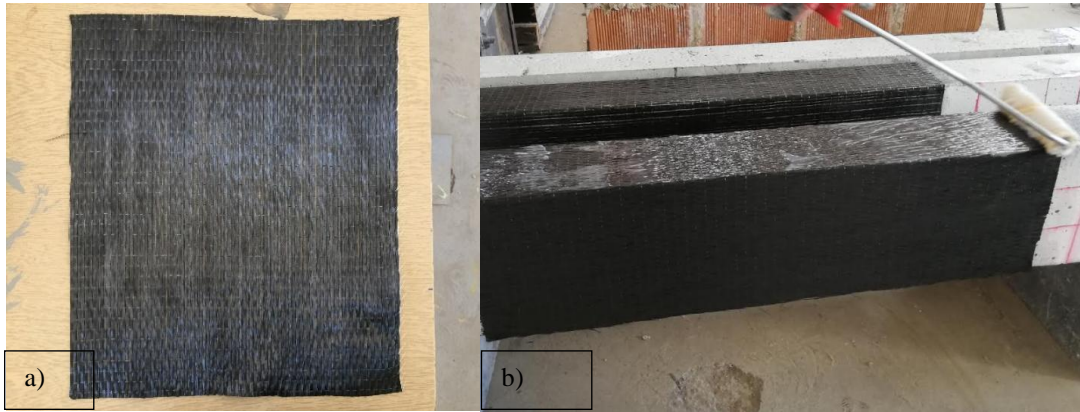
#### 3.3.2.1 FRP’lerin mekanik özellikleri

FRP malzemeleri farklı yollarla elde edilebilir. Bu malzeme türlerinden biri olan karbon takviyeli fiber kompozitlerin (CFRP) % 90’ında bulunan karbon birkaç farklı yerden temin edilir. Bu malzeme türlerinden biri olan rayon adlı malzeme suni ipektir

ancak üretim maliyeti yüksek olması nedeniyle tercih edilmez. Bir diğer karbon kaynağı ise petrolden elde edilen zift düşük maliyetine rağmen zayıf mekanik özellikleri nedeniyle tercih edilmez. Üçüncü elde etme yöntemi olan PAN (Poli Akriil Nitril) adlı malzemeden karbon fiber elde etmek için üç aşamalı bir işleme tabi tutulur. Önce karbon malzeme yüksek ısı sıcaklığında rengi beyazdan siyaha döner daha sonra malzemeden karbon harici olan diğer elementler 1000-3000 °C arası ısıtılarak karbon saflaştırılır. Son safhada fiberlerin yüzeyi reçine ile kaplanıp polimerle teması engellenmiş olacaktır.

### 3.3.2.2 Deneyde kullanılan fiber takviyeli polimer

Bu deneyde kullanılan CFRP yüksek mukavemeti ve sertliği nedeniyle tercih edilmiştir. Fiber kompozitler, mükemmel direnç ve yapışma özellikleriyle eşsiz bir performans sergiler. Deneyde CFRP boyut değerleri; 0,70 mm kalınlık, 500 mm genişlik ve 2500 mm uzunluğa sahip olan çekmeli sıkışmış laminatlar betonarme kiriş numunelerinin onarımı ve iyileştirilmesi için kullanıldı. Üretici tarafından mekanik özellikleri temin edilen CFRP'nin ortalama gerilme mukavemeti 4137 MPa, elastisite modülü 242 GPa ve CFRP uzama değeri % 1.5'tir (Çelik, 2001). Çalışmada kullanılan CFRP kumaşı Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



a) CFRP kumaşı

b) Güçlendirme uygulaması

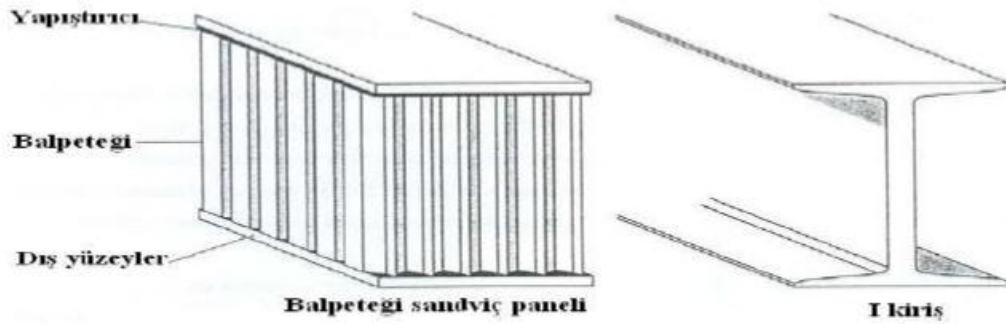
**Şekil 3.4** Çalışmada kullanılan CFRP kumaşı ve uygulaması

### 3.3.3 Bal peteği sandviç panel

Bal peteği sandviç panellerin çekirdeği doğada bulunan arı bal peteklerine benzetildiği için bu şekilde isimlendirilmiştir. İlk bal peteği yapısı Çinliler tarafından kağıttan süs eşyalar yapmak için üretilip daha sonra hazırlanan ilk patent çalışması Almanya'da üretilip hazırlanan Budwig Patenti'dir. 20. Yüzyılın başlarında uçak üretiminde ve mobilyacılıkta kullanılmaya başlanılan bal peteği paneller 1945 yılında ilk kez alüminyum olarak üretimi ile yaygın kullanım alanı başlamıştır (Bitzer, 1997).

#### 3.3.3.1 Bal peteği sandviç panelin mekanik özellikleri

Bal peteği sandviç panellerin endüstri alanında yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi üç kademeli bir yapıdan oluşan bu petek yapıları bazı işlemler ile meydana gelmektedir (Arslan ve Kaman, 2002). Bekem vd. tarafından 2011'deki çalışmada bal peteği sandviç panelin yapısını I kirişlerine benzetilerek üretildiğini belirtmişlerdir.



Şekil 3.5 Bal peteği sandviç panel detayı (Bekem vd, 2011)

I kirişinin gövdesi kesme kuvvetlerine karşı koyması petek sandviçlerde de görülmüştür. Petekte bulunan hücreler panelin yüzeyine destek vermektedir. Petek yüzey arası uygulanan yapıştırıcılar elemanları birbirine bağlayarak birlikte hareket etmesine olanak sağlamaktadır. Bu da panelin burkulma ve eğilme dayanımına olumlu etkimektedir (Bekem vd, 2011).

### 3.3.3.2 Deneyde kullanılan bal peteği sandviç panel

Takviye malzemesi olarak alüminyum çekirdek ve cam takviyeli polyester (CTP) ile yüzeyi kaplanan petek sandviç paneller bu çalışmada kullanılmıştır. CFRP ile mesnet ve orta bölgelerine uygulanan betonarme kirişe 6 mm, 10 mm ve 15 mm çekirdek yüksekliğine sahip üç farklı cam takviyeli panel (CTP) kaplı bal peteği sandviç panel kullanılmıştır. Dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin alt yüzeyine uygulanan bal peteği kompozit panellerin boyutları ve genel görünüşleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Deneyde kullanılan bal peteğinin boyutları;

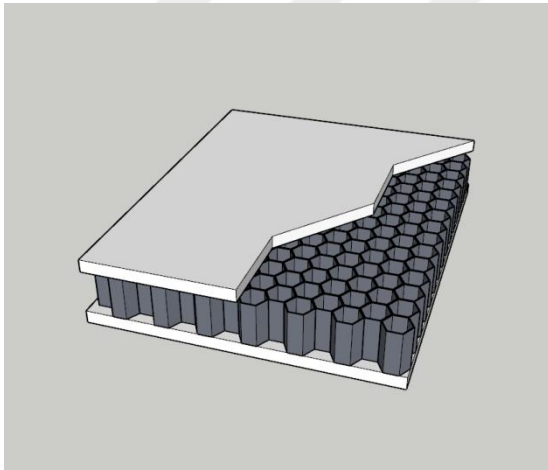
$t_1$  (Üst levha): 1 mm

$t_2$  (Alt levha): 1 mm

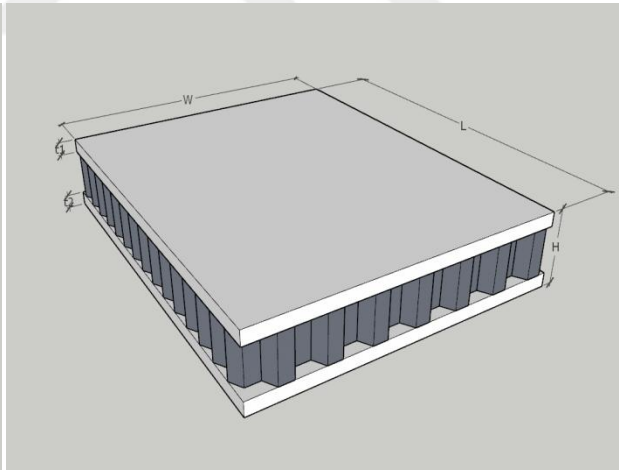
H (Yükseklik): 6 mm, 10 mm, 15 mm (değişken)

W (Genişlik): 100 mm

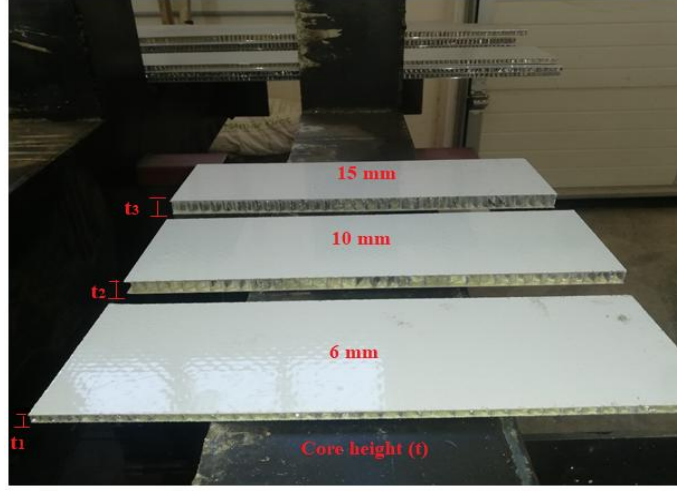
l (Uzunluk): 1800 mm'dir



a) Kompozit panelin genel görünüşü



b) Balpeteği kompozit panel ölçüler



c) Üç farklı kalınlıkta CTP kaplı bal petek sandviç paneli

**Şekil 3.6** Alüminyum balpeteği sandviç paneller (AHSP)

Alüminyum petek sandviç paneller (AHSP'ler), yüksek mukavemet ve süneklikten kaynaklanan enerjiyi emdikleri için takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca plakalar arasında bal peteği yapısının bulunmasının yapının atalet momentini ve eğilme mukavemetini artıracığı tahmin edilmektedir. Bal peteği sandviç panellerin (AHSPler) özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3** Bal peteği sandviç panellerin özellikleri

Panel tipi	Yükseklik	Genişlik	Uzunluk	CTP	Kalınlık
Panel 1	6	100	1800	1	1
Panel 2	10	100	1800	1	1
Panel 3	15	100	1800	1	1

(ölçüler mm değerinde)



### 3.4 Güçlendirme Prosedürü

Laboratuvar ortamında üretilen betonarme kirişlerin üretimi sonrasında güçlendirme çalışmalarında son yılların önde gelen malzemelerinden biri olan bal peteği kompozit paneller kullanılmıştır. Kirişlerin eğilme kuvvetine karşı güçlendirilmesi için yüzey kaplaması ve çekirdek malzemesi olarak alüminyum tercih edilmiştir. Kontrol betonarme kirişi ve dokuz farklı konfigürasyonda güçlendirilmiş betonarme kirişleri test elemanları olarak bu deneyde kullanıldı. Betonarme kirişlerin dokuzunda takviye malzemesi olarak 6 mm, 10 mm ve 15 mm kalınlığında petek kompozit paneller kullanılmıştır (Şekil 3.7). Ek olarak, güçlendirici CFRP malzemesi, Şekil 3.7b ve 3.7c'deki farklı enine kesit konfigürasyonunda (mesnet ve orta bölümler) U sarılı şekle sahip betonarme kiriş numunelerinin yüzeyine bal peteği panellerin yapıştırılması öncesinde uygulanmıştır.







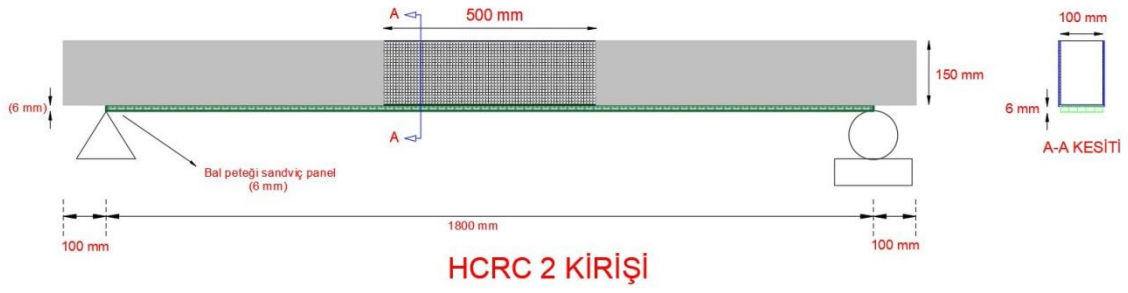
**Şekil 3.7** Kirişlerin güçlendirme aşamaları

Güçlendirici malzeme (AHSP'ler), mesnet noktaları arasında olacak şekilde kirişlerin tabanına harici olarak bağlanmış ve bal peteği kompozit panellerin uygulanmasından hemen önce CFRP U şeklindeki sargılar uygulanmıştır.

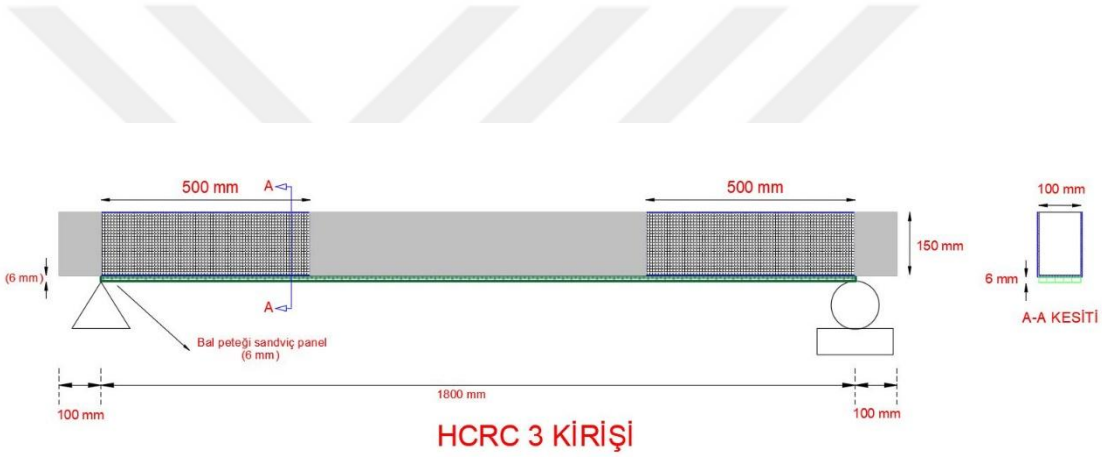
On adet betonarme kirişinden dokuzunda FRP'ler U şeklindeki sargılar ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş dokuz betonarme kiriş elemanından üç betonarme kiriş numunesi 6 mm kalınlığında petek kompozit panellerle güçlendirilmiş, diğer üç kiriş numunesi 10 mm kalınlığında petek kompozit panellerle güçlendirilmiş ve kalan üç betonarme kiriş numunesi de 15 mm kalınlığında bal peteği kompozit panel ile güçlendirilmiştir. Şekil 3.8'de CFRP yerleşimi hazırlanan malzemeler dokuz adet kiriş numunesi olup farklı kalınlık ve bölgelerde uygulanmıştır.



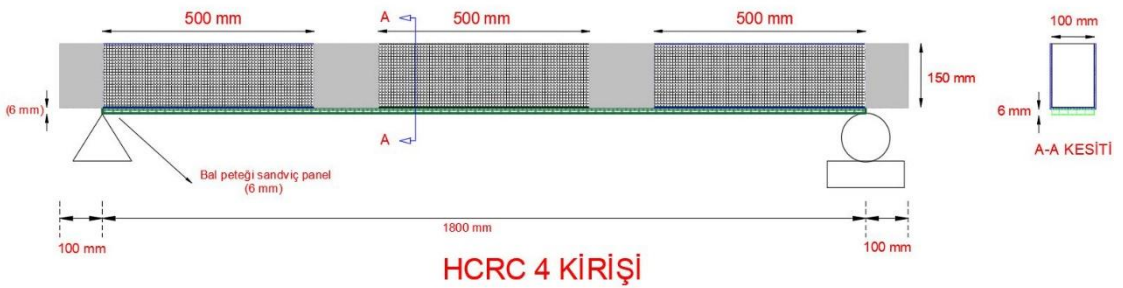
HCRC 1: Referans betonarme kiriş



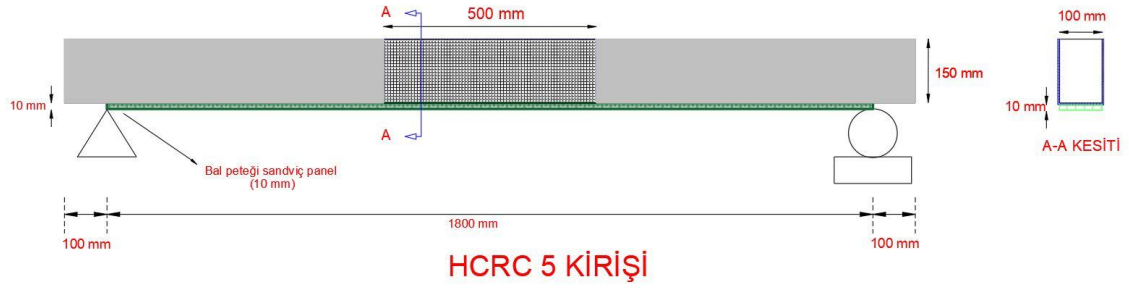
HCRC 2: Orta bölgeye yerleştirilen CFRP ve 6 mm kalınlıklı AHSP



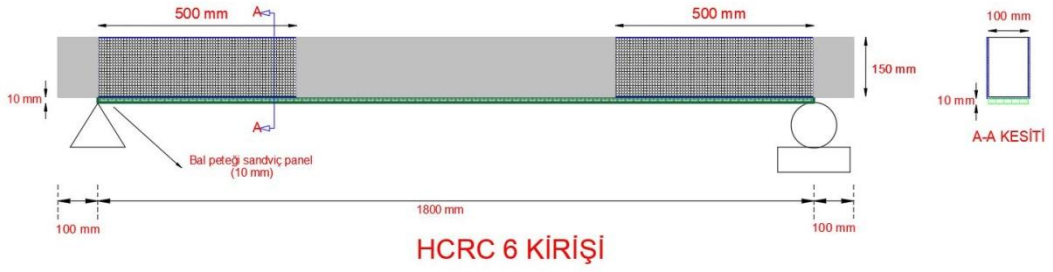
HCRC 3: Mesnet bölgelerine yerleştirilen CFRP ve 6 mm kalınlıklı AHSP



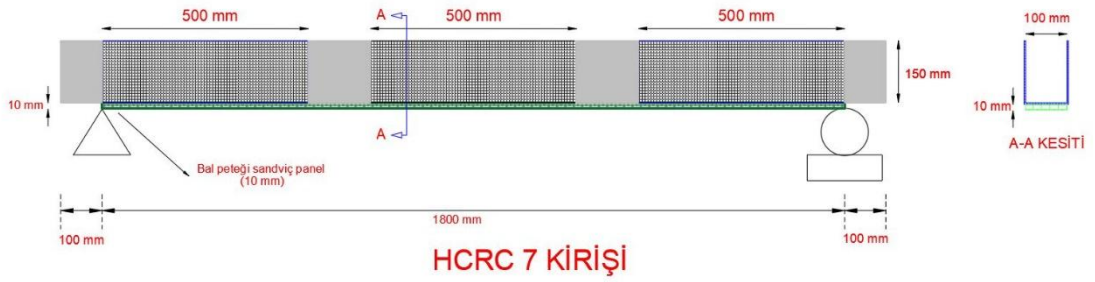
HCRC 4: Hem orta hem mesnet bölgelerine yerleştirilen CFRP ve 6 mm kalınlıklı AHSP



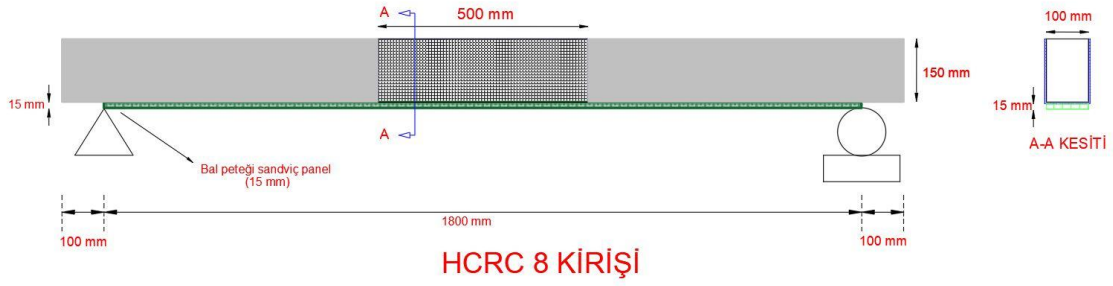
HCRC 5: Orta bölgeye yerleştirilen CFRP ve 10 mm kalınlıklı AHSP



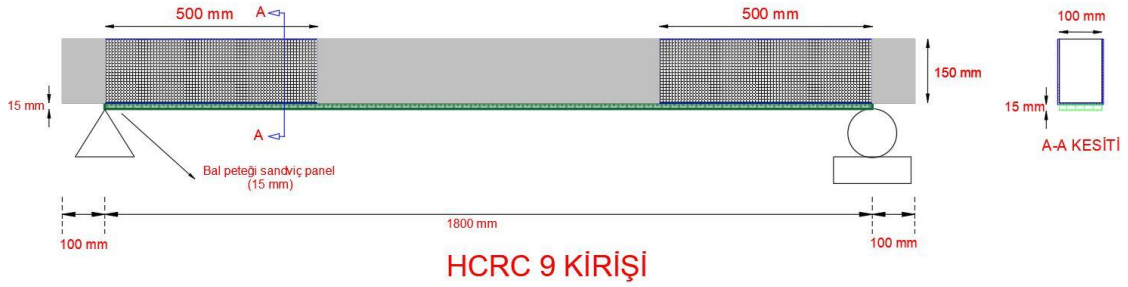
HCRC 6: Mesnet bölgelerine yerleştirilen CFRP ve 10 mm kalınlıklı AHSP



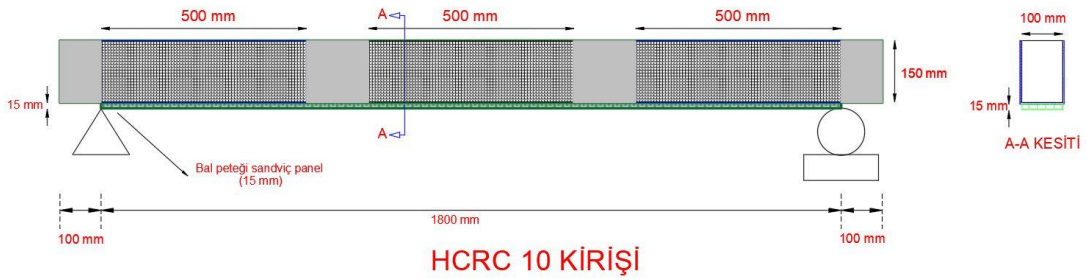
HCRC 7: Hem orta hem mesnet bölgelerine yerleştirilen CFRP ve 10 mm kalınlıklı AHSP



HCRC 8: Orta bölgeye yerleştirilen CFRP ve 15 mm kalınlıklı AHSP



HCRC 9: Mesnet bölgelerine yerleştirilen CFRP ve 15 mm kalınlıklı AHSP

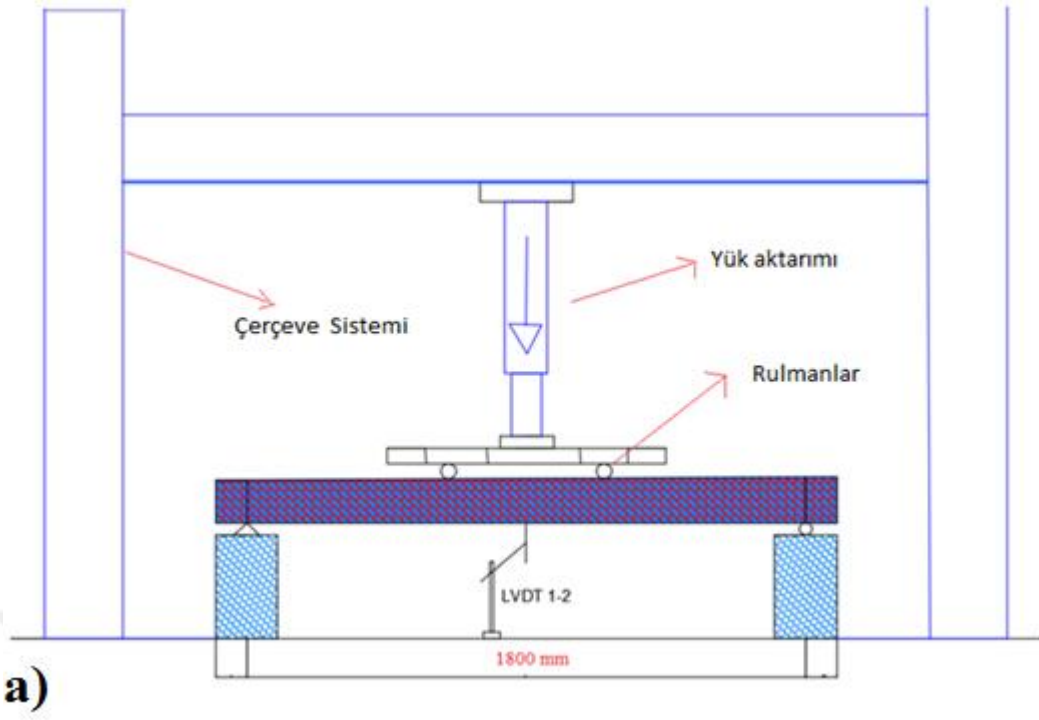


HCRC 10: Hem orta hem mesnet bölgelerine yerleştirilen CFRP ve 15 mm kalınlıklı AHSP

Şekil 3.8 AHSP ve CFRP'lerin güçlendirmede yerleşim planları ve numune kodları

### 3.5 Testlerin Kurulumu ve Prosedürü

Tüm betonarme kiriş numuneleri, Şekil 3.9a ve 9b'de gösterildiği gibi eğilme testine tabi tutulmuştur. Net açıklık 1800 mm olan ve farklı konfigürasyon olarak 500 mm uzunluğunda kesme açıklığı ve 500 mm uzunluğunda sabit moment bölgesi ile oluşturulup CFRP'ler betonarme kirişe sarılmıştır. Tek eksenli 60 ton kapasiteli yükleme ile rijit bir reaksiyon çerçevesi üzerine düşey olarak sabitlenmiş bir servo kontrollü hidrolik aktüatör (60 ton kapasite) kullanılarak uygulanmıştır (Şekil 3.9a). Yük, 1 mm / dak'lık bir hızda eğilme testi altında monotonik olarak uygulanmıştır. Dikey yönlerde orta açıklık yer değiştirmesini serbestçe ölçmek için betonarme kiriş numunesinin orta açıklığına iki doğrusal değişken diferansiyel dönüştürücü (LVDT) sabitlenmiştir. AHSP plakaları ve CFRP şeritleri ile güçlendirilmiş tüm kirişler için dikey yükler, yük hücresi kullanılarak data logger anlık ölçüm ile veriler excele aktarılarak kaydedildi ve yer değiştirmelerle toplanan veriler kullanılarak belirlenmiştir. Yük, her bir kirişin göçmesine kadar kademeli olarak uygulanmıştır. Her yük artışında, çatlakların yayılması gözlemlenmiş ve işaretlenmiştir.



Şekil 3.9 a) Ön görünüş (çerçeve sistemi), b) Test prosedürü (dört noktalı eğilme testi)

## 4-ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1 Yük- Yer değiştirme Eğrileri

şekil 4.1’de farklı AHSP kalınlıklarına (6, 10 ve 15 mm) ve CFRP kesit konfigürasyonlarına (mesnet ve orta açıklık) sahip kirişlerin yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Güçlendirilmemiş (referans) betonarme kiriş ile farklı konfigürasyonlarda güçlendirilmiş betonarme kiriş numunelerinin eğilme davranışı altında davranışları belirlenmiştir. Betonarme kirişlerin AHSP ve CFRP kompozit elemanlarla güçlendirilmesinin, kontrol numunesine kıyasla nihai yük değerlerinde daha yüksek dayanım ve yer değiştirmeler elde edilmiştir. Bu kompozitlerin betonarme eleman yüzeylerine daha hızlı ve kolay uygulanmasından dolayı tercih edilmiştir. Yapılan birçok çalışmada, bal peteğine sahip bu kompozitlerin yük altında malzemenin yapısında ve geometrisinde neredeyse hiç değişme olmadan yapısal davranış sergilediği belirtilmiştir (Barros ve Dias, 2006; Zaki ve diğ, 2019).

Ayrıca, donatı takviyeli kompozit malzemelerin yapı güçlendirmelerinde uygulanmasıyla birlikte bu malzemelerin büyük oranda enerji absorbe etmeleriyle birçok güçlendirme çalışmalarında uygulanabileceği belirtilmiştir (Kim ve diğ, 2015). İsmail ve Ong, (2012) yaptıkları çalışmada bu kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının oldukça yüksek olması ve kısa zaman aralıklarında çözümlenmesi gereken problemlerde daha pratik ve hızlı imkanlar sağlandığı için, bu kompozit malzemelerin tercih edildiğini ifade etmişlerdir.

Yapılan güçlendirme çalışmalarıyla, ilk olarak 6 mm kalınlığında bal peteği sandviç paneller ve farklı bölgelerde CFRP’lerle sarılmış HCRC-2, HCRC-3 ve HCRC-4 kiriş numunelerin eğilme yükü altında yapısal davranışları incelenmiştir. Güçlendirilmiş bu betonarme kirişler referans kiriş numunesine göre nihai yük değerlerinde sırasıyla % 34.3, % 32.1 ve % 40.5 artış elde edilmiştir.

Bal peteği sandviç panellerlerin mekanik özellikleri tam olarak belirlenemediği için uzun süreli kullanımda karşılaşılacak sorunlar net olmamakla birlikte, malzemede yorulma hasarı oluşabilmektedir. Chevalier, (1994) yaptığı deneyde alüminyum peteklerin yangın ve yorulma testlerinde daha sünek davranış sergilediği gözlemlenmiştir.



Ek olarak, FRP kompozitlerde delaminasyon, lif yırtılmaları ve çekilmeleri, matris çatlaması gibi sorunlar oluşabilmektedir. I profili vazifesi gören bu kompozitlerin gövde kısmı eğilme yükü altında yüksek dayanımlar elde edileceği de belirtilmiştir (Bezazi, 2007). CFRP kompozitlerin kiriş nununelerine uygulanmasıyla hem yük taşıma kapasitelerinde hem de yüzeylerde hasar oluşmasını engellerken (Toradmal ve diğ, 2017), bal peteği panellerin gövde kısmında bulunan hafif ara katmanlardan oluşan çekirdek malzemesinin dıştan kaynaklanan yük etkisinde oluşan kayma gerilmesinin taşınmasında olumlu etki gösterdiği belirtilmiştir (Belingardi, 2007).

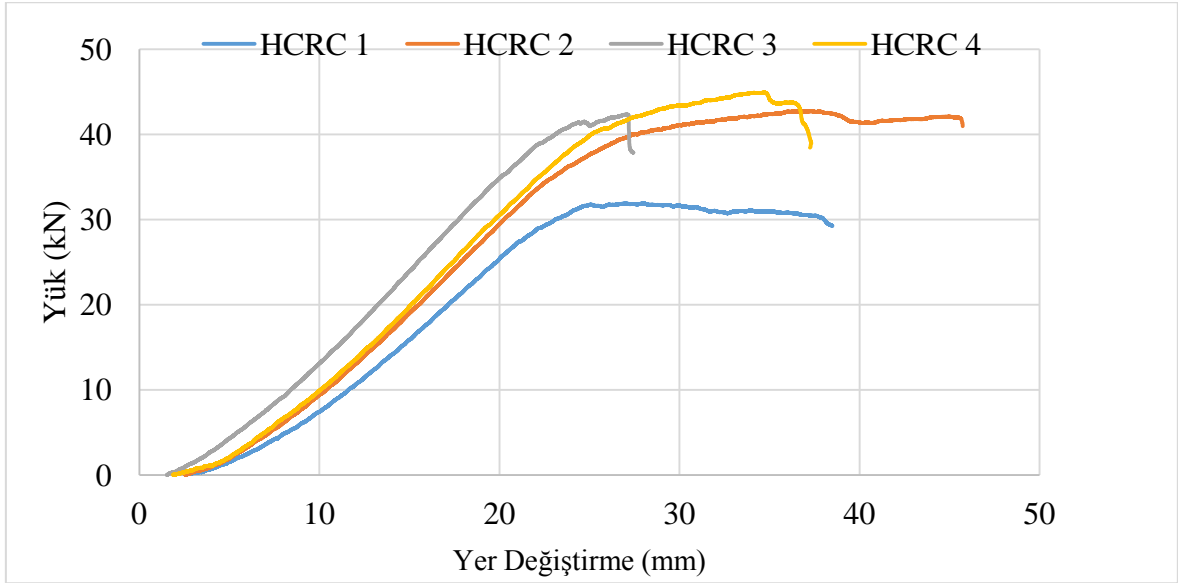
Ek olarak, CFRP U-sargılarının veya U-kılıflarının kesme çatlaklarındaki iyileşme nedeniyle, mesnet bölgelerinde betonarme kiriş numunelerinin yük kapasitelerinin artmasına daha fazla katkıda bulunduğu yapılan deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir. Ayrıca alüminyum bal peteği panelleri de önce cam takviyeli polimer yüzey tabakadan başlamak üzere çekme ve basınçlara maruz kalıp, daha sonra çekirdek hücrelerine doğru kaymalar meydana gelmiştir (Wahl ve diğ,2012).

10 mm kalınlığında bal peteği sandviç paneller ve lifli kompozit malzemelerin orta noktasına ve mesnet noktalarına uygulanmasıyla HCRC-5, HCRC-6 ve HCRC-7 betonarme kirişleri için referans kiriş numunesine göre nihai yük değerlerinde değerlerinde sırasıyla % 45.6, % 32.3 ve % 50 oranlarında artış elde edilmiştir. Bal peteği sandviç panellerin gecikmiş diyagonal çatlakları önlediği ve dolayısıyla yük kapasitelerinin artmasına yardımcı olduğu ve bunun bal peteği sandviç panellerin kalınlığı ile orantılı olduğu belirtilmiştir (Wang, 2009). 15 mm kalınlığında bal peteği sandviç panellerle güçlendirilmiş (HCRC-8, HCRC-9 ve HCRC-10) numaralı betonarme kiriş numunelerinde kaydedilen maksimum yük sırasıyla 42.1, 47.3 ve 40.2 kN olarak ölçülmüş ve referans numunelere göre ise nihai yükte ise sırasıyla % 31.2,% 46.7 ve % 25.5 oranlarında artış elde edilmiştir.

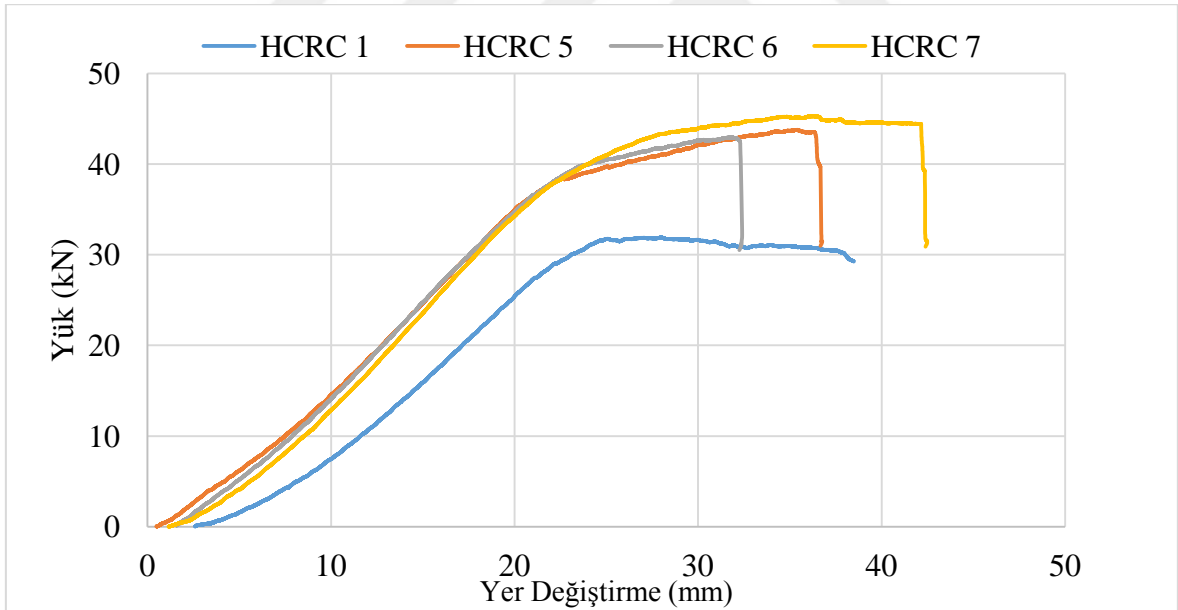
Pek çok araştırmacı, bal peteği sandviç kompozit panellerin hücre yoğunluğu arttıkça, kayma ve eğilme dayanımlarında da artış olduğu belirtilmiştir (Sun ve diğ, 2018). Ayrıca yapılan deneysel çalışmalarda, grafiğin doğrusal kısmındaki eğimin artmasının ana nedeninin, bu kompozitlerde çekirdek kalınlığının artmasıyla birlikte, mekanik özelliklerinin artması olarak belirtilmiştir (Arbaoui ve diğ, 2014). Eğilme yükü altında elde edilen deneysel sonuçlar, çekirdek kalınlığının mekanik özelliklere olumlu etkiler sağladığını göstermiştir. Sonuç olarak, AHSP'ler ve CFRP ile güçlendirilmiş betonarme



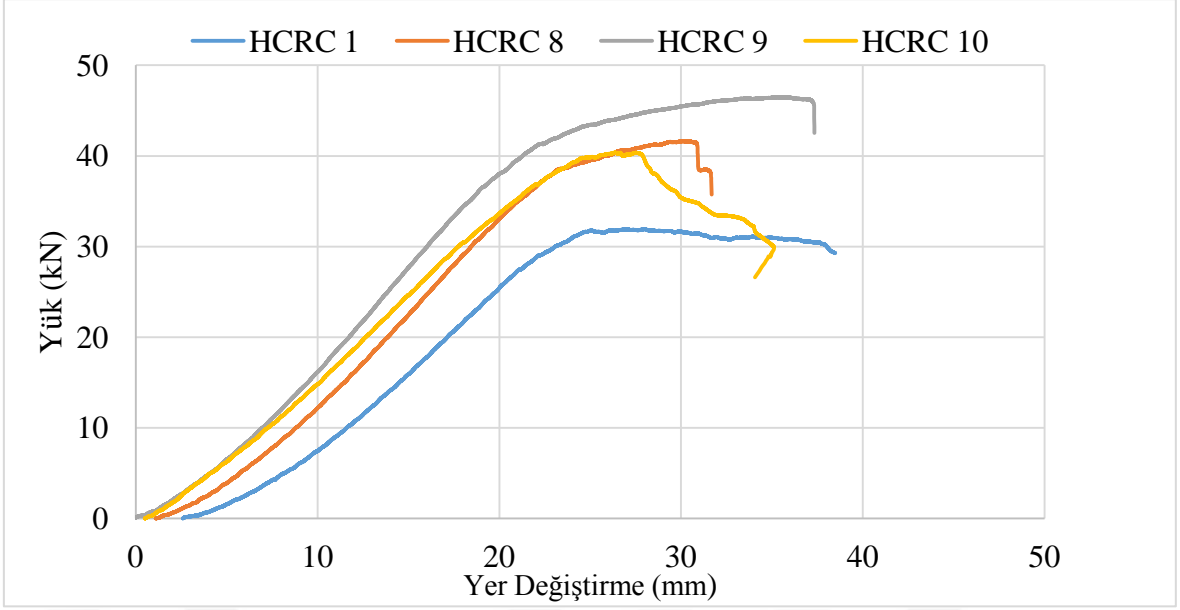
kiriş numuneleri ile güçlendirilmiş tüm numuneler, referans betonarme kiriş numunesine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek eğilme mukavemeti sergilemiştir.



a) 6 mm kalınlığında AHSP'ler ile güçlendirilme



b) 10 mm kalınlığında AHSP'ler ile güçlendirilme



c) 10 mm kalınlığında AHSP'ler ile güçlendirilme

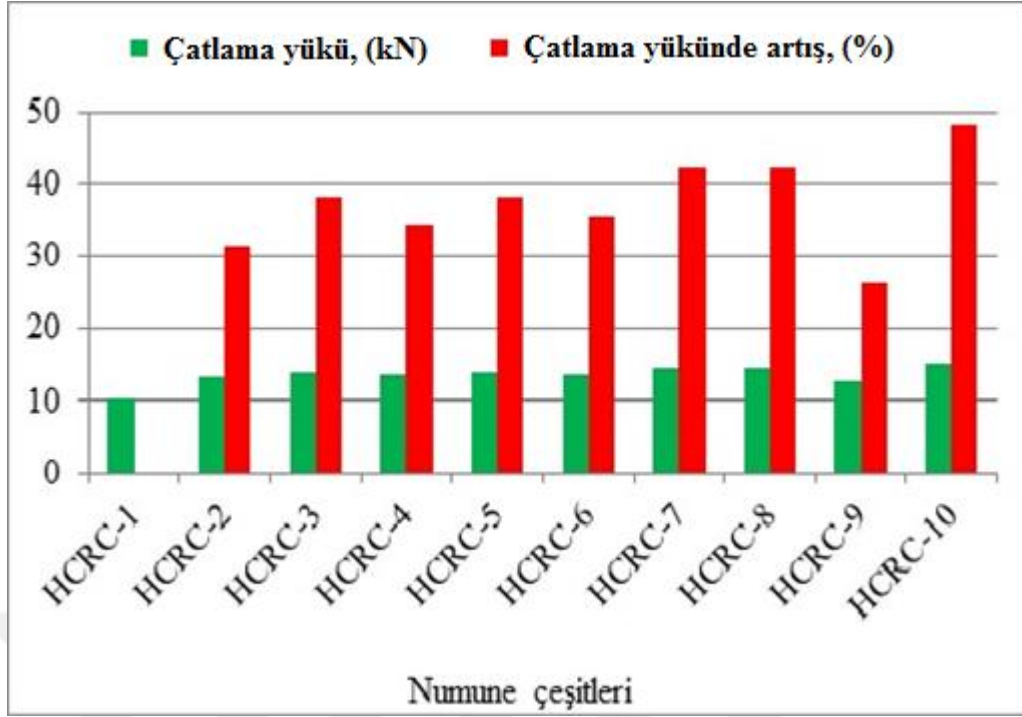
Şekil 4.1 Betonarme kirişlerin yük-yer değiştirme eğrileri

#### 4.2 Yük Taşıma Kapasitesi

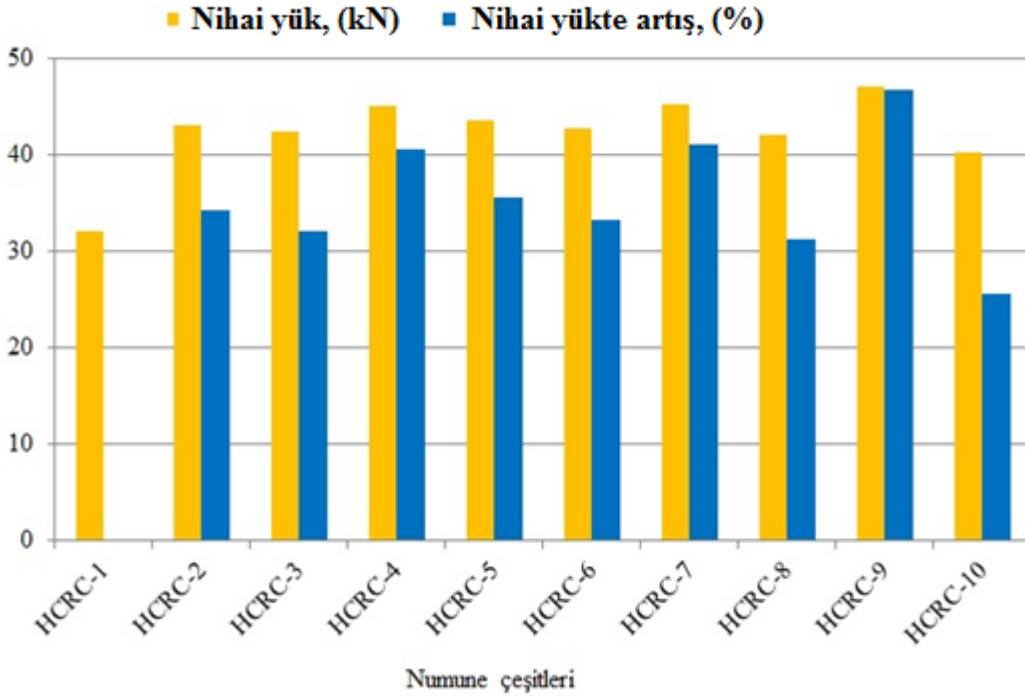
Farklı kalınlıkta hazırlanan bal peteği sandviç panel ile güçlendirilmiş CFRP U-sargıların etkileri bu çalışmada incelenmiştir. Test edilen tüm betonarme kiriş numuneleri için başlangıç ve nihai çatlama yükü arasındaki ilişki açısından test sonuçları Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Birinci çatlama noktasının yerini belirlemek için ilk çatlama yükünün yeri belirlenmiş ve ardından yükleme işlemi, betonarme numunesinin nihai göçmesine kadar devam etmiştir. Çelik donatılı referans betonarme kiriş HCRC-1 numunesinin, beton yüzey kırılmasıyla 32.1 kN'lik bir yükte göçmesi gerçekleşmiştir. İlk eğilme çatlakları orta açıklıkta toplam yaklaşık 10.2 kN'luk yükte gözlemlenmiştir. Betonarme kiriş numune kırılması tüm kiriş boyunca yükün artmasıyla birlikte çatlak genişliğini de artırmıştır. 6 mm kalınlığında bal peteği sandviç panel ile güçlendirilmiş numunelerden (HCRC-2, HCRC-3 ve HCRC-4) kontrol numunesine (HCRC- 1) göre, çatlak yükünde sırasıyla % 31.4, % 38.2, % 34.3 oranlarında daha yüksek değerler elde edilmiştir. Birçok araştırmacı sandviç panellerin, eğilme yükü altında yüzey malzemelerinin eğilme dayanımını (Crupi vd, 2012; Murthy vd, 2006) artırarak ve yanal kuvvetleri tolere ederek, yapı elemanlarının ağır hasar almasını engellediğini belirtmiştir.

15 mm kalınlığında bal peteği sandviç panel kullanılarak güçlendirilmiş betonarme kiriş numunelerden (HCRC-8, HCRC-9 ve HCRC-10), kontrol kirişlere göre çatlama yükünde sırasıyla % 42.2, % 26.5 ve % 48.1 oranlarında daha yüksek değerler elde edilmiştir (Şekil 4.2). Daha düşük kalınlığa sahip sandviç kompozitin aynı yük altında daha az gerilime sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle 6 mm kalınlığındaki sandviç plaka, kalın plakalara göre daha düşük eğilme dayanımı göstermiştir. Benzer şekilde, çekirdek kalınlığı arttıkça (Gutierrez ve Webber, 1980; Amran ve diğ.,2016), betonarme kirişlerinin maksimum yük miktarının, kontrol betonarme kiriş numunesine göre arttığı görülmüştür (Antali ve diğ., 2017). Betonarme kiriş numunelerinin nihai yük kapasiteleri Şekil 10b'de kontrol betonarme kiriş numunesi ile karşılaştırılmıştır. HCRC-2, HCRC-3 ve HCRC-4 kiriş numunelerinin 6 mm kalınlığında bal peteği sandviç panel kullanılarak güçlendirilmesi, Şekil 10b'deki kiriş numunesine kıyasla nihai yüklerde sırasıyla % 34.3,% 32.1 ve % 40.5 oranında artış elde edilmiştir. Ayrıca, takviye olarak 10 mm kalınlığında bal peteği sandviç kompozit panel kullanılarak (HCRC-5, HCRC-6, HCRC-7) kiriş numunelerinde, yük kapasitesinde güçlendirilmemiş betonarme kiriş örneğine kıyasla sırasıyla % 35.5, % 33.3 ve % 41.1 oranlarında artış elde edilmiştir. Bal peteği yapısında kullanılan hücreler betonarme kirişlerinde gövde görevi işlevini üstlendiği yapılan deneysel çalışmalarla belirlenmiştir.

Bu kompozitlerin petek yapısı kesme kuvvetine karşı dayanım artışı göstermiş (Mousanezhad vd, 2014) ve petek çekirdek yapısının altıgen olmasıyla birlikte periyodik ve düzenli bir şekilde dizilim sağlayarak dayanımı olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir (Silva ve Gibson, 1997). Son olarak, 15 mm kalınlığında bal peteği sandviç panel kullanılması, betonarme kiriş numunelerinin nihai yükünü sırasıyla % 31.2, % 46.7 ve % 25.5 oranlarında arttırmıştır. Orta açıklıkta güçlendirilen betonarme kirişler, göçme moduna bağlı olarak ve daha fazla enerjiyi absorbe ederek daha sünek davranış sergilemiştir. Sonuç olarak, yük-yer değiştirme eğrilerinden, güçlendirilmiş betonarme kirişleri, kontrol betonarme kirişinden daha yüksek yük kapasitesi sergilediği belirlenmiştir.



a) Kirişlerin ilk çatlama yükü ve kontrol numunesine göre ilk çatlama yükünde artışlar

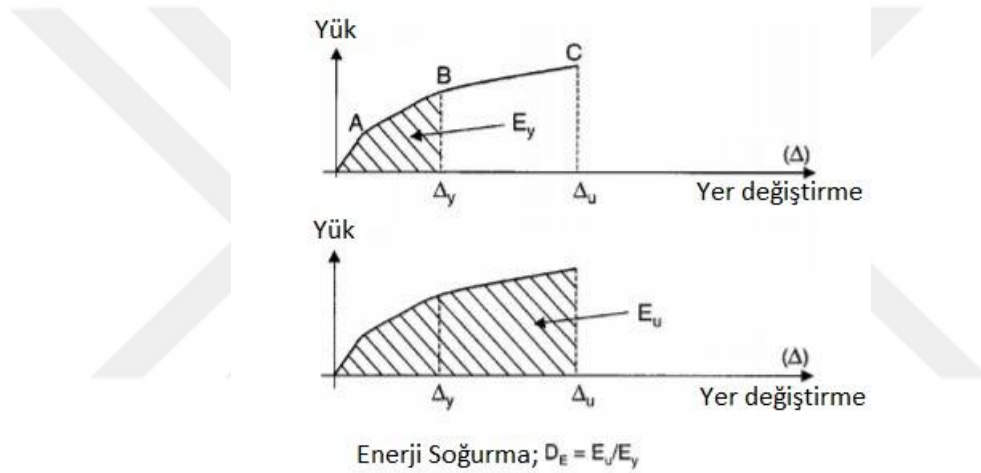


b) Kirişlerin nihai yükü ve kontrol numunesine göre nihai yükünde artışlar

Şekil 4.2 Kirişlerin eğilme yükü taşıma kapasitesi

### 4.3 Yer Değiştirme Sünekliği

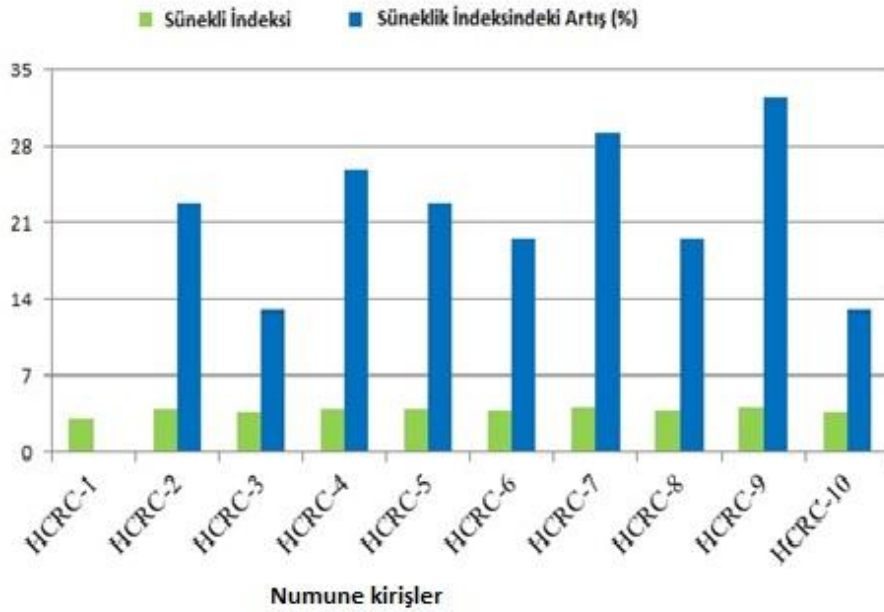
Süneklik, yapıların elastik olmayan yük taşıma kapasitesinde iken önemli bir kayıp olmaksızın göçmeden önceki şekil değiştirmesi olarak tanımlanır. Bir elemanın sünekliği, değerlendirilmenin yapıldığı aşamaya, elemanın göçme moduna, elemanın şekil değiştirme kabiliyetine ve deprem hareketine verdiği karşılık doğrultu yönüne göre değişebilir. Süneklik indeksi betonarme yapı elemanının göçme anındaki toplam yer değiştirmenin akma anındaki yer değiştirmeye oranı olarak tanımlanabilir (Meng ve diğ., 2017).



Şekil 4.3 Özgül enerji soğurma hesabı (Spacone ve diğ., 2004)

Şekil 4.3'te özgül enerji soğurma oranının hesabına ilişkin bir grafiksel formulasyon elde edilmiştir. Bu oran başta takviye polimelerin kirişe bağlanma uzunluğu ile doğru orantılı olarak artarken belli bir değerden sonra sabitleştiğini ortaya çıkarmaktadır (Spacone ve diğ., 2004). Şekil 4.4, test edilen tüm betonarme kirişler için süneklik indekslerinin ilişkisini göstermektedir. Süneklik tüm AHSP'lerin ve CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kiriş örneklerinin, kontrol betonarme kirişe kıyasla (HCRC1) daha yüksek süneklik indeksi göstermiştir. Kontrol numunesi (HCRC-1) ile karşılaştırıldığında, numune HCRC-2, HCRC-3 ve HCRC-4'ün süneklik indekslerinde sırasıyla % 22.6, % 12.9 ve % 25.8 oranında artış elde edilmiştir. Süneklik indeksi HCRC-6 ve HCRC-7 kiriş numunelerinde ise, kontrol betonarme kiriş numunesine kıyasla, sırasıyla % 19.4 ve % 29.1 oranlarında artış göstermiştir.

Özgül enerji soğurma oranına sahip bal peteği yapısı, birçok yapısal parametreyi etkilemiştir (Bates ve diğ, 2016). Çekirdek malzeme ile yapılan takviyeler özgül enerji soğurma oranını artırmıştır. Ek olarak, 15 mm kalınlığında bal peteği sandviç panel ile güçlendirilmiş süneklik indeksi HCRC-8 ve HCRC-10 kiriş, güçlendirilmemiş HCRC1 kiriş numunesine göre sırasıyla % 24,3 ve % 28,3 oranında arttırmıştır. Bal peteği kompozit malzemeler özellikle darbenin ürettiği enerjiyi absorbe ederek yapının hasar almasını engellemiştir. Tüm betonarme kiriş örnekleri arasında, HCRC-9 en büyük sünekliği gösterirken, güçlendirilmemiş kiriş örneği HRC-1 en küçük sünekliği sergilemiştir. Deneysel sonuçlara göre bal peteği paneller ve CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde çatlak oluşumu referans kirişe göre gecikmiş ve çatlak genişliği daha küçük elde edilmiştir. Yüksek süneklik indeksi, yapısal elemanın, eğilme mukavemetinde önemli bir azalma olmaksızın, yükler altında yüksek ölçüde deformasyona uğrayabileceğini göstermiştir (Gao ve diğ, 2016; Ismail ve Hassan, 2016). Sonuç olarak, güçlendirilmiş tüm betonarme kirişlerin referans kiriş örneğinden daha fazla süneklik indeksi gösterdiği belirlenmiştir.

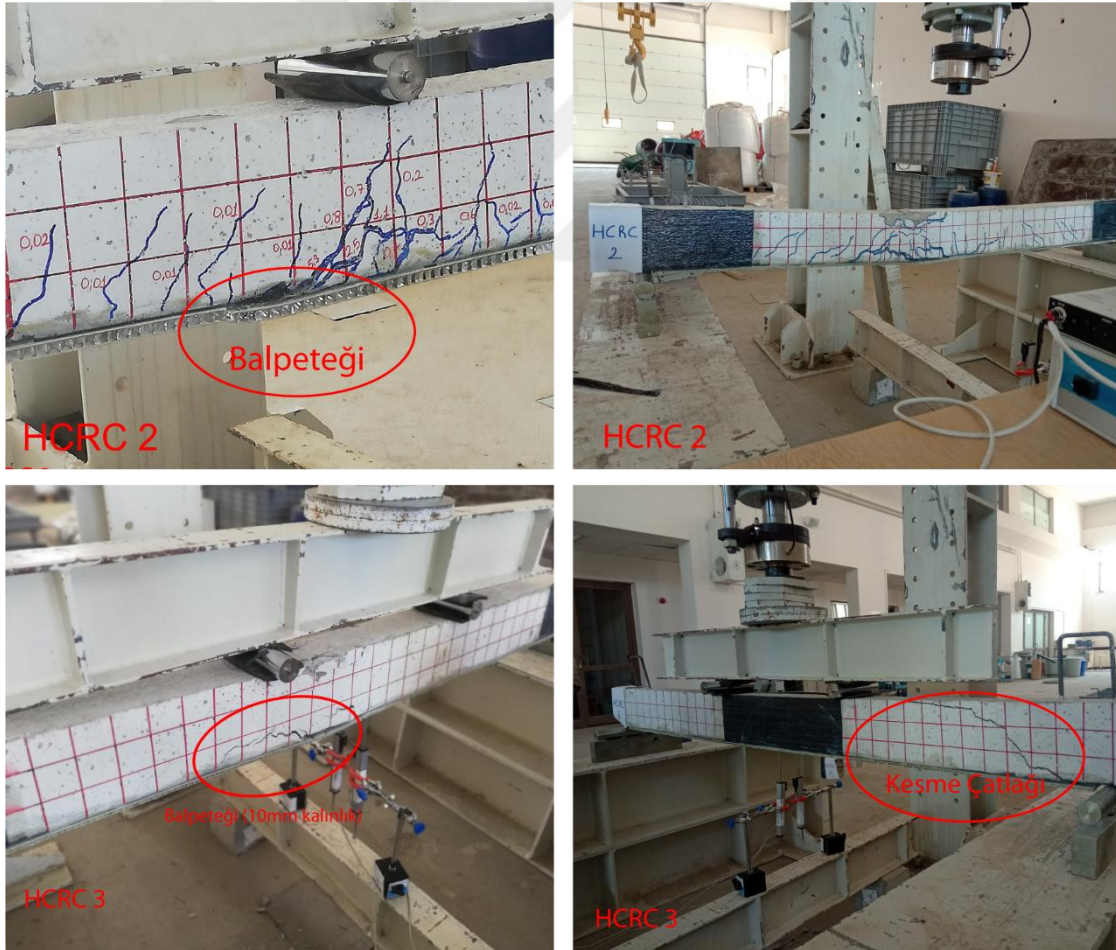


**Şekil 4.4** Deformasyona bağlı süneklik indisi değişimi

#### 4.4. Numunelerin Göçme Modları

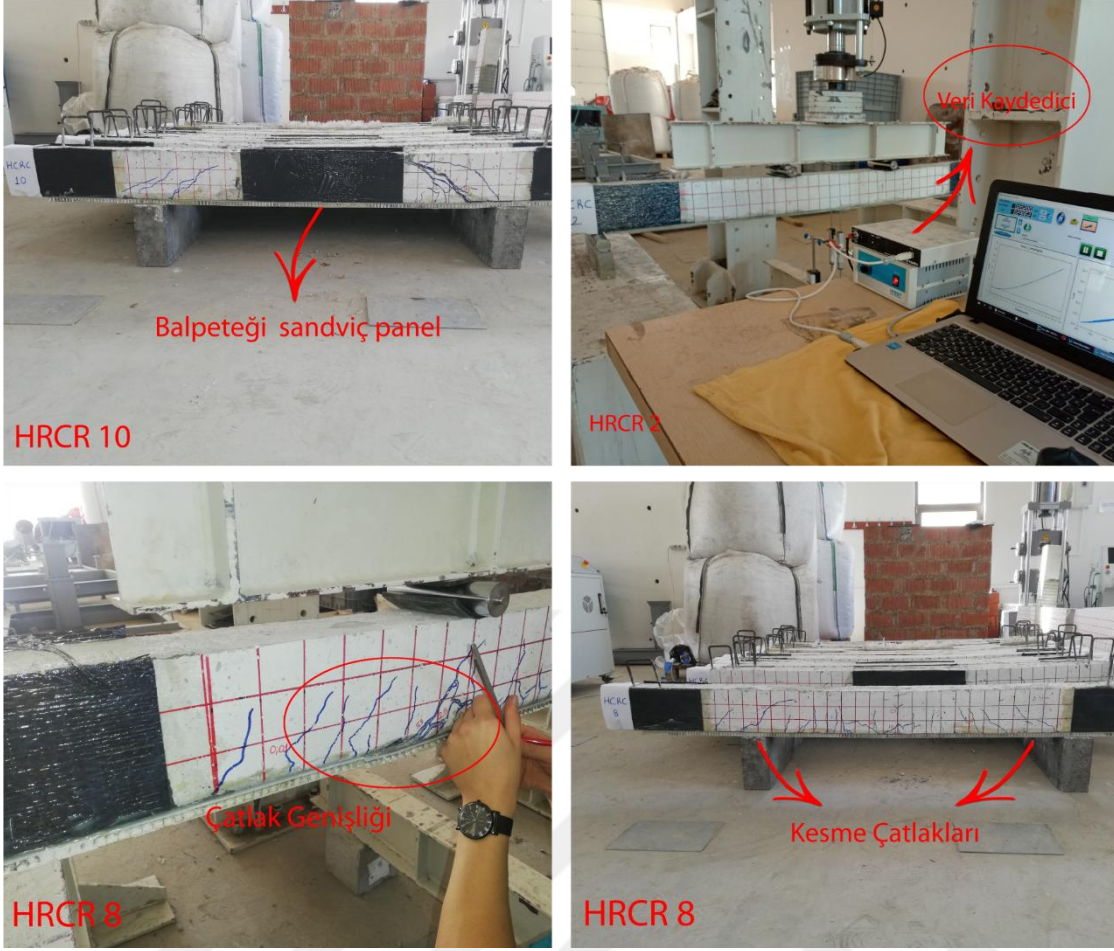
Betonarme kirişlerin çatlak hasarları ve göçme modları Şekil 4.5'te belirlenmiştir. Tüm CFRP güçlendirilmiş betonarme kiriş numuneleri, çatlama kadar referans kiriş numunesi ile benzer davranış sergilemiştir. Fakat, çatlama sonrası, 6 mm kalınlığında bal peteği sandviç panel ve CFRP şeritleri kullanılarak güçlendirilen HCRC-2 kiriş numunesinin orta bölgede bölgesel kopmalar meydana gelmiştir. 15 mm kalınlığında bal peteği sandviç panel ve CFRP U-çeketler kullanılarak güçlendirilmiş HCRC-10 kiriş numunesine benzer çatlak modeli oluşturdukları görülmüştür.

HCRC-3'ün göçmesi, şerit-epoksi arayüzünde bal peteği sandviç panelin bağlarının ayrılmasıyla oluşmuştur. HCRC-8'in göçme modları da orta bölümde ince diyagonal kesme çatlakları oluşmuştur (Hou ve diğ 2012).



a) Betonarme kirişin yakın çekimleri





(b) Betonarme kirişlerin tam görünümü

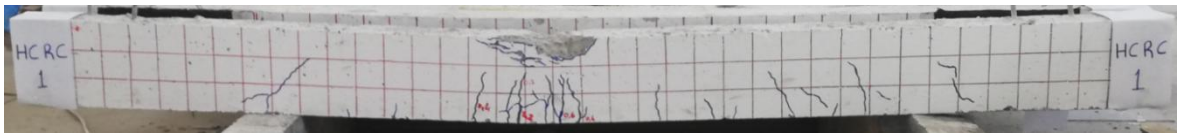
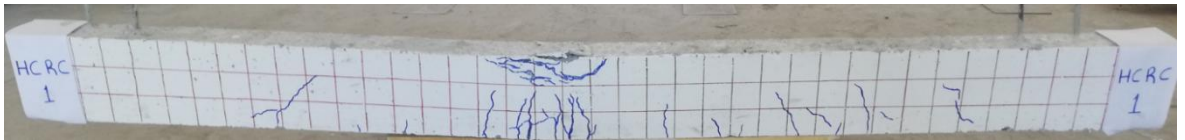
**Şekil 4.5** Betonarme kiriş numuneleri için çatlak modelleri

Test edilen tüm betonarme kiriş numuneleri için temsili göçme modları Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Referans kiriş numunesinin (HCRC-1) göçme modeli, Şekil 4.6.a'daki tipik bir eğilme kırılma modudur. HCRC-1 referans kiriş numunesi için, ilk olarak eğilme çatlakları orta açıklıkta oluşmaya başlamış ve ardından referans kiriş numunesinin kırılması, Şekil 4.6.a'da gösterildiği gibi basınç bölgesinin tepesinde beton paspayı bölgesinin dökülmesiyle devam etmiştir. 6 mm kalınlığında bal peteği sandviç panel kullanılarak güçlendirilmiş HCRC-2 kirişte ise diyagonal kesme çatlakları oluşmuş ve Şekil 4.6.b'de de HCRC-3 kirişiyle benzer davranış göstermiştir. Bal peteği sandviç panel betonarme kiriş numunesinin (Grup B) alt yüzeyinden ayrıldığı gözlenmiştir. Bu tip kırılma modu, kompozit plakalar betonarme kiriş numunelerden ayrılarak hasar aldığı yapılan çalışmada belirtilmiştir (Bodin ve diğ., 200).

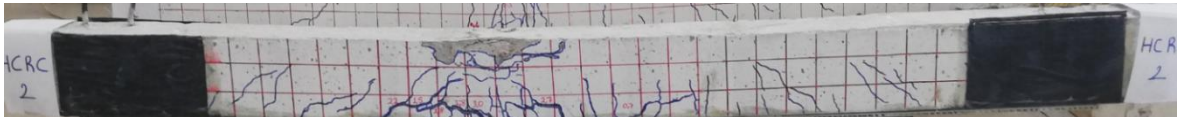


HCRC-5 ve HCRC-6' nin kırılma modlarının, Şekil 4.6.c'de gösterildiği gibi, beton yüzey ile epoksi yapıştırıcı arasındaki arayüzde geniş kesme çatlakları oluştuğu gözlemlenmiştir.

10 mm kalınlığındaki C grubundaki bal peteği sandviç panel kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin sabit moment bölgesinde CFRP kopması nedeniyle göçme meydana gelmiştir. Bal peteği sandviç panellerle güçlendirilen tüm numuneler, referans numuneye kıyasla daha yüksek nihai yük sergiledikten sonra eğilme testlerinde göçmeleri gerçekleşmiştir. 15 mm kalınlığında alüminyum petek sandviç panel (AHSP) ile güçlendirilmiş HCRC-8 ve HCRC-9 kodlu kirişler kopma durumunda uygulanan nihai toplam yük 42.1 kN ve 47.1 idi, bu değerler referans kiriş olan HCRC-1'e göre % 31.2 ve % 46.7 kadar daha yüksek değerler elde edilmesini sağlamıştır. Bal peteği sandviç panel ile güçlendirilmiş RC kiriş numuneleri için, kesme çatlaklarının görünüm genişliği azaltılmıştır (Othman ve Barton, 2008). 15 mm kalınlığında AHSP ve CFRP kullanılması sonucunda, kompozitlerin mukavemetinin yüksek sünekliliği nedeniyle eğilme yükü taşıma kapasitesinde önemli bir artış gözlenmiştir. Bu nedenle, yüksek kalınlıkta plaka ve CFRP şeritleri kullanılan HCRC-8 ve HCRC-9 kiriş numuneleri, eğilme testleri altında kontrol kiriş numunesine göre daha etkilidir. Sonuçlar, bal peteği sandviç panellerin kalınlığının artırılmasıyla taşıma yüklerinin büyük ölçüde artırılabilceğini göstermiştir.

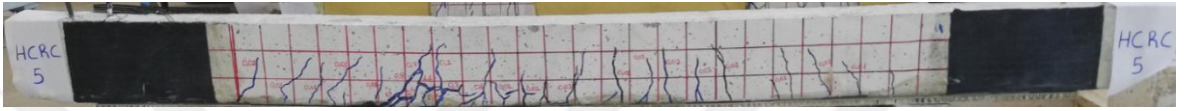


a) A Grubu (Referans kirişler HCRC-1)

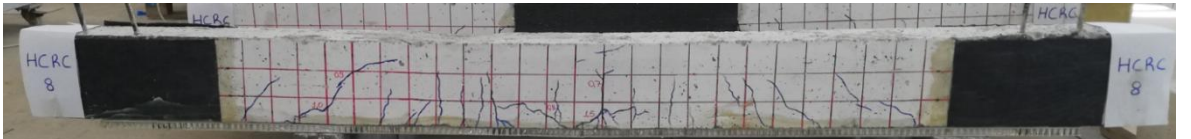




b) B Grubu (6 mm kalınlığa sahip bal peteği sandviç panel ile güçlendirilmiş betonarme kirişler, HCRC 2-4)



c) C Grubu (10 mm kalınlığa sahip bal peteği sandviç panel ile güçlendirilmiş betonarme kirişler, HCRC 5-7)



d) D Grubu (15 mm kalınlığa sahip bal peteği sandviç panel ile güçlendirilmiş betonarme kirişler, HCRC 8-10)

Şekil 4.6 Referans kirişin çatlak desenleri ve harici olarak güçlendirilmiş kirişlerin göçme modları

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, inşaat mühendisliğinin ana bilim dallarından olan malzeme biliminde kullanılan bal peteği yapılı kompozit malzeme ve elyaf takviyeli polimer kompozitler temin edilip betonarme kirişlere güçlendirme teknikleri bakımından etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında hazırlanan üç farklı kalınlığa sahip bal peteği paneller epoksi bazlı yapıştırıcı yardımıyla betonarme kirişlerin üç farklı bölgesine CFRP ile kaplanarak kirişlerin alt yüzeyine uygulanması ile hazırlanmıştır. Deney elemanı olarak dokuz tanesi güçlendirilmiş, biri kontrol numunesi kiriş olmak üzere toplam on adet deney elemanı betonarme kiriş kullanılmıştır.

Yapılan deneylere ve sonuçlarına göre aşağıdaki sonuçlara varılabilir;

- AHSP'ler ve CFRP ile güçlendirilmiş tüm kiriş numuneleri, referans betonarme kiriş numunesine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek eğilme mukavemeti göstermiştir.
- Orta bölümde güçlendirilen betonarme kirişler, kırılma moduna bağlı olarak daha sünek davranış sergilemiştir. Tüm betonarme kiriş örnekleri arasında, HCRC-9 en büyük sünekliği gösterirken, güçlendirilmemiş kiriş örneği HRC-1 en düşük sünekliği göstermiştir.
- Yük - yer değiştirme eğrileri arasında kalan alan betonarme kirişin enerji yutma kapasitesini göstermektedir. Elde edilen verilere göre güçlendirilmesi yapılmış tüm HCRC kirişleri referans HCRC-1 betonarme kirişine göre daha yüksek enerji absorbe yeteğine sahip oldukları tespit edilmiştir.
- CFRP şeritleriyle güçlendirilmiş HCRC-4 kiriş numunesi, HCRC-1 kiriş numunesine kıyasla çatlak genişliği karşılaştırıldığında çekirdek kalınlığının artması referans betonarme kiriş numunesine kıyasla bal peteği kaplı kirişlerin taşıyabileceği talep yükü miktarını artırdığı görülmüştür.
- Deney verileri incelendiğinde 6, 10, 15 mm kalınlıklara sahip bal peteği paneller ile güçlendirilmiş kirişlerin yüklere maruz bırakıldıklarında 15 mm kalınlıktaki bal peteği panelin kiriş ile beraber hareket etmeyip kısa bir süre sonra ayrılması petek kalınlığının artması ile malzemenin rijitliklerinin arttığını göstermiştir.

- Betonarme taşıyıcı elemanlarında yapılması planlanan güçlendirmelerin kolon veya kirişlerde tüm eksen boyunca FRP ile güçlendirme yapmadan sadece yapı elemanın kritik bölgelerine uygulanması ile malzeme sarfiyatını azaltılmasına ve bu da kompozit malzemelerin temininde maliyet açısından oluşan sıkıntıları gidermede kolaylıklar sağlayacağı görülmüştür.

## 5.2 Öneriler

İnşaat sektöründe son yıllarda artan güçlendirme uygulamalarına eklenen CFRP kompozitlerin ve farklı alanlarda kullanılan bal peteği sandviç panellerin uygulanabilirliği ve pratikliği açısından kullanımı yaygınlaştırılabilir. Kompozit malzemelerin yüksek mukavemeti ve çevre şartlarına olan dayanıklılığı tercih edilme nedenlerinin başında gelir. Bu malzemelerin büyük bir kısmının ithal olması nedeniyle yüksek maliyetli olması bu ürünlerin ülkemizde kullanılmasında büyük engel teşkil etmektedir. Kompozit malzeme üretiminin ülke içinden üretilmesinin yanında ciddi bir bilgi ve tecrübe gerektiren uygulama işlemleri içinde nitelikli elemanlar yetiştirilmelidir. Aksi durumda malzemenin beklenen dayanım ve dayanıklılık değerleri sağlanamaz. Diğer güçlendirmelere göre hızlı ve daha yüksek dayanım değerleri elde edilmesi deprem bölgesi olan ülkemizde tercih edilmesinin önünü açacaktır. Bu ürünlerin teknik kullanımı için belli standartlar altında çalışmalar yapılmalıdır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar özetle değerlendirildiğinde aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Deneysel çalışma esnasında kullanılan epoksi bazlı yapıştırıcılar belli bir noktaya kadar kompozit panellerin kirişle birlikte çalışmasını sağlamışsa da çatlak oluşumunun artması ile kompozit malzemenin kirişten ayrıldığı görülmüştür. Kompozit malzemenin betonarme kirişten ayrılmasının önlenmesi için farklı yapıştırma ürünleri ve ankraj yöntemleri denenmesi gerekmektedir.
- Denede kullanılan bal peteği kompozit malzemenin çekirdek veya yüzey örtü kısmındaki malzeme cinsi değiştirilerek oluşturulan yeni malzemenin güçlendirmeye etkisi araştırılabilir.
- Denede betonarme kirişlerin alt yüzeyine uygulanan CFRP ve bal peteği panellerin yanal yüzeylere de uygulanması durumunda kirişteki yeni davranışların etkisi araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- Ahlatcı, H.** (2003). Alüminyum-Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Al-Salloum, Y.A, Siddiqui, N.A., Elsanadedy, H.M, Abadel, A.A & Aqel, M.A** Textile-reinforced mortar versus FRP as strengthening material for seismically deficient RC beam-column joints, *J Comp Constr*, 15 (6) (2011), pp. 920-933.
- Alsayed, S.H & Siddiqui, N.A.** Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips, *Constr Build Mater*, 42 (2013), pp. 238-247.
- Altın, S. & Anıl, Ö.** (2003). Betonarme Kirişlerin Dıştan Yapıştırılan Çelik Levhalarla Kesmeye Karşı Güçlendirilmesi. Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongresi. İstanbul.
- Amran, Y.H.M., Rashid, R.S.M, Hejazi, F., Safiee, N.A & Ali, A.A.A.** Response of precast foamed concrete sandwich panels to flexural loading, *J. Build. Eng.*, 7 (2016), pp. 143-158
- Anania, L., Badala, A. & Failla, G.** (2005). Increasing the flexural performance of RC beams strengthened with CFRP materials. *Const. and Build. Materials*, 19, pp.55-61.
- Antali, A.A, Umer, R., Zhou, J. & Cantwell, W.J.** The energy-absorbing properties of composite tube-reinforced aluminum honeycomb, *Compos. Struct.*, 176 (2017), pp. 630-639.
- Arbaoui, J., Moustabchir, H., Pruncu, C.I. & Schmitt, Y.** Modeling and experimental analysis of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich composites under four-point bending. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2016(00): 1–19.
- Arbaoui, J., Schmitt, Y., Pierrot, J.L. & Royer, F.X.** Effect of core thickness and intermediate layers on mechanical properties of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich structures. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014(59):11-16.
- Arslan, N. & Kaman, M. O. (2002)** Alüminyum, Kağıt Ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi* , 4(3), 113-123.
- Aydıncak, İ.** (2007) Investigation of design and analyses principles of honeycomb structures. MSc Thesis. Middle East Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- Babamohammadi, S., Fantuzzi, N. & Lonardi, G.,** Mechanical assessment of hollow-circular FRP beams, *Compos Struct*, 227 (2019), Article 111313
- Bai, Y., Yu, K., Zhao, J. & Zhao, R.** Experimental and simulation investigation of temperature effects on modal characteristics of composite honeycomb structure, *Compos Struct*, 201 (2018), pp. 816-827

- Barros, J.A.O. & Dias, S.J.E.** Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams, *Journal Cement and Concrete Composites*, 28 (3) (2006), pp. 276-292.
- Bates, S.R.G., Farrow, I.R. & Trask, R.S** 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption, *Mater Des*, 112 (2016), pp. 172-183.
- Bayraktar, Ş. & Turgut, Y.** (2013). “Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Talaşlı Şekillendirilebilirliği”, 1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition, 29-31 Mayıs 2013, Ankara.
- Bekem, A., Ercan, H., Doğu, M. & Ünal, A.** (2011). Uçak Sanayiinde Kullanılan Bal peteği Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11). Elazığ.
- Belingardi G.** et. al., Fatigue analysis of honeycomb-composite sandwich beams, *Composites Part A*, 2007(38), 1183-1191
- Bezazi A.** Fatigue life prediction of sandwich composite materials under flexural tests using Bayesian trained artificial, neural network, *International Journal of Fatigue*, 2007(29), 738-747
- Bingöl, M. & Çavdar, K.** (2016) Farklı takviyemalzemesinin kompozit malzeme mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine etkisi, *Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 21, Sayı 2,
- Bitzer, T.** (1997) *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*. Chapman & Hall, London. doi: 10.1007/978-94-011-5856-5
- C. Yang, P. Xu, S. Yao,** et al. Optimization of honeycomb strength assignment for a composite energy-absorbing structure, *Thin Wall Struct.*, 127 (2018), pp. 741-755
- Carozzi, F.G., Bellini, A., D'Antino, T., G., Felice, F. & Focacci, L.** et al., Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements, *Composites Part B: Eng.*, 128 (2017), pp. 100-119, 10.1016/j.compositesb.2017.06.018
- Chawla, K.K.** (2012). *Composite Materials, Third Edition*, Springer, Switzerland.
- Chevalier JL.** Creep, fatigue and fire resistance of chemical resistant tank sandwich cores. *J Reinforced Plastics Compos* 1994;13(3): 250–61.
- Crupi, V., Epasto, G. & Guglielmino, E.** Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2012(43):6-15.
- Çelik, A.** (2001) Fiber Takviyeli Polimerler ve Mühendislik Yapılarda Kullanım Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 74s.
- Davalos, J.F., Qiao, P., Xu, X.F., Robinson, J. & Barth, K.E** Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications, *Compos. Struct.*, 52 (2001), pp. 441-452

- Demers, D.E.** Fatigue strength degradation of E-glass FRP composites and carbon FRP composites *Constr Build Mater*, 12 (1998), pp. 311-318
- Deng F.** 2007. Acoustic emission applications to composite sandwich structures at room and low temperatures. Phd Thesis. Mechanical Engineering Department of Wayne State University. USA.
- Doğangün, A.** Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, 2008, syf: 382
- Dönmez, M.,** (2011). İki Delikli Kompozit Plakanın Ansys ile Serbest Titreşim Analizi. Bitirme Tezi, Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü.
- Erdağı, S.** (2006) Fiber İle Güçlendirilmiş Betonarme Kolon Ve Perdelerini Rijitlik Ve Kesme Tepkilerini Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, syf:4.
- Ersoy, U. & Özcebe, G.** “Betonarme” , Evrim Yayınevi, İstanbul, 17-46 , 459-464 (2001).
- Eryiğit, E.** (2006) Tabakalı Kompozit Çubuklarda Yanal Yük Etkisi ile Oluşan Burkulma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Evans, A., San Marchi, C., & Mortensen, A.** (2003). Metal Matris Kompozitler. *Endüstride Metal Matris Kompozitler*, 9–38. Sayı:10.1007/978-1-4615-0405-4\_2
- Bolat, F.Ç.** (2011) Bal peteği sandviç kompozit yapıların dinamik analizi. Yüksek Lisans Tezi, AÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- Farooq, U., Ahmad, M.S., Rakha, S.A, Ali, N., Khurram, A.A. & T. Subhani,** Interfacial mechanical performance of composite honeycomb sandwich panels for aerospace applications *Arab J Sci Eng*, 42 (2017), pp. 1775-1782
- Frigione, M. & Lettieri, M.** Durability issues and challenges for material advancements in FRP employed in the construction industry, *Polymers*, 10 (3) (2018), p. 247
- Gao, P., Gu, X. & Mosallam, A.S.** Flexural behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP laminates, *Compos. Struct.*, 157 (Supplement C) (2016), pp. 33-50
- Gecü, R. & Karaaslan, A.** (2016). “Bimetal ve Geleneksel Olarak Üretilen Alüminyum Esaslı Metal-Metal Kompozitlerin Mekanik Özellikleri”, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası*, 180: 26 – 30.
- Grande, E., Imbimbo & M. Sacco, E.** Bond behavior of CFRP laminates glued on clay bricks: experimental and numerical study, *Composites Part B*, 42 (2) (2011), pp. 330-340



- Gutierrez, A.J. & Webber, J.P.H.** Flexural wrinkling of honeycomb sandwich beams with laminated faces, *Int. J. Solids Struct.*, 16 (7) (1980), pp. 645-65. Güçlendirme. Yapı Dergisi, İstanbul, 116, 50-54.
- Ersoy, U. (2007)** Betonarme Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi Uygulama ve Araştırmalar. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, İstanbul.
- Gülmez, S. (2018).** “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler”, Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- He, M. & Wenbin, H.** A study on composite honeycomb sandwich panel structure, *Mater. Des.*, 29 (3) (2008), pp. 709-713
- Heimbs, S.** Virtual testing of sandwich core structures using dynamic finite element simulations, *Comput Mater Sci*, 45 (2009), pp. 205-2016
- Hollaway, L.C. & Head, P.R.** *Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure*, Elsevier, Oxford (UK) (2001).
- Hota, G. & Liang, J.** Advanced fiber reinforced polymer composites for sustainable civil infrastructures, International symposium on innovation & sustainability of structures in civil engineering, Xiamen University, China (2011)
- Hou, L., Xu, S. & Zhang, X. et al.,** Shear behaviors of reinforced ultrahigh toughness cementitious composite slender beams with stirrups, *J. Mater. Civ. Eng.*, 26 (3) (2013), pp. 466-475
- Huang, W.C. & Ng, C.F.** Sound insulation improvement using honeycomb sandwich panels *Appl Acoust*, 53 (1) (1998), pp. 163-177.
- Irshidat, M., Al-Saleh, M. & Almashagbeh, H. (2016).** Effect of Carbon Nanotubes on Strengthening of RC Beams Retrofitted with Carbon Fiber/Epoxy Composites. *Materials and Design*. 89, 225-234.
- Ismail, M.K & Hassan, A.A.A.** Ductility and cracking behavior of reinforced self consolidating rubberized concrete beams, *J. Mater. Civil Eng.* (2016)
- Ismail, Z. & Ong, A.Z.C.** Honeycomb damage detection in a reinforced concrete beam using frequency mode shape regression, *Measurement*, 45 (5) (2012), pp. 950-959
- Jia, M.** “Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composite Sheets”, Master Tezi, The University of Alabama in Huntsville, 4, 20, 22, 27-29, 60 (2003).
- Kalemtaş, A. (2015).** “Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler”, *Putech&Composites*, 20-26.
- Kaya, A.İ. (2016).** “Kompozit Malzemeler ve Özellikleri”, *Putech&Composites*, 38-45.
- Kim, Y., Ghannoum, W.M. & Jirsa, J.O.** Shear behavior of full-scale reinforced concrete T-beams strengthened with CFRP strips and anchors, *Constr Build Mater*, 94 (2015), pp. 1-9



- Köse, M. & Özgen, K.** (2003) Betonarme Elemanların Çelik Lamalarla Güçlendirilmesi. Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Mayıs
- Li, D., Zhao, C., Jiang, L. & Jiang, N.** Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites at room and cryogenic temperature.. *Composite Structures*, 2014(111):56-65.
- Li, J., Xie, J., Liu, F. & Lu, Z.** (2019) A critical review and assessment for FRP-concrete bond systems with epoxy resin exposed to chloride environments, *Compos. Struct.*, 229, Article 111372
- Li, J.R., Cheng, H.F., Yu, J.L & Han, F.S.** Effect of dual-size cell mix on the stiffness and strength of open-cell aluminum foams, *Mater Sci Eng A*, 362 (2003), pp. 240-248.
- Li, W. & Leung, C.K.Y.** Effect of shear span-depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with U-wrapping FRP strips, *Compos. Struct.* 177 (2017) 141-157.
- Liu, Y., Zhou, Q., Wei, X. & Xia, Y.** Testing and modeling tearing and air effect of aluminum honeycomb under out-of-plane impact loading, *Int. J. Impact Eng.* 135 (2020), p. 103402
- Meng, D., Lee, C.K & Zhang, Y.X** Flexural and shear behaviours of plain and reinforced polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite beams, *Eng. Struct.*, 151 (2017), pp. 261-272
- Mohammed, A.A., Manalo, A.C., Maranan, G.B., Muttashar, M., Y. Zhuge, Y. & Vijay, P.** et al. Effectiveness of a novel composite jacket in repairing damaged reinforced concrete structures subject to flexural loads, *Compos Struct*, 111634 (2019)
- Murthy, O., Munirudrappa, N., Srikanth, L. & Rao. R.M.G.VK.** Strength and Stiffness Optimization Studies on Honeycomb Core Sandwich Panels”, *Jl. Of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 25. No. 6, (2006), Page No-663.
- Mutlu, İ.** (2012). “Alüminyum Matrisli Metal Kompozit Malzemelerin Üretilmesi”, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 31-36.
- Nanni, A.** North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: Principles, applications and unresolved issues, *Constr Build Mater*, 17 (2003), pp. 439-446.
- Nirupama, G., Reddy, V.D. & Krishnaiah, G.** Design and fabrication of spot welded corrugated panel under three point bending by FEM. *Procedia Engineering*, 2014(97):1282-1292.
- Nystrom, H.E., Watkins, S.E., Nanni, A. & Murray, S.** Financial viability of fiber-reinforced polymer (FRP) bridges, *ASCE J Manage Eng*, 19 (1) (2003), pp. 2-8
- Onaran, K.** (2003). *Malzeme Bilimi*, 9.Baskı, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Othman A. & Barton, D.** Failure initiation and propagation characteristics of honeycomb sandwich composites. *Compos Struct* 2008;85(2):126–38.

- Özcan, Z.** Betonarme kirişlerin kompozit malzemeler ile güçlendirilmesi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, syf:7 (2005)
- Özer, H.** (2015) Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Özgen, K.** (1990) Betonarme Yapılarda Taşıyıcı Sistem Hasarları, Onarım ve Güçlendirme,” YapıDergisi, stanbul, 116, 50-54.
- Pham, T.M. & Hao, H.** Review of concrete structures strengthened with FRP against impact loading, Structures, 7 (2016), pp. 59-70
- Qiao, P.Z. & Yang, M.J.** Impact analysis of fiber reinforced polymer honeycomb composite sandwich beams, Compos B Eng, 38 (2007), pp. 739-750
- Realfonzo, R., Napoli, A. & Pinilla, J.G.R.** Cyclic behavior of RC beam–column joints strengthened with FRP systems, Constr Build Mater, 54 (2014), pp. 282-297.
- Sasikumar, S., Ramkumar, K.R., Iniyar, S., Gowthaman, M. & Sivasankaran, S.,** (2014). “Study of Mechanical and Machining Behavior of AA 7075-3%TiB2 In-Situ Composite”, JIRSET, 3: 2347 – 6710.
- Sayman, O.** Kompozit Malzemeler Ders Notları, D.E.Ü Makine Mühendisliği Bölümü, 2007
- Schwartz, M.M.** (1983). Composites Materials Handbook, Second Edition, Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Sun, G., Chen, D., Huo, X., Zheng, G. & Li, Q.** Experimental and numerical studies on indentation and perforation characteristics of honeycomb sandwich panels, Compos Struct, 184 (2018), pp. 110-124
- Toradmal, K., Waghmare, P. & Sollapur, S.** "Three-Point Bending Analysis of Honeycomb Sandwich Panels Experimental Approach",International Journal of Engineering and Techniques,vol.3,no.5, (2017), pp.189-193,
- Triantafillou, T.C.** Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates, J Compos Constr ASCE, 2 (2) (1998), pp. 96-104.
- Turco, V., Secondin, S., Morbin, R., Valluzzi, M.R. & Modena, C.** Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars, Compos Sci Technol, 66 (2) (2006), pp. 289-296
- Türkmen, İ.** (2012) Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, CBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Wahl, L., Maas, S., Waldmann, D., Zürbes, A. & Frères, P.** Shear stresses in honeycomb sandwich plates: analytical solution, finite element method and experimental verification, J Sandwich Struct Mater, 14 (4) (2012), pp. 449-468

- Wang, D.** Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels, *Int J Impact Eng*, 36 (2009), pp. 110-114
- Wang, Z., Tian, H., Lu, Z. & Zhou, W.** High-speed axial impact of aluminum honeycomb- experiments and simulations, *Compos B Eng*, 56 (2014), pp. 1-8
- Xie, S. & Zhou, H.** Analysis and optimisation of parameters influencing the out-of-plane energy absorption of an aluminium honeycomb, *Thin-Walled Struct.*, 89 (2015), pp. 169-177
- Xu, S., Hou, L. & Zhang, X.** Flexural and shear behaviors of reinforced ultrahigh toughness cementitious composite beams without web reinforcement under concentrated load, *Eng. Struct.*, 39 (2012), pp. 176-186
- Xu, X.F. & Qiao, P.** Homogenized elastic properties of honeycomb sandwich with skin effect, *Int. J. Solids Struct.*, 39 (2002), pp. 2153-2188
- Yapıcı, İ. & Yapıcı, A.** (2012). “E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi”, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (2): 48-60.
- Yaşar, İ. & Arslan, F.** (2000). “Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerde Elyaf Hacim Oranı ve Elyaf Doğrultusunun Tribolojik Özelliklere Etkisi”, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24: 181-191.
- Yüksel, B. Jamal, R. & Foroughi, S.** Kirişlerde Basınç donatısı oranının Moment-Eğrilik İlişkisine Etkisi, *Konya Teknik Üniversitesi, Konya*, (2019)
- Zaki, M.A., Rasheed, H.A. & Alkhrdaji, T.** Performance of CFRP-strengthened concrete beams fastened with distributed CFRP dowel and fiber anchors, *Compos B Eng*, 176 (2019), Article 107117
- Zhao, G., Huang, C., Liu, H., Zou, B., Zhu, H. & Wang, J.** (2014). “Microstructure and Mechanical Properties of TiB<sub>2</sub>-SiC Ceramic Composites by Reactive Hot Pressing”, *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 42: 36-41.
- Zhao, Y., Sun, Y., Li, R., Sun, Q. & Feng, J.** (2017). Response Of Aramid Honeycomb Sandwich Panels Subjected To Intense Impulse Loading By Mylar Flyer. *Int. J. Impact Eng.*, 104, 75-84.
- Zhong, J., Zhou, Y., Bao, Q., Wang, E., & Li, Q.** (2017). Strengthening Mechanism Of Channel Steel Plate For Notched Concrete Beams Against Fracture: Test And Numerical Study. *Eng. Fracture Mech.*, 180, 132-147.
- Zhou, G. & Hill, M. D.** (2009). Impact Damage And Energy Absorbing Characteristics And Residual In-Plane Compressive Strength Of Honeycomb Sandwich Panels. *J. Sandwich Struct. Mater.*, 11, 329-356.
- Zorlu, M.** Kompozit Malzeme Mekaniği Ders Notları, s. 7-168, 2018

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Mustafa KANTARCI

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2016-2017, Boğaziçi Yönetim Anonim Şirketinde (İBB İştirak Şirketi) çalıştı.
- 2017-2019, Saylak Mimarlık Mühendislik Anonim Şirketinde çalıştı
- 2019-2019, MH Yıldırımlar İnşaat Limited şirketinde çalıştı.
- 2020-2021, Abat Proje İnşaat Limited Şirketinde çalıştı