

T. C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KİRİŞLERİN CAM TAKVİYELİ POLİMER KAPLI
ALÜMİNYUM BAL PETEĞİ (HONEYCOMB) KOMPOZİTLERLE
GÜÇLENDİRİLMESİ**

EDAHAH KOÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ARALIK 2018

Tezin Başlığı: Betonarme Kirişlerin Cam Takviyeli Polimer Kaplı Alüminyum Bal
Peteği (Honeycomb) Kompozitlerle Güçlendirilmesi

Tezi Hazırlayan: Edahan KOÇ

Sınav Tarihi: 14.12.2018

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek İnşaat Mühendisliği Ana Bilim
Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yaşar AYAZ

İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Paki TURĞUT

İnönü Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin ÖNCÜ

Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Betonarme Kirişlerin Cam Takviyeli Polimer ile Kaplı Alüminyum Bal Peteği (Honeycomb) Kompozitlerle Güçlendirilmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Edahan KOÇ

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

BETONARME KİRİŞLERİN CAM TAKVİYELİ POLİMER İLE KAPLI
ALÜMİNYUM BAL PETEĞİ (HONEYCOMB) KOMPOZİTLERLE
GÜÇLENDİRİLMESİ

Edahan KOÇ

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

64 + xii sayfa

2018

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Yaşar AYZ

Betonarme yapılarda yatay taşıyıcı olarak görev yapan kirişlerin güçlendirilmesi için birçok farklı yöntem kullanılmıştır. Malzeme biliminde yaşanan önemli gelişmeler sayesinde yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip, düşük özgül ağırlığı ve yüksek rijitlik kabiliyeti olan malzemeler üretilmiştir. Teknolojinin ilerlemesiyle yaşanan bu gelişmelerle birlikte günümüzde kompozit malzemelerin güçlendirme malzemesi olarak kullanılmasının önü açılmıştır. Malzeme biliminin son gelişmeleri arasında, bal peteği yapılı (honeycomb) kompozitler yer almaktadır. Bu çalışmanın amacı bal peteği yapılı kompozitlerin güçlendirme çalışmalarına etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda piyasadan alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip, yüzeyi cam takviyeli polimer (CTP) ile kaplanmış kompozit paneller temin edilmiştir. Deneysel çalışma için üç adet kontrol betonarme kiriş numunesi, dokuz adet güçlendirilmiş betonarme kiriş numunesi olmak üzere toplamda on iki adet kiriş numunesi üretilmiş ve dört noktalı yükleme testine tabi tutulmuştur. Deney değişkenleri olarak üç farklı bal peteği çekirdek yüksekliğine sahip honeycomb kullanılmış ve çekirdek yüksekliğine bağlı olarak malzeme kalınlığındaki artışın güçlendirmeye etkisi incelenmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda bal peteği yapılı kompozitlerin güçlendirme çalışmaları için uygun ve kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Çekirdek kalınlığı arttıkça, güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kontrol betonarme kirişlerine oranla taşıyabileceği maksimum yük miktarının %14 ile %25 arasında arttığı belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: bal peteği yapılar, sandviç kompozit paneller, cam takviyeli polimer, CTP, LVDT, betonarme yapılarda güçlendirme, eğilme deneyi



ABSTRACT

MSc Thesis

CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH GLASS REINFORCED POLYMER COATED WITH ALUMINUM HONEYCOMB COMPOSITES

Edahan KOÇ

Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

64 + xii pages

2018

Supervisor: Assit. Prof. Dr. Yaşar AYAZ

Many different methods have been used for reinforcing beams that serve as horizontal conveyors in concrete structures. Thanks to the important developments in material science, materials with high strength / weight ratio, low specific weight and high rigidity have been produced. As technology develops, the improvements have paved the way for the composite equipments to be used as the fortification equipment these days. Recent developments in materials science include honeycomb composites. The aim of this study is to investigate the effect of honeycomb composites on strengthening studies. In line with this aim, composite panels coated with glass reinforced polymer (CTP) with aluminum honeycomb core were used. For the experimental study, three pieces of reference beams and nine pieces reinforced beams were prepared. Totally twelve beams were prepared and tested in a four-point loading test. As a test variable, honeycomb with three different honeycomb core heights was used and the effect of the increase in the thickness of the material depending on the height of the core was investigated. As a result of experimental study, it was seen that honeycomb composites were suitable for reinforcement studies. Depending on the test variable, it was seen that the maximum amount of load that the beams could carry between 14% and 25% increased as the core thickness increased.

KEYWORDS: honeycomb structures, sandwich composite panels, glass reinforced polymer, CTP, LVDT, reinforcement in reinforced concrete structures, bending test



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgmeden beni yönlendiren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yaşar AYAZ’ a teşekkürlerimi ve saygılarımı arz ederim.

Tezin deney ve analiz kısmında yardımını esirgemeyen ve yol gösteren hocam Öğr. Grv. Mahmut BAŞSÜRÜCÜ’ ye;

Deney çalışmaları esnasında ve ilerleyen tez sürecinde her an yanımda olan ve desteğini, yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli dostlarım İnşaat Yüksek Mühendisi Salih YILMAZ ve İnşaat Mühendisi Furkan FIRAT’ a;

Yüksek Lisans sürecine beraber başladığımız ve her adımında yardım ve desteğini esirgemeyen dönem arkadaşım İnşaat Mühendisi Betül BERKTAŞ’ a;

Ayrıca eğitim hayatım boyunca bana her konuda destek veren çok kıymetli Ailem’ e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi İÜ-BAP 2018/723 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. MATERYAL ve YÖNTEM	18
3.1. Deney Malzemeleri ve Özellikleri	18
3.1.1. Kalıp	18
3.1.2. Donatı	19
3.1.3. Beton	19
3.1.4. Epoksi bazlı yapıştırıcı	19
3.1.5. Bal peteği (Honeycomb) sandviç panel	20
3.2. Deney Elemanlarının Üretilmesi ve Detaylandırılması	22
3.2.1. Deney elemanlarının üretilmesi	22
3.2.2. Deney elemanlarının isimlendirilmesi	30
3.2.3. Deney elemanlarının detaylandırılması	32
3.3. Deney Düzeneği	36
3.4. Ölçüm Tekniği	38
3.5. Deney Aşaması	39
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	40
4.1. Beton Basınç Deneyi	40
4.2. Donatı Çeliği Çekme Deneyi	41
4.3. KY-1, KY-2 ve KY-3 (Yalın Kirişler) Eğilme Deneyi	42
4.4. KH1-1, KH1-2 ve KH1-3 (Güçlendirilmiş Kirişler) Eğilme Deneyi	45
4.5. KH2-1, KH2-2 ve KH2-3 (Güçlendirilmiş Kirişler) Eğilme Deneyi	49
4.6. KH3-1, KH3-2 ve KH3-3 (Güçlendirilmiş Kirişler) Eğilme Deneyi	52
4.7. Yalın Kirişler ile Güçlendirilmiş Kirişlerin Kıyaslanması	56
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	58
6. KAYNAKLAR	60

SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

BFRP	Bazalt fiber takviyeli polimer
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer
CFS	Karbon fiber tabaka
CNT	Karbon nanotüp
CTP	Cam elyaf takviyeli polyester
FRP	Lif takviyeli polimer
GFRP	Cam elyaf takviyeli polyester
Hİ-CFRP	Yüksek elastisite modüllü karbon fiber takviyeli polimer
HSF	Çelikle güçlendirilmiş fiber kumaş
KH1	Panel 1 ile güçlendirilmiş betonarme kiriş
KH2	Panel 2 ile güçlendirilmiş betonarme kiriş
KH3	Panel 3 ile güçlendirilmiş betonarme kiriş
KY	Yalın betonarme kiriş
LVDT	Deplasman ölçüm aleti
PP	Polipropilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Petek çekirdeği terminolojisi	3
Şekil 1.2.	Bal peteği sandviç panel	3
Şekil 1.3.	Bal peteği sandviç panel detayı.....	4
Şekil 1.4.	Farklı malzemelerden petek yapılı çekirdekler.....	5
Şekil 3.1.	Deneyde kullanılan kalıp malzemesi	18
Şekil 3.2.	Kiriş donatıları	19
Şekil 3.3.	Alüminyum honeycomb çekirdeği.....	21
Şekil 3.4.	Honeycomb çekirdek kısmı	21
Şekil 3.5.	Deney elemanları kalıp hazırlığı.....	22
Şekil 3.6.	Deney elemanları kalıbı	23
Şekil 3.7.	Deney elemanları donatı hazırlığı.....	24
Şekil 3.8.	Beton dökümü öncesi hazırlığı tamamlanmış deney elemanları	24
Şekil 3.9.	Beton dökümü öncesi hazırlık aşaması.....	25
Şekil 3.10.	Beton dökümü ve vibrasyon işlemi	25
Şekil 3.11.	Beton dökümü sonrası yüzey masterlama işlemi.....	26
Şekil 3.12.	Beton dökümü esnasında alınan küp numuneler	26
Şekil 3.13.	Deney elemanlarının yüzey temizliğinin yapılması.....	27
Şekil 3.14.	Sikadur-31 epoksi yapıştırıcının hazırlanması.....	28
Şekil 3.15.	Hazırlanan Sikadur-31 epoksi yapıştırıcının yüzeye sürülmesi..	28
Şekil 3.16.	Erken priz alan Sikadur-31 epoksi yapıştırıcı.....	29
Şekil 3.17.	Honeycomb panellerin giriş yüzeyine yapıştırılması.....	29
Şekil 3.18.	KY-1, KY-2, KY-3 deney elemanlarının detaylandırılması	32
Şekil 3.19.	KH1-1, KH1-2, KH1-3 deney elemanlarının detaylandırılması.	33
Şekil 3.20.	KH2-1, KH2-2, KH2-3 deney elemanlarının detaylandırılması.	34
Şekil 3.21.	KH3-1, KH3-2, KH3-3 deney elemanlarının detaylandırılması.	35
Şekil 3.22.	Eğilme deney düzeneği	36
Şekil 3.23.	Eğilme deney düzeneğinin detaylandırılması	37
Şekil 3.24.	Deneylerde kullanılan veri aktarım sistemi bilgisayar programı	38
Şekil 4.1.	Kür süresi tamamlanan numunelerin basınç dayanım testine.....	40
Şekil 4.2.	Donatı çeliği çekme deneyi.....	41
Şekil 4.3.	Donatı çeliği Gerilme-Uzama grafikleri	41
Şekil 4.4.	Referans kirişlerin deney öncesi fotoğrafları	42
Şekil 4.5.	Referans kirişlerin deney sonrası fotoğrafları.....	43

Şekil 4.6.	Referans kirişlerin Yük-Deplasman grafikleri.....	44
Şekil 4.7.	KH1-1, KH1-2, KH1-3 kirişlerinin deney öncesi fotoğrafları....	45
Şekil 4.8.	KH1-1, KH1-2, KH1-3 kirişlerinin deney sonrası fotoğrafları...	46
Şekil 4.9.	KH1-1, KH1-2, KH1-3 kirişlerinin Yük-Deplasman grafikleri..	47
Şekil 4.10.	Honeycomb panelin kiriş yüzeyinden ayrılması.....	48
Şekil 4.11.	Deney sonrası Panel 1' in kiriş yüzeyinden kaldırılması.....	48
Şekil 4.12.	KH2-1, KH2-2, KH2-3 kirişlerinin deney öncesi fotoğrafları....	49
Şekil 4.13.	KH2-1, KH2-2, KH2-3 kirişlerinin deney sonrası fotoğrafları...	50
Şekil 4.14.	KH2-1, KH2-2, KH2-3 kirişlerinin Yük-Deplasman grafikleri..	51
Şekil 4.15.	KH3-1, KH3-2, KH3-3 kirişlerinin deney öncesi fotoğrafları....	52
Şekil 4.16.	KH3-1, KH3-2, KH3-3 kirişlerinin deney sonrası fotoğrafları...	53
Şekil 4.17.	KH3-1, KH3-2, KH3-3 kirişlerinin Yük-Deplasman grafikleri..	54
Şekil 4.18.	Deney sonrası Panel 3' ün kiriş yüzeyinden kaldırılması.....	55
Şekil 4.19.	KY, KH1, KH2 ve KH3 kirişlerinin Yük-Deplasman grafikleri	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Sikadur-31 epoksi yapıştırıcı teknik özellikleri	20
Çizelge 3.2. Sikadur-31 epoksi yapıştırıcı mekanik özellikleri	20
Çizelge 3.3. Honeycomb sandviç panelin fiziksel özellikleri	21
Çizelge 3.4. Deney elemanlarının isimlendirilmesi	31
Çizelge 4.1. Karakteristik basınç dayanım değerleri	40
Çizelge 4.2. Donatı özellikleri	41
Çizelge 4.3. Deney sonucunda elde edilen veriler	56



1. GİRİŞ

Betonarme yapıların projelendirilmesi, uygulanması ve kullanılması esnasında yapılan tasarım ve uygulama hataları, zamana bağlı zayıflamalar, kullanım amacının değiştirilmesiyle servis yüklerinin farklılaşması, doğal afetler sonucu hasar alması ve yeni yönetmeliklere göre yetersiz kalması gibi nedenlerle onarım ve/veya güçlendirilmesi gerekebilmektedir (Çetinkaya vd., 2004 ve Özcan, 2015).

Taşıyıcı eleman veya malzeme açısından yapılması gereken değişiklik ve eklemeler, yeri ve amacına göre onarım, güçlendirme veya iyileştirme olarak tanımlanmaktadır. Yapıda hasar oluştuğundan sonra, yapının hasar öncesi dayanım düzeyine getirilmesi “onarım” olarak adlandırılmaktadır. Hasar olsun veya olmasın, taşıyıcı sistemin tümünün ya da belli elemanlarının yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini ve stabilitesini arttırmak, ekonomik ömrü boyunca depremlerin birçok kez yinelenmesi beklentisi karşısında hasarın tekrarlanmaması için mevcut durumunun üzerine çıkarmak amacıyla yapılan değişiklikler “güçlendirme” olarak adlandırılmaktadır (Öztürk, 2010). Özetle; hasar görmüş yapıların taşıyıcı elemanlarının dayanım düzeylerinin orijinal haline getirilmesine onarım; orijinal halinin üzerine çıkarılmasına güçlendirme denilmektedir (Köse ve Özgen, 2003). Güçlendirme çalışmaları;

- Kiriş
- Kolon - Perde
- Temel
- Döşeme gibi taşıyıcı elemanlarda yapıldığı gibi yeni bir taşıyıcı eleman ekleyerek de yapılabilir. Taşıyıcı sistem bir bütün olarak güçlendirilebileceği gibi, performans olarak yetersiz kalan taşıyıcı elemanlarda da ayrıca güçlendirme çalışması yapılabilir.

Betonarme yapılarda yatay taşıyıcı olarak kabul edilen kirişlerin güçlendirilmesinde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri mantolama uygulamasıdır. Mantolama, ilave donatı ve beton kabuk sayesinde yeni bir betonarme katmanın elde edilmesiyle yapılan güçlendirme tekniğidir. Tekniğin başarılı olabilmesi için ilave donatı ile mevcut donatı arasında, kaynak çubukları ile sağlanan bağın kuvvetli olması gerekmektedir (Kankal, 2011).

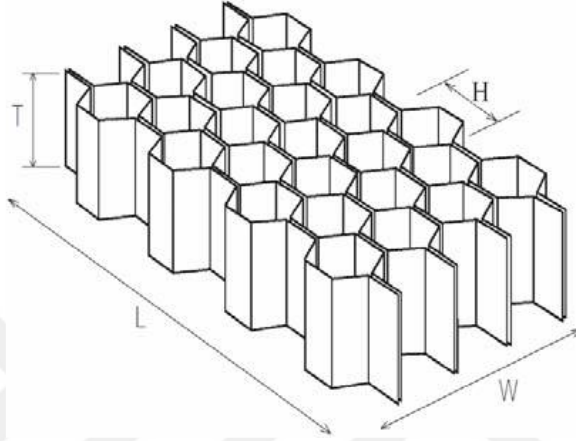
Aynı zamanda ilave beton katmanı ile mevcut beton yüzeyi arasındaki aderansın yeterli olması, ilave beton katmanının homojen şekilde dağıtılması önem arz etmektedir. Kaynak işlemi ve betonun homojen dağıtılması, yöntemin uygulanabilirliğini etkileyen önemli unsurlardır. İşçilik unsurunun doğrudan etkili olmasından dolayı yöntemin başarısı fiziki birçok unsura bağlı olmaktadır. Tüm bu nedenler, yöntemin laboratuvar dışında uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır (Kankal, 2011).

Güçlendirme yöntemlerinden bir diğeri ise kirişe çelik levhalar yapıştırılarak güçlendirilmesi yöntemidir. Bu yöntemde çelik levhaların kirişin alt yüzeyi ile birleşimi iki farklı şekilde yapılabilir. Birinci yöntemde çelik levhalar, kirişin alt yüzeyinde yeterli derinlik ve çapa sahip ankraj deliklerinden geçirilerek sabitlenmektedir. Bu yöntemde ankraj sayısı, çapı, derinliği güçlendirmeyi direkt etkileyen unsurlardandır (Sevinç, 2008). İkinci yöntemde ise çelik levhalar, kirişin alt yüzeyine epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmaktadır. Ankraj veya yapıştırıcı kullanılarak çelik levhalar ile güçlendirilmiş kirişlerde çeliğin korozyonuna karşı önlem almak gerekmektedir. Çelik levhaların kirişe ankraj ile birleştirilmesi; bulon, kaynak vb. zahmetli uğraşları içermesi, korozyon gibi dayanım azaltıcı bir unsurun önlenmesi için ek uğraşları gerektirmesi ve yeterli güçlendirme dayanımının sağlanması için malzeme kalınlığının arttırılmasından ötürü maliyetin artması gibi faktörler bu tekniğin dezavantajları arasında bulunmaktadır.

Uygulamadaki zorluklar, dezavantaj/avantaj oranının artması ve teknolojik gelişmelerin ilerlemesiyle beraber ortaya çıkan bir diğer güçlendirme yöntemi ise uygun kompozit malzemelerin epoksi bazlı yapıştırıcılar ile kirişe yapıştırılarak güçlendirilmesi yöntemidir. İlerleyen teknoloji sayesinde kompozit yelpazesi her geçen gün genişlemekte ve yapı ağırlığını arttırmayan, kolay ve hızlı uygulanabilen, elemanların kapasitelerini önemli ölçüde arttıran kompozit uygulamaları ön plana çıkmaktadır. Karbon takviyeli polimer (CFRP), cam elyaf takviyeli polimer (GFRP), lif takviyeli polimer (FRP) gibi çeşitli karbon-lif kumaşlar özellikle son yıllarda bu güçlendirme yönteminde sıklıkla kullanılmaktadır (Acar, 2014), (Özcan, 2015).

Günümüzde ise hafif ve dayanıklı konstrüksiyonlara gereksinim giderek artmaktadır. Hem hafif hem de dayanıklı malzeme üretimi için son yıllarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda ilerleyen teknoloji sayesinde malzeme

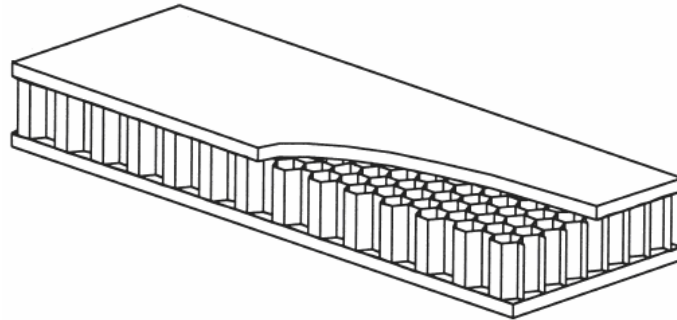
biliminde önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Malzeme biliminin son gelişmeleri arasında bal peteği (honeycomb) kompozit malzemesi önemli bir yer tutmaktadır (Varyoz vd, 2015). Bal peteği yapısı, kompozit endüstrisinin en değerli yapısal mühendislik buluşlarından biri olarak değerlendirilmektedir. Bu tür yapılar bal petekleri ile birebir benzerlik göstermekte ancak petekli yapı, bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelmektedir (Arslan, Kaman, 2002).



Şekil 1.1. Petek çekirdeği terminolojisi (Bitzer, 1997)

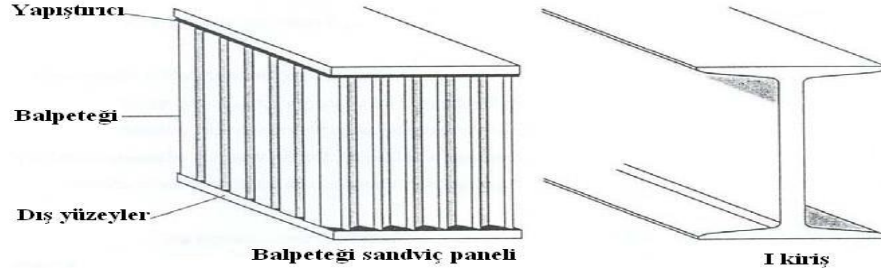
Petek terminolojisinde (Şekil 1.1.), "H" harfi çekirdek genişliğini, "T" harfi ise hücre yüksekliğini (çekirdek kalınlığını) ifade etmektedir. Sandviç panelin hücre yoğunluğu, hücre boyutuna bağlı olarak belirlenmektedir. Kullanım alanına göre hücre boyutu değiştirilerek ideal hücre yoğunluğu elde edilebilmektedir.

Petekli yapılar genellikle sandviç yapılarda dolgu elemanı olarak kullanılmaktadır (Arslan ve Kaman, 2002). Sandviç yapılar, petek yapılı çekirdek malzemenin iki tane ince alt ve üst yüzey tabaka arasına yerleştirilip yapıştırılmasıyla elde edilmektedir (Şakar vd, 2010).



Şekil 1.2. Bal peteği sandviç panel (Arslan ve Kaman, 2002)

Sandviç yapılarda bal peteği kısmı; kayma gerilmelerini karşılarken, yüzey kısımları çekme ve basma kuvvetlerini karşılamaktadır (Özdemirli, 2006).



Şekil 1.3. Bal peteği sandviç panel detayı (Bekem vd, 2011)

Bekem vd. tarafından 2011 yılında hazırlanan çalışmada bal peteği sandviç panel mekanik özellikleri şöyle tarif edilmektedir: “Sandviç panel (Şekil 1.3), esas olarak I kirişi modeli ile benzeşim yapılarak geliştirilmiştir. I kirişine kuvvet uygulandığında; bir yüzey basma gerilmesine, diğer yüzey çekme gerilmesine çalışmaktadır. Aynı şekilde bal peteği hücreleri de I kirişinin gövdesi gibi davranmaktadır. Petek hücresi; yüzeylerin dışında kesme kuvvetlerine karşı koymakta ve yapının sağlamlığını I kirişine nazaran daha fazla arttırmaktadır. Petek hücreleri sandviç panel yüzeylerine düzenli ve kuvvetlendirilmiş destek vermektedir. Petek ve yüzey tabakalar arasında kullanılan yapıştırıcı, her iki elemanı kuvvetli bir şekilde bağlayarak bir bütün olarak hareket etmesini sağlamaktadır. Sonuçta yüksek burkulma ve eğilme dayanımı oluşmaktadır”.

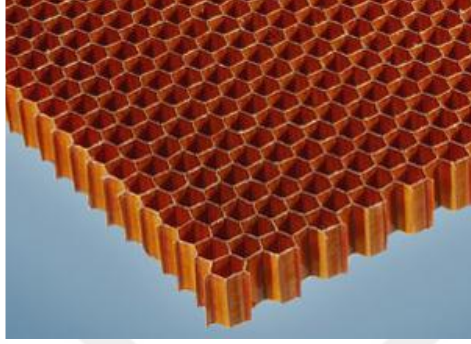
Altıgen petek yapıda boşluklara sahip, sandviç panel kompozitler;

- Yüksek enerji sönmeme kabiliyeti
- Hafiflik
- Yüksek “dayanım/ağırlık” oranı
- Yüksek kayma ve eğilme rijitliği
- Ses yalıtımı

Yüksek korozyon dayanımı özellikleri sayesinde havacılıktan denizcilik sektörüne, uzay teknolojisinden otomotiv ve yapı endüstrisine kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir (Solmaz ve Çelik, 2018).

Sandviç malzemelerin en büyük avantajı, kullanım alanlarına göre alt ve üst yüzey örtüleri ile çekirdeğinin farklı malzeme ve geometrik yapılardan seçilmesine

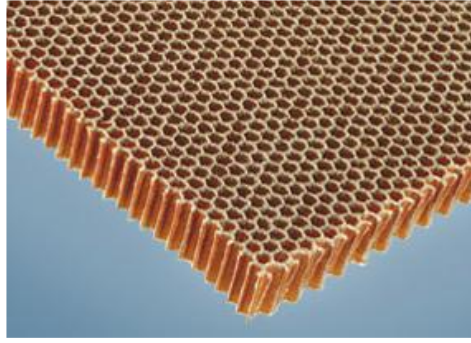
imkân sağlamasıdır (Şakar vd, 2010). Günümüzde kâğıt, plastik, paslanmaz çelik, titanyum, süper alaşım, alüminyum ve benzeri metaller ile polipropilen (PP), nomex ve kevlar malzemelerle bal petekleri üretilerek sandviç kompozitler yapılmaktadır (Kazanç, 2002; Bekem vd, 2011).



A



B



C



D

Şekil 1.4. Farklı malzemelerden petek yapılı çekirdekler (Duran, 2015)

A)Nomex, B)Alüminyum, C)Kevlar, D)Polipropilen

Nomex ve Kevlar bal peteği yapıları alüminyum ve aramid esaslı malzemelerden üretilmektedir. Bu malzemeler yüksek dayanım, yüksek tokluk, yüksek yorulma direnci ve korozyona dayanıklı olma gibi özelliklerinden ötürü havacılık sektöründe yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bekem vd, 2011).

Bal peteği yapılar hafiflik ve rijitlik özellikleri sayesinde havacılık ve uzay sanayisine yönelik uygulamalarda daha çok kullanılmakta ve genellikle uçağın taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi gibi parçalar sandviç konstrüksiyon tekniği ile üretilmektedir (Öztürk, 2009).

Malzeme seçiminde, belirlenen levhanın mekanik özellikleri ön plana çıkmaktadır. Özellikle yüzey örtü malzemesi, petek yapılı kompozit levhaların

eğilme dayanımı üzerinde önemli role sahip olmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, polyester esaslı reçine (fiberglas) ile cam elyaf kombinasyonundan oluşan cam elyaf takviyeli polyester (CTP) yüzey örtü malzemesi olarak kullanılmıştır. Cam elyafı; silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Üretilen cam elyafı, bir termoset reçine (polyester) ile birleştirilerek cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzeme elde edilmektedir. CTP kompozit malzemeler, mekanik özellikleri, yüksek kimyasal dayanımları ve düşük maliyetleri sebebiyle günümüzde rüzgâr türbinleri gibi makinelerden otomobil, uçak gibi vasıta araçlarına kadar geniş kullanım alanına sahip kompozit malzemelerdendir (Subaşı vd, 2017).

Bu tez çalışmasında malzeme biliminin son gelişmeleri arasında yer alan bal peteği yapılı (honeycomb) kompozit malzeme kullanılmaktadır. Çalışmanın amacı bal peteği yapılı kompozitlerin güçlendirme çalışmalarına etkisinin araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda piyasadan alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip, yüzeyi cam takviyeli polimer (CTP) ile kaplanmış kompozit paneller temin edilmiştir. Deneysel çalışma için üç adet kontrol betonarme kiriş numunesi, dokuz adet güçlendirilmiş betonarme kiriş numunesi olmak üzere toplamda on iki adet kiriş numunesi üretilmiş ve dört noktalı yükleme testine tabi tutulmuştur. Deney değişkenleri olarak üç farklı bal peteği çekirdek yüksekliğine sahip honeycomb kullanılmış ve çekirdek yüksekliğine bağlı olarak malzeme kalınlığındaki artışın güçlendirmeye etkisi incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan malzeme ve yöntemlerden bahsedilerek yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Köse ve Özgen (2003) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişler çelik lama elemanlar ile güçlendirilmiş ve yükleme deneyi sonrası eğilme davranışı incelenerek çelik lamaların güçlendirmeye etkisi araştırılmıştır. Çalışma için 10 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan kirişlerin 2 tanesi kontrol numunesi, kalan 8 tanesi ise güçlendirilen kiriş numunesi olarak belirlenmiştir. Betonarme kirişlerin dış yüzeylerine, çelik lamaların farklı şekil ve ebatlarda yapıştırılmasıyla güçlendirme çalışması tamamlanmıştır. Hazırlanan deney elemanları 3 noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma sonucunda, epoksi ile yapıştırılmış çelik lamalarla güçlendirilen numunelerde eğilme ve çekme kuvvetlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Uygun epoksi kullanıldığı ve çelik lama ile betonarme yüzey arasındaki temizlik ve pürüzlendirme işleminin doğru yapıldığı durumlarda göçmenin yapışkan tabakadan başlamadığı görülmüştür. Böylece çelik lamaların güçlendirmeye olumlu etkisinin yanı sıra, çelik lama ile beton arasındaki aderansın yüksek olması için betonarme yüzeyin toz ve nemden arındırıldıktan sonra hafif şekilde pürüzlendirilmesi gerektiği ve doğru epoksi seçiminin de önemli olduğu belirlenmiştir.

Mosallam ve Banerjee (2007) tarafından yapılan çalışmada, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kayma mukavemetinin artırılması üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Üç farklı sınıftan FRP ile güçlendirilen toplam dokuz adet kiriş numunesi dört noktalı yükleme deneyi ile test edilmiştir. Güçlendirme işlemi için karbon takviyeli polimer (CFRP), cam takviyeli polimer (GFRP) ve güçlendirilmiş karbon takviyeli polimer şeritler olmak üzere üç farklı malzeme epoksi ile kiriş yan yüzeylerine farklı şekil ve uzunluklarda yapıştırılarak kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, kompozit sistemlerin kirişlerin nihai dayanımlarında kontrol kiriş numunelerine kıyasla belirgin bir artış sağladığı görülmüştür. Farklı analitik modelleri değerlendirmek ve FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kayma davranışına etki eden faktörleri tanımlamak için ACI 440 modeli de dâhil olmak üzere yayınlanmış analitik modeller

ile deney sonuçlarının karşılaştırmalı bir çalışması da gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sonucunda kayma genişliği-derinlik oranı (a/d)'nın, kirişin kayma dayanımını aktif olarak kontrol eden önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile kayma mukavemetinin, kullanılan FRP kompozitler ile arttırılabileceği görülmüştür.

Kim vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada fiber malzemeyle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımı için bir tahmin modeli önerilmiştir. Çalışma kapsamında 11 adet etkin açıklığı 1400 ve 2000 mm olan, (250x250 mm) kesitli betonarme kiriş numunesi hazırlanmıştır. Kiriş yan yüzeyleri karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) veya karbon fiber tabaka (CFS) ile farklı açı ($45^\circ, 90^\circ$), farklı etkin uzunluklarda kaplanmıştır. Deney elemanları dört noktalı yükleme deneyine tabi tutularak, karbon fiber takviyeli polimerin ve karbon fiber tabakasının kesme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney verilerinden hareketle kesme dayanımını tahmin edebilmek için bir denklem önerilmiştir. Kirişlerin yük taşıma kapasitelerini arttırmak için gereken güçlendirme miktarını belirlemek için oluşturulan bu teorinin var olan diğer analiz modellerinden daha iyi sonuçlar ortaya çıkardığı belirlenmiştir. Yük taşıma kapasitesi göz önünde bulundurularak elde edilen sonuçlarda CFS ile 45° 'lik açıyla mesnetlerden itibaren 440 mm uzunluğunda katman yapıştırılmasıyla güçlendirilen deney elemanının daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Her iki güçlendirme malzemesinin de kontrol kiriş numunelerine oranla daha fazla yük taşıma kapasitesine imkân verdiği ifade edilmiştir.

Tekin vd. (2008) tarafından yapılan deneysel çalışmada, betonarme kirişlerin moment kapasitesinin arttırılması için prefabrik levhalar epoksi ile kirişlere yapıştırılarak güçlendirme yapılmıştır. Deneysel çalışma için, 150x150 mm kesitli, 1200 mm etkin açıklığa sahip 3 adet betonarme kiriş numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan kirişlerin bir adedi kontrol numunesi olmak kaydıyla, kalan iki adedi güçlendirme çalışması için kullanılmıştır. İki farklı güçlendirme çalışması yapılmıştır. İlk yöntemde kiriş alt yüzeyine, 80 mm kalınlığa sahip, 2 boyuna donatı ve 1 enine donatı içeren prefabrik betonarme levha yapıştırılmıştır. İkinci yöntemde ise prefabrik betonarme levha kiriş alt ve üst yüzeyine yapıştırılmıştır. Güçlendirme levhaları aynı zamanda yapıştırma işleminin yanı sıra kirişlere rotlarla da bağlanmıştır. Hazırlanan deney elemanları 3 noktalı yükleme deneyine tabi

tutulmuştur. Deneyler sonucunda, ilk yöntemde kontrol kiriş numunesine oranla yük taşıma kapasitesinde %32 artış sağlanırken, ikinci yöntemde ise %70 artış sağlanmıştır. Deney sayısının yetersiz olmasıyla beraber, yöntemin güçlendirme için uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Vulaş (2010) tarafından yapılan çalışmada, kesme dayanımı yetersiz 7 adet T kesitli betonarme kiriş, karbon takviyeli polimer şeritlerle güçlendirilmiştir. Karbon takviyeli polimerlerin güçlendirmeye etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada farklı elastisite modülüne sahip, cam takviyeli polimer (GFRP), karbon takviyeli polimer (CFRP) ve yüksek elastisite modüllü karbon takviyeli polimer (Hi-CFRP) kullanılmıştır. Böylece farklı malzemelerin güçlendirmeye olan etkileri karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda polimer şeritlerin üzerine ankraj yapılıp-yapılmaması durumu da incelenmiş ve polimer şeritlerin ankrajlı-ankrajsız etkinlikleri de karşılaştırılmıştır. Deney elemanlarına polimer şeritler U şeklinde yapıştırılmış, 3 numune ankrajlı, 3 numune ankrajsız olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan deney elemanları 4 noktalı yükleme deneyinde test edilmiş ve polimer şeritlerin etkisi incelenmiştir. Deney sonucunda; ankrajlı CFRP veya GFRP ile güçlendirilen kirişin, ankrajsız CFRP veya GFRP ile güçlendirilen kirişlere göre daha fazla yük taşıyabildiği gözlemlenmiştir. Kullanılan Hi-CFRP malzemesinin yüksek gevrekliğe sahip olmasından ötürü, ilk oluşan çatlakta kirişten ayrılmasının yanı sıra hazırlık aşamasında dahi kopması nedeniyle güçlendirmede kullanılmaması önerilmiştir. Genel anlamda FRP ile güçlendirilen kirişlerin daha fazla yük taşıyabildiği ancak polimer şeritlere ankraj yapıldığı takdirde taşınan yükün daha da artacağı belirlenmiştir.

Sayın vd. (2010) tarafından hazırlanan çalışmada, alt yüzeyine fiber takviyeli polimer (FRP) uygulanarak güçlendirilen betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri, mevcut deneysel bir çalışmadaki betonarme kiriş modellerinin kullanılması suretiyle, analitik olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 4 adet farklı yapıştırıcı kalınlığına sahip FRP ile güçlendirilen kiriş ile 1 adet referans kiriş numunesi 4 noktalı yükleme deneyi ile test edilmiş ve sonuçlar analitik olarak yorumlanmıştır. Analitik çalışmada, kirişlerin moment-eğrilik ilişkisinin belirlenmesi amaçlanmış ve bu doğrultuda mevcut bir yazılıma FRP ve yapıştırıcı modülleri eklenmiştir. Böylece gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile moment-eğrilik ilişkisi daha kolay

kıyaslanmıştır. Deneyler sonucunda FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin taşıma gücünün, referans kirişe göre yaklaşık 2,5 kat arttığı analitik olarak saptanmıştır. Moment-eğrilik grafiği incelendiğinde ve analitik değerlendirme yapıldığında eğilme rijitliğinin güçlendirilmiş kirişlerde %25 daha fazla olduğu görülmüştür. Aynı zamanda FRP ile güçlendirilen kirişlerin, referans kirişe göre daha gevrek davranış sergilediği, FRP’ de oluşan maksimum gerilmeler incelendiğinde ise FRP levhanın maksimum çekme gerilmesine ulaşmadığı anlaşılmıştır. Buradan hareketle FRP - beton ara yüz ayrışmasının gerçekleştiği anlaşılmıştır. Ayrıca moment-eğrilik ilişkisi grafiklerinden, farklı yapıştırıcı kalınlıklarının güçlendirilmiş kirişlerinin taşıma gücü ve eğilme rijitliğine kayda değer bir farklılık katmadığı gözlemlenmiştir.

Kankal (2011) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin kesme kuvvetine karşı cam elyaf lifli polimer (GFRP) ile güçlendirilmesi incelenmiştir. Ayrıca kiriş yan yüzeylerine yapıştırılan GFRP’nin beton yüzeyden ayrılmasını önlemek amacıyla ankraj bulonu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında; bir adet iyi referans, bir adet kesme donatısı yetersiz kötü referans, 3 adet güçlendirilmiş olmak üzere toplamda 5 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Güçlendirilmiş deney elemanları ise kiriş yan yüzeylerine GFRP şeritlerin yapıştırılmasından sonra, üzerine sırayla 2, 3, 4 bulon ankre edilerek hazırlanmıştır. Çalışmada ankraj bulonu sayısının güçlendirilmiş kirişlere etkisi araştırılmıştır. Deney elemanları 4 noktalı yükleme sistemi ile test edilmiş ve eğilme davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda ankraj bulonu sayısı arttıkça kesme kuvveti taşıma kapasitesinin arttığı, deney elemanının sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Acar (2014) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için karbon kumaş ve çelik levhadan oluşturulmuş kompozit malzeme kullanılmıştır. Karbon kumaşlarla güçlendirilen betonarme kirişlerde süneklik problemi yaşanması, kirişlerin gevrek bir davranış göstererek kırılmasına neden olmuştur. Buradan hareketle karbon kumaşlarla güçlendirilen kirişlerin, sünekliğinin artırılması amacıyla çelik levha kullanılmış ve kiriş davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında 11 adet kiriş üretilmiş ve bir tanesi yalın, iki tanesi referans kiriş olmak kaydıyla, kalan sekiz adet kiriş güçlendirilerek deneye tabi tutulmuştur. Kullanılan karbon kumaş katmanına ve çelik

levha kalınlıklarına aynı zamanda karbon kumaş-çelik levha sıralamasına göre deney elemanları gruplandırılmıştır. Dört noktalı yükleme deneyi sonucunda karbon kumaş ile çelik levhaların birlikte kullanılmasının; kirişin taşıma gücü, başlangıç rijitliği, sünekliği ve tokluk modülüne değişen oranlarda olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Kirişe yapıştırılan katmanın güçlendirmeyi doğrudan etkilediği anlaşılmıştır. Kiriş yüzeyine ilk yapıştırılan katmanın çelik olması halinde, karbon kumaşın kopmasından sonra çelik levha tüm gerilmeleri karşılayarak daha fazla yük taşıma kapasitesine ve daha büyük yüklerde deformasyonun başlamasına imkân sağladığı anlaşılmıştır.

Özcan (2015) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde fiber takviyeli polimer (FRP) lifler kullanılmıştır. Güçlendirme çalışması için 2 adet kontrol numunesi olmak üzere toplamda 8 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Üretilen kirişlerin 3 tanesi alt yüzeyine FRP yapıştırılarak, kalan 3 tanesi ise hem alt hem de yan yüzeylerine FRP yapıştırılarak güçlendirilmiştir. FRP liflerin, kiriş yüzeylerine enine ve boyuna yapıştırılarak yoğunluğu arttırılmıştır. Hazırlanan deney elemanları 4 noktalı yükleme deneyi ile test edilmiş ve deney elemanlarının eğilme davranışları incelenmiştir. Deney sonucunda FRP ile güçlendirilen kirişlerde kontrol numunelerine göre, akma ve kopma yüklerinde artış olduğu ancak düşey yer değiştirme değerinde ise düşüş olduğu saptanmıştır. Güçlendirilmiş kirişler kendi aralarında kıyaslandığı zaman; hem alt hem de yan yüzeyleri FRP ile kaplanan kirişlerin akma ve kopma yükleri ile düşey yer değiştirmelerinin, sadece alt yüzeyi kaplanan kiriş numunelerinden daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Qeshta vd. (2015), kaynaklanmış tel örgü ile epoksiyi birleştirerek yeni bir kompozit üretmişlerdir. Çalışma kapsamında hibrit kompozit malzeme ile güçlendirilen betonarme kirişler, karbon-fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmiş betonarme kirişler ile kıyaslanmıştır. Ayrıca, tel örgü-epoksi ile CFRP tabakasının bir hibriti kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişin yapısal performansı da araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar için 5 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen kirişlerin 4 tanesine güçlendirme işlemi uygulanmıştır. Birinci kirişte güçlendirme metodu olarak tel örgü-epoksi direkt kiriş yüzeyi üzerinde birleştirilmiştir. İkinci kirişte ise daha önceden birleştirilerek panel haline getirilen tel

örgü-epoksi levhası kullanılarak güçlendirme yapılmıştır. Üçüncü kiriş ise CFRP katman, dördüncü kiriş ise tel örgü- epoksi ve CFRP levha ile güçlendirilmiştir. Hazırlanan deney elemanları 4 noktalı yükleme deneyine tabi tutularak eğilme performansları karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda tel örgü-epoksi kompozit kullanılarak yapılan güçlendirme işleminin, kirişlerin performansında %47 ye varan, ilk çatlak yükünde ise %90 a varan bir artış sağladığı aynı zamanda çatlak açıklığının kısıtlanmasında etkin rol oynadığı görülmüştür. CFRP levha ile karşılaştırıldığında, tel örgü-epoksi ile güçlendirilmiş kirişler; ilk çatlak yükü, sertlik ve akma dayanımında daha fazla gelişme göstermiştir. Hibrid tel örgü-epoksi-karbon fiber kompozit kullanımında ise daha iyi post-verim davranışı göstermiştir ve CFRP levhasının kiriş alt yüzeyinden ayrılması önlenmiştir.

Irshidat vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada karbon-fiber plakaların epoksi ile yapıştırılmasıyla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin güçlendirme verimliliğinin artırılmasında karbon nanotüplerin (CNT) etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda güçlendirme çalışmaları için karbon nanotüpler (CNT) ile verimliliği arttırılmış karbon-fiber paneller kullanılmıştır. CNT'ler, epoksi reçinesinin modifiye edilmesinde ve/veya karbon fiber tabakaların zenginleştirilmesi yoluyla deney elemanlarına dâhil edilmiştir. Toplam on altı deney elemanı hazırlanmış ve dört noktalı yükleme deneyi altında test edilmiştir. Deney elemanları test edildikten sonra taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, CNT modifiye epoksi reçinenin kullanılmasının, güçlendirilmiş kirişlerin nihai yükünü ve sertliğini arttırdığını göstermiştir. Arttırma verimliliğinin, CNT'nin dağılımı, ankraj uzunluğu ve güçlendirici tabakaların sayısına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Aynı zamanda CNT ile zenginleştirilmiş karbon-fiber tabakada, epoksi reçinenin lif tabakası arasında yayılması engellenerek yükü taşıyan lif miktarının azaldığı belirlenmiştir.

Zand vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, beton dolgulu dikdörtgen ve daire kesitli çelik kirişler karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmiş ve eğilme davranışları incelenmiştir. Çalışma kapsamında CFRP lifler; kirişlere farklı uzunluk, yüzey ve katman sayılarında uygulanarak kuvvetlendirme davranışının deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Sekiz adet dikdörtgen kesitli, altı adet daire kesitli beton dolgulu çelik kiriş hazırlanmış ve güçlendirme işlemleri tamamlanarak 4 noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma

sonucunda; kirişlerin moment kapasitesinin, enerji emme kapasitesinin ve bükülme sertliğinin CFRP tabakalarının artmasıyla önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Dikdörtgen kesitli kirişlerde iki ve üç CFRP katmanlı kirişlerin moment taşıma kapasitelerinde yaklaşık %26 ve %38 oranında artış gözlemlenmiştir. Aynı şekilde daire kesitli kirişlerde iki ve üç CFRP katmanlı kirişlerin moment taşıma kapasitelerinde yaklaşık %38 ve %44 artış gözlemlenmiştir.

Zhang vd (2016) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, hasara uğramış ve uğramamış olmak üzere toplamda 15 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Hasar tipi olarak; sürekli yüke maruz bırakılması ve sürekli korozyona maruz bırakılması şeklinde iki farklı yöntem kullanılmıştır. Tüm kirişler önceden hasar görmüş olsun veya olmasın, güçlendirilme işleminden sonra farklı sayılarda (0, 40, 80, 120) ıslatma/kurutma (WD) döngüsüne maruz bırakılmıştır. Çünkü çalışmanın öncelikli hedefi, tek tip olmayan korozyonun verim üzerindeki etkisini incelemek olmuştur. Hazırlanan tüm deney elemanları dört noktalı yükleme deneyinde test edilmiştir. Deneyler sonucunda sürekli yüke maruz bırakılarak hasara uğratılan kirişlerde CFRP ile güçlendirmenin yük taşıma kapasitesine önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Sürekli yük ve korozyona maruz bırakılarak hasara uğratılan kirişlerde CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin mukavemetini arttırmadığı belirlenmiştir. Çalışma; sürekli yük, sürekli korozyon veya her ikisine de birden maruz kalacak betonarme yapıların önceden güçlendirilmesi gerektiğinin önemini vurgulamıştır.

Shahverdi vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişleri güçlendirmek için bir püskürtme beton katmanına gömülmüş nervürlü, ön gerilmeli demir çubuklar kullanılmıştır. Bu güçlendirme yönteminin uygulanması için üç adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. İki adet kiriş, ilave olarak uygulanan bir püskürtme beton tabakası içine gömülü nervürlü, ön gerilmeli demir çubuklar ile kalan bir adet kiriş ise püskürtme beton tabakasında normal çelik takviye çubuklarıyla güçlendirilmiştir. Normal çelik takviye ile güçlendirilen kiriş referans olarak kullanılmıştır. Güçlendirilen kirişler, dört noktalı yükleme deneyi testinde incelenmiştir. Deney sonucu, referans kirişlere oranla güçlendirilen kirişlerin kırılma

yükünde artış olduğunu, betonarme kirişlerin alt yüzeyindeki uygulamanın başarılı olduğunu ve güçlendirme tekniğinin iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Akroush vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanılarak betonarme kirişlere güçlendirme işlemi yapılmıştır. Kirişlerde, normal ve kayma gerilmelerinin oluşması için mesnet haricinde kiriş orta noktasına ara destek yerleştirilerek iki açıklıklı bir kiriş sistemi elde edilmiştir. CFRP levhaların farklı uzunluk ve şekillerde yapıştırılmasıyla hazırlanan 8 adet deney elemanı 4 noktalı yükleme deneyinde test edilmiştir. Deneyler sonucunda, güçlendirilmiş kirişlerde ilk kesme çatlağının ortaya çıktığı yükün, güçlendirme yapılmayan referans kirişe oranla %21-47 oranında arttığı görülmüştür. Çalışma sonucunda kullanılan CFRP liflerin, kirişlerin kayma dayanımına önemli bir katkısı olduğu ifade edilmiştir.

Hawileh vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde çelikle güçlendirilmiş fiber kumaş (Hardwire Steel-Fiber, HSF) kullanılmıştır. HSF kompozit paneller kiriş alt yüzeyine epoksi ile yapıştırılmıştır. Çalışmada iki farklı HSF panel kullanılmıştır. Panellerin çelik yoğunluğuna (orta, yüksek yoğunluklu) ve katman sayısına göre bir tane referans olmak üzere 8 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan deney elemanlarının eğilme davranışları dört noktalı yükleme deneyine tabi tutularak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, HSF panellerin %29 ile %62 aralığında kirişleri güçlendirdiği görülmüştür. Bununla birlikte nihai taşıma gücünün artmasına rağmen güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sünekliğinde %13 ile %41 arasında düşüş olduğu görülmüştür. Aynı zamanda güçlendirilmiş deney elemanlarının tamamında, kompozit malzeme tabakalarının birbirinden ayrılması olarak tanımlanan delaminasyon hatası oluşmuş ve HSF levhaların tam kapasite kullanılması sağlanamamıştır.

Chen vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde bazalt fiber takviyeli polimer (BFRP) kullanılmıştır. Bazaltın düşük maliyetli olması, korozyon dayanıklılığının yüksek olması ve sağlam mekanik özelliklere sahip olması güçlendirme malzemesi olarak seçilmesinin temel nedenleri arasında yer almıştır. Deney kapsamında bir tane referans kiriş, beş tane güçlendirilmiş kiriş numunesi olmak üzere 6 tane deney numunesi hazırlanmıştır.

BFRP kumaşlar her bir deney elemanına farklı şekilde (kiriş alt yüzeyi, kiriş yan yüzeylerine 45° ve 90° ‘ lik açılarla şeritler halinde ve hem alt hem yan yüzeylerine) yapıştırılmıştır. Güçlendirilen deney elemanları üç noktalı yükleme deneyine tabi tutularak eğilme davranışları incelenmiştir. Aynı zamanda BFRP ile güçlendirilen deney elemanları, literatürde yer alan karbon-fiber (CFRP) ve cam-fiber (GFRP) takviyeli polimer ile güçlendirilmiş kirişler ile de kıyaslanmıştır. Deney sonucunda en fazla yük taşıma kapasitesine sahip olan kiriş, yan yüzeylerine 45 ° açıyla ve alt yüzeyine mesnet aralığı boyunca yapıştırılan BFRP ile güçlendirilen numune olmuştur. BFRP tabakaların betonarme kirişlerin eğilme dayanımını arttırmak için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak, BFRP’nin yüksek eğilme kabiliyeti sağlamasıyla karbon, cam ve aramid fiber takviyeli polimerlerden daha etkili olduğu görülmüştür.

Bal peteği yapısının mekanik özellikleri (honeycomb) ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar ise aşağıda özetlenmiştir.

Shi vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada karbon fiber ve alüminyum bal peteği sandviç paneller kullanılmıştır. Çalışmada alüminyum bal peteği çekirdek karbon fiber katman ile alt ve üst yüzeyi kaplanarak sandviç panel elde edilmiştir. Böylece yüksek sertliğe sahip karbon fiber ile düşük sertliğe sahip alüminyum bal peteği çekirdek malzeme melezleştirilerek yük altındaki davranışı incelenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında 3 farklı hibrit deney elemanı oluşturularak üç noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. İlk olarak alüminyum bal peteği çekirdeğin hem alt hem de üst yüzeyine ince bir kevlar-fiber katmanı yapıştırılmıştır. Kevlar-fiber katman üzerine ise 1 mm kalınlığa sahip karbon-fiber katman yapıştırılarak sandviç panel (Honeycomb panel) elde edilmiştir. İkinci deney elemanı ise alüminyum bal peteği çekirdek yerine alüminyum ızgara kullanılarak (grid panel) oluşturulmuştur. Üçüncü deney elemanı ise alüminyum bal peteği çekirdek ile alüminyum ızgaranın iç içe geçirilerek kevlar-fiber ve karbon-fiber ile alt ve üst yüzeylerinin kaplanması ile (combined panel) elde edilmiştir. Yükleme işleminden sonra combined panelin kritik yük, özgül mukavemet ve enerji sönümlemesi özelliklerinin diğer panellerden daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

Shi, vd. (2014) tarafından yapılan bir diğerk çalışmada, alüminyum bal peteği çekirdeğin karbon-fiber yüzey örtüsü ile kaplanmasıyla oluşturulan sandviç panelin 3 noktalı yükleme ve tek eksenli basınç deneylerindeki davranışı incelenmiştir. Aynı zamanda karbon-fiber lifli yüzey örtü tabakaları ile alüminyum bal peteği çekirdeği arasındaki ara yüzde kısa keklar liflerinin kullanılmasının fizibilitesi ve etkinliği incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, ara yüzeydeki kısa keklar liflerinin (12 mm uzunluğunda) sadece 24 g/m² olmasına rağmen çok etkili olduğunu göstermiştir. Üç noktalı yükleme deneyi sonrasında sertleştirilmiş ara yüze sahip sandviç numuneleri için yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %14 arttığı ve daha yüksek enerji sönümlemesine sahip olduğu belirlenmiştir. Güçlendirilmiş sandviç örneklerinin düzlem içi sıkıştırmasının sonuçları, maksimum yükte yaklaşık % 55'lik bir artış ve enerji sönümlemesinde % 99'luk bir artış göstermiştir. Üç noktalı yükleme ve tek eksenli basınç koşulları altında sandviç kirişlerin analitik olarak tahmin edilen kritik yükleri taşıyabildiği ayrıca karbon fiber yüzey tabakası ve alüminyum-bal peteği çekirdeği arasındaki ara yüzeyde keklar-fiber ara yüzey sertleştirmesinin de yararları doğrulanmıştır.

Subaşı vd. (2017) tarafından yapılan deneysel çalışmada, alüminyum bal peteği çekirdeğin alt ve üst yüzeyine hazır cam takviyeli polyester (CTP) yapıştırılarak sandviç panel elde edilmiş ve eğilme davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında 4 farklı deney elemanı hazırlanmıştır. İki farklı çekirdek kalınlığı (15mm, 20 mm) ve iki farklı CTP levha kalınlığı (2 mm, 3 mm) kullanılarak farklı kombinasyonlarda deney elemanları oluşturulmuştur. Hazırlanan deney elemanları 3 noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Deneyi sonucunda, bal peteği çekirdek kalınlığının ve CTP levha kalınlığının eğilme değerkleri üzerinde ayrı ayrı etkiye sahip oldukları görölmüştür. Bal peteği çekirdek kalınlığı 15 mm iken, CTP levha kalınlığının arttırılması eğilme değerklerini %12 oranında arttırırken; bal peteği çekirdek kalınlığının 20 mm olması halinde, CTP levha kalınlığının arttırılması eğilme değerklerinde %10 oranında bir artış sağlamıştır. Elde edilen bu veriler sayesinde eğilme kuvvetinde meydana gelen artış üzerinde, bal peteği çekirdek kalınlığının, CTP levha kalınlığına göre daha etkili olduğu görölmüştür. Aynı zamanda deney sonucunda, bal peteği çekirdek ile CTP yüzey levhaları genel olarak yapışma noktalarından birbirinden ayrıldığı gözlemlenmiştir.

McCracken ve Sadeghian (2018) tarafından yapılan çalışmada ise üç boyutlu dokuma kumaş çekirdeği, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) yüzey tabakaları ile kaplanarak sandviç panel elde edilmiş ve dört noktalı yükleme deneyine tabi tutularak mekanik davranışları incelenmiştir. Toplam 30 küçük ölçekli sandviç panel numunesi hazırlanmıştır. Deney elemanları 150 ve 300 mm şeklinde iki farklı boyda ve GFRP yüzey tabakalarının katman sayıları (0, 1, 2 katman) değiştirilerek hazırlanmıştır. Deneyler sonucunda yük sapması davranışı, yük gerilme davranışı, moment kurucu davranış ve tarafsız eksen konumu analiz edilmiştir. Test sonuçlarına dayanarak, sandviç panellerin eğilme dayanımı, kayma sertliği, çekirdek kayma modülü hesaplanmıştır. Ayrıca, çekirdek kayma gerilmesi modülünün, deformasyon ve test numunelerinin kompozitleri üzerine olan etkisini değerlendirmek için bir analitik model sunulmuştur. Model, çekirdek geometrisi ve kompozit malzeme özelliklerinin sandviç paneli nasıl etkilediğini ölçerek yüzey tabakasının ve çekirdeğin mekanik özellikleri arasındaki uyumun, yapılan sandviç panellerin optimize edilmesinde önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda, mevcut otoyol menfezleri ve büyük çaplı drenaj sistemleri dâhil olmak üzere yeraltı altyapısının güçlendirilmesi için ince yüzey tabakalı sandviç panel astarların tasarımında kullanılabileceği öngörülmüştür.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve özellikleri ile deney numunelerinin hazırlanması ve deney aşaması detaylı olarak açıklanmıştır. Deney elemanlarının boyutları; laboratuvar koşulları, yükleme ve ölçme düzeneklerinin kapasiteleri göz önünde bulundurularak gerçeği yansıtacak şekilde seçilmiştir.

3.1. Deney Malzemeleri ve Özellikleri

3.1.1. Kalıp

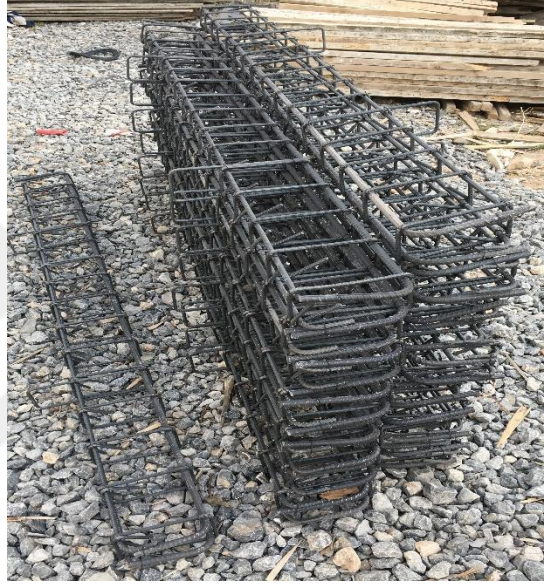
Deneysel çalışma kapsamında 12 adet tam ölçekli betonarme kiriş numunesi imal edilmiştir. Tüm deney elemanlarının aynı özellikleri göstermesi güçlendirme çalışması için çok önemlidir. Bunun için tek seferde beton dökümüne imkân sağlayacak kalıp hazırlığı yapılmıştır. Kalıp malzemesi olarak plywood kullanılmıştır. Deney elemanlarının boyut ve kesitlerinin aynı olabilmesi için kalıp imalatı özenli bir şekilde yapılmıştır.



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan kalıp malzemesi

3.1.2. Donatı

Betonarme kiriş deney numuneleri 100×150 mm boyutlarında, 2400 mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Deney elemanlarının boyutuna göre donatı seçimi yapılmıştır. Tüm kirişler için basınç donatısı olarak 2 adet Ø10, çekme donatısı olarak 2 adet Ø14 nervürlü donatı kullanılmıştır. Oluşacak kesme kuvvetinin karşılanabilmesi için tüm kirişlerde 15 cm aralıklarla Ø8 çapında etriyeler kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Kiriş donatıları

3.1.3. Beton

Kiriş numuneleri için kalıp ve donatı imalatı tamamlanarak beton dökümü için hazır hale getirilmiştir. Tasarlanan kiriş numuneleri için C20/25 sınıfı hazır beton kullanılmıştır.

3.1.4. Epoksi bazlı yapıştırıcı

Hazırlanan deney elemanlarının alt yüzeyine güçlendirme malzemesinin yapıştırılması için epoksi bazlı reçine kullanılmıştır. Bu işlem için Sikadur-31 isimli, solvent içermeyen, neme toleranslı, tiksotropik, 2 bileşenli, epoksi reçineler ve özel dolgular içeren, yapısal yapıştırma ve tamir harcı temin edilmiştir.

Sikadur-31, beyaz renkli A bileşeni ile koyu gri renkli B bileşeninden oluşmaktadır. Bileşenlerin karışım oranı ağırlıkça veya hacimce “A bileşeni: B bileşeni = 3:1” şeklinde hazırlanmaktadır. Üretici firma tarafından “Ürün Bilgi Föyü’nde” verilen özellikler Çizelge 3.1. ve 3.2.’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Sikadur-31 epoksi yapıştırıcı teknik özellikleri

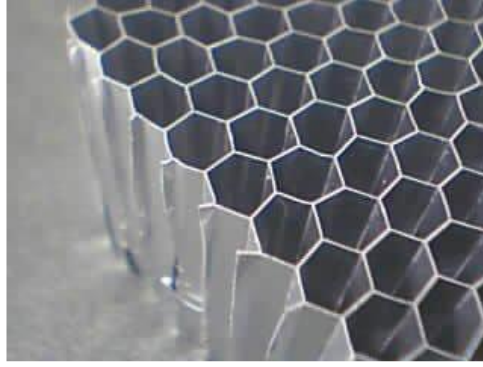
Renk	A Bileşeni	Beyaz
	B Bileşeni	Koyu Gri
Karışım Oranı	A Bileşeni	3
	B Bileşeni	1
Yoğunluk	1,7 kg/litre = 1,7 gr/cm ³	
Kullanım Sıcaklığı	+5 °C ile +30 °C	

Çizelge 3.2. Sikadur-31 epoksi yapıştırıcı mekanik özellikleri

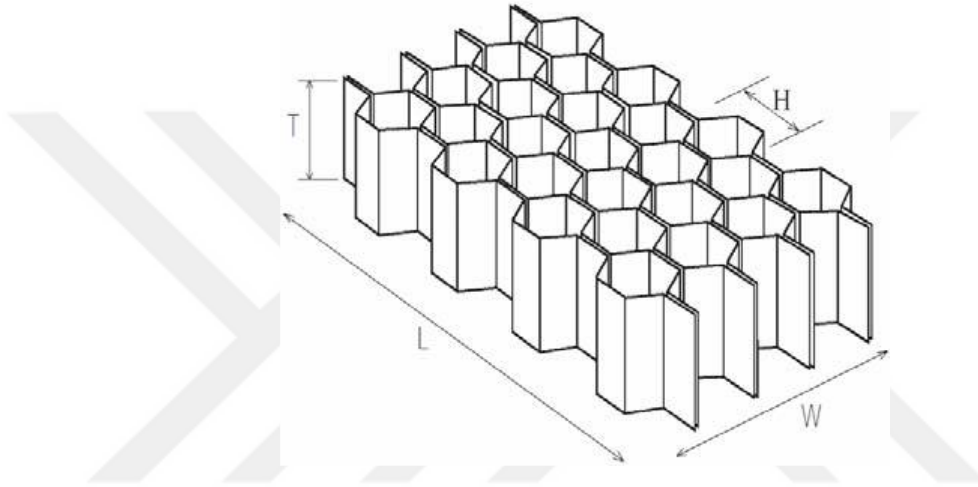
	Kür Süresi	Kür Sıcaklığı	
Basınç Dayanımı	1 gün	+10 °C	35-40 N/mm ²
		+20 °C	40-45 N/mm ²
	10 gün	+10 °C	50-60 N/mm ²
		+20 °C	60-70 N/mm ²
Eğilmede Çekme Dayanımı	10 gün	+10 °C ile +20 °C	30-40 N/mm ²
Çekme Dayanımı	10 gün	+10 °C ile +20 °C	15-20 N/mm ²
Yapışma Dayanımı	10 gün (Betona)	+10 °C ile +20 °C	3,0-3,5 N/mm ²
Elastisite Modülü	4300 N/mm ²		

3.1.5. Bal peteği (Honeycomb) sandviç panel

Güçlendirme malzemesi olarak çekirdek kısmı alüminyum, yüzey kaplaması cam takviyeli polyesterden imal edilen bal peteği sandviç panel (CTP kaplı honeycomb sandviç panel) kullanılmıştır. Bu çalışmada çekirdek yüksekliği deney değişkeni olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında 6 mm, 11 mm, 14,3 mm çekirdek yüksekliğine sahip üç farklı CTP kaplı honeycomb sandviç panel temin edilmiştir.



Şekil 3.3 Alüminyum honeycomb çekirdeği (Subaşı vd, 2017)



Şekil 3.4. Honeycomb çekirdek kısmı (Bitzer, 1997)

Deneyisel çalışmada kullanılan honeycomb malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Honeycomb sandviç panelin fiziksel özellikleri

Panel Tipi	Çekirdek Yüksekliği (T)	Çekirdek Genişliği (H)	Genişlik (W)	Uzunluk (L)	CTP Levha Kalınlığı	
					Üst Levha	Alt Levha
Panel 1	6	10,39	150	2100	1	1
Panel 2	11	10,39	150	2100	1	1
Panel 3	14,3	10,39	150	2100	1	1
Tüm ölçüler mm cinsindendir.						

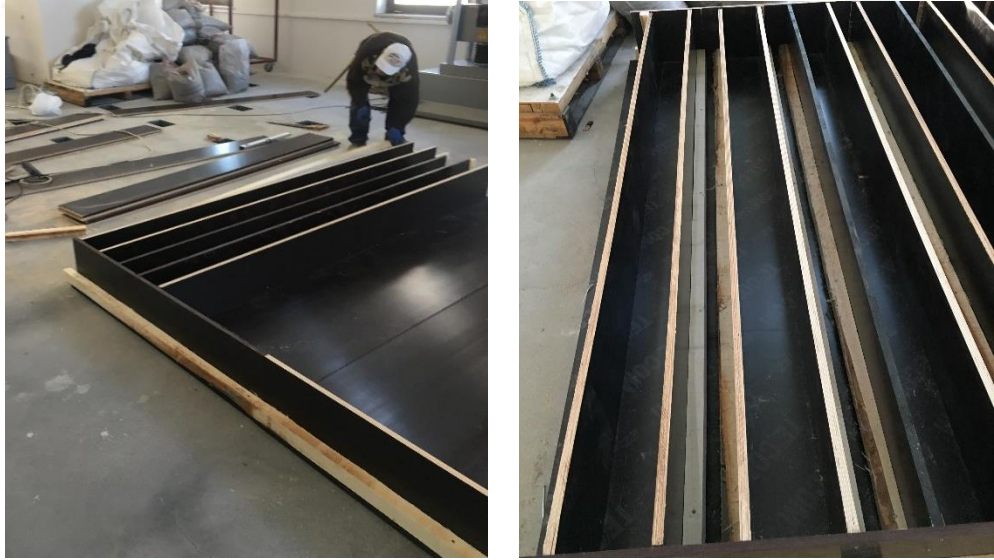
3.2. Deney Elemanlarının Üretilmesi ve Detaylandırılması

Bu bölümde gerekli malzemelerin temin edilmesinden sonra betonarme kiriş numunelerinin üretilmesi ve isimlendirilmesinden bahsedilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarının gerçeği yansıtabilmesi için kiriş deney numunelerinin aynı karakteristik özellikte malzemelerden üretilmesine özen gösterilmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında 150x250x2400 mm boyutlarında 12 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Bu kirişlerden üç tanesi güçlendirme işlemi uygulanmayan referans kiriş olarak belirlenmiştir. Diğer dokuz kirişin, üç tanesi Panel 1 ile üç tanesi Panel 2 ile, kalan üç tanesi de Panel 3 ile güçlendirilmiştir.

3.2.1. Deney elemanlarının üretilmesi

Deney elemanlarının aynı beton örneği ile üretilmesine imkân sağlayacak şekilde plywood kalıp hazırlığı yapılmıştır (Şekil 3.5). Kalıp, yan ve üst bölgelerinden takviyelerle desteklenmiştir.

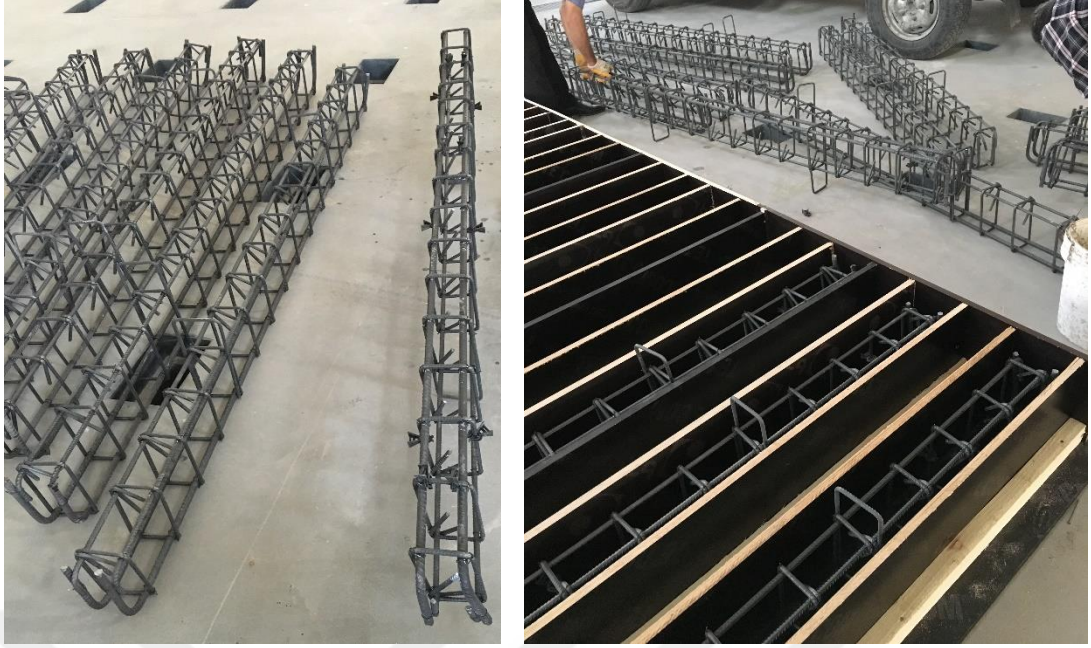


Şekil 3.5. Deney elemanları kalıp hazırlığı

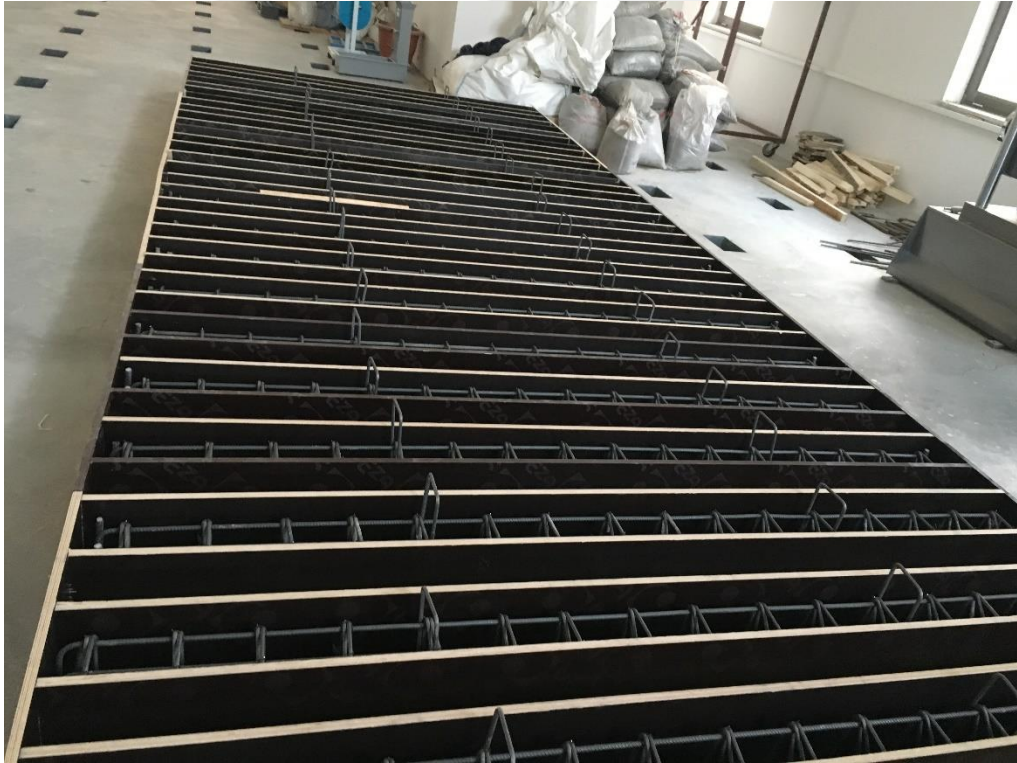


Şekil 3.6. Deney elemanları kalıbı

Betonarme kiriş numunelerinin tasarlanmasından sonra donatı seçimi yapılmıştır. 150x250x2400 mm boyutlarına sahip kirişlerin tümünde basınç donatısı olarak 2 adet Ø10, çekme donatısı olarak 2 adet Ø14 nervürlü demir kullanılmıştır. Oluşacak kesme kuvvetinin karşılanabilmesi için tüm kirişlerde 150 mm aralıklarla Ø8 çapında etriyeler kullanılmıştır. Beton pas payının 25 mm olması için plastik pas payı elemanları kullanılmıştır. Betonarme kiriş numunelerinin taşınabilmesi amacıyla kirişlerin üst yüzeyine 2 adet kanca yerleştirilmiştir. Deneyde kullanılan donatı çeliklerinden üçer adet numune alınıp çekme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.7. Deney elemanları donatı hazırlığı



Şekil 3.8. Beton dökümü öncesi hazırlığı tamamlanmış deney elemanları

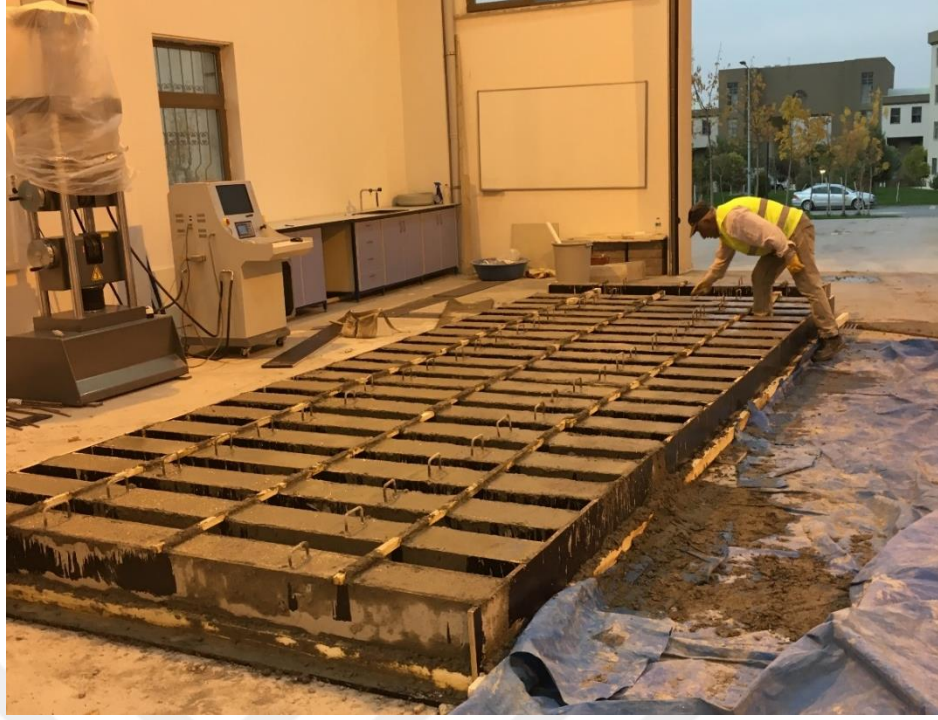
Kalıbı ve donatısı hazırlanan deney elemanları (Şekil 3.8) için C20/25 hazır beton kullanılmıştır. Döküm esnasında betonun homojen olarak yerleşmesi için vibratör kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Beton dökümü öncesi hazırlık aşaması

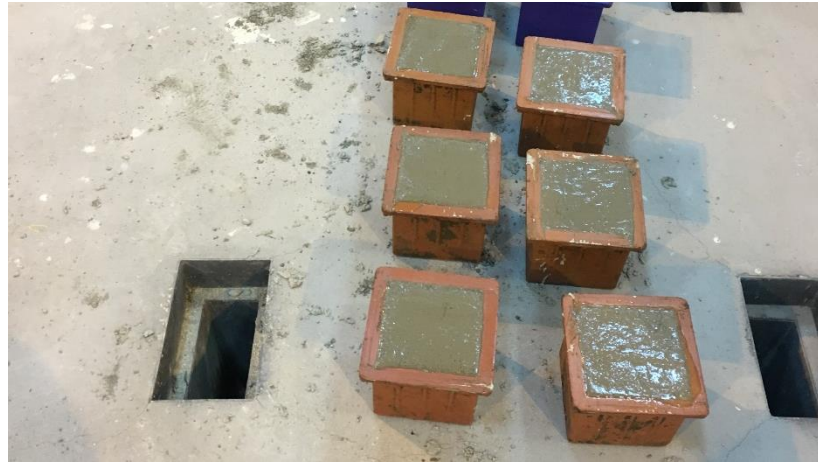


Şekil 3.10. Beton dökümü ve vibrasyon işlemi



Şekil 3.11. Beton dökümü sonrası deney elemanları yüzey masterlama işlemi

Beton basınç dayanım değerinin belirlenebilmesi için döküm esnasında 150x150x150 mm boyutlu 6 adet küp numune alınmıştır. Alınan numunelerin üç tanesi 7 gün; kalan üç tanesi 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir.



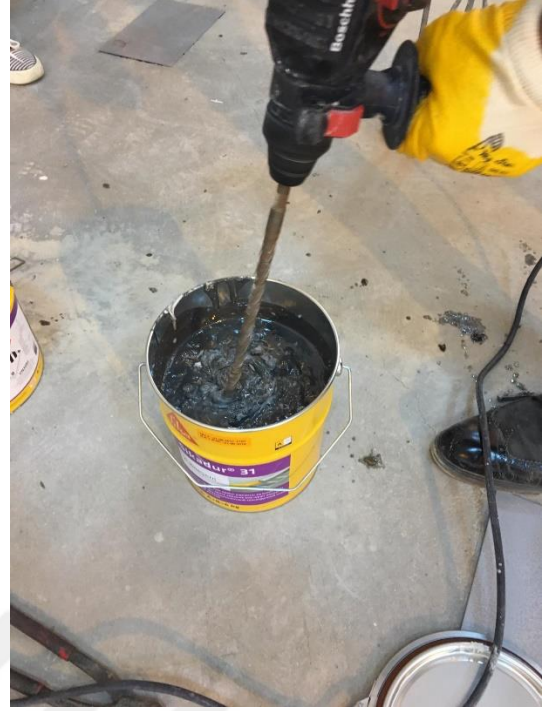
Şekil 3.12. Beton dökümü esnasında alınan küp numuneler

Üretilen deney elemanlarının alt yüzeyine güçlendirme işlemi için honeycomb sandviç panel yapıştırılmıştır. Güçlendirme işlemi öncesinde yapıştırılacak sandviç paneller ve yapıştırma yüzeylerinin tozdan, kirden ve nemden arındırılması için bazı işlemler uygulanmıştır. Deney elemanlarının alt yüzeyleri, zımparalanarak pürüzler giderilmiştir. Toz ve kirden arındırılması için fırçalanarak su ile temizlenmiştir. Honeycomb sandviç paneller ise yapıştırma işlemi öncesinde tiner ile silinerek koruyucu yağ tabakasından arındırılmıştır.



Şekil 3.13. Deney elemanlarının yüzey temizliğinin yapılması

Güçlendirme işlemi için hazır olan kiriş ve honeycomb sandviç panellerin birbirine yapıştırılması için epoksi bazlı reçine olan Sikadur-31 kullanılmıştır. Yapıştırıcı kullanıma hazır hale getirilirken A ve B bileşenleri 3/1 oranında tartılmıştır. İki bileşen dakikada 600 devir yapan bir karıştırıcı ile yumuşak, sürülebilir kıvamlı açık gri tonlu homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Üretici firmanın verdiği bilgiler doğrultusunda hava sıcaklığının 30 °C'nin üzerinde olması sebebiyle, hazırlanan yapıştırıcı karıştırma süresi dâhil olmak kaydıyla 30 dakika içerisinde kullanılmıştır.



Şekil 3.14. Sikadur-31 epoksi yapıştırıcının hazırlanması

Yapıştırıcı spatula ve mala yardımıyla kirişlerin alt yüzeyine kalınlığı en az 1 mm olacak şekilde sürülmüştür. Beton yüzey ve sandviç paneller arasında 1 mm çapında tel parçaları konularak sıkıştırma işlemi sonrasında yapıştırıcı kalınlığının en az 1 mm olması sağlanmıştır (Arslan, 1991; Uysal, 2006).



Şekil 3.15. Hazırlanan Sikadur-31 epoksi yapıştırıcının kiriş yüzeyine sürülmesi

Deneyisel çalışma kapsamında honeycomb sandviç panellerin güçlendirmeye etkisinin ölçülebilmesi için yüksek mukavemetli bir yapısal yapıştırıcı olan Sikadur-31'in 1mm kalınlığında sürülmesi uygun görülmüştür. Dikkat edilmesi gereken nokta, Sikadur-31'in priz süresi içerisinde kullanılmasıdır. Hava koşullarından ötürü kullanım süresine dikkat edilmediğinde priz alarak katılaşmakta ve kullanılamamaktadır (Şekil 3.16) .



Şekil 3.16. Erken priz alan Sikadur-31 epoksi yapıştırıcı

Kiriş alt yüzeyleri epoksi bazlı yapıştırıcı ile kaplandıktan sonra CTP kaplı alüminyum Honeycomb sandviç paneller yüzeylere yapıştırılmıştır (Şekil 3.17). Sandviç panel ve kiriş yüzeyleri arasındaki yapıştırma işleminin tüm kiriş yüzeyinde eşit olması için sandviç paneller üzerine eşit ağırlık ve mesafede yükler bindirilmiştir.



Şekil 3.17. Honeycomb panellerin Sikadur-31 ile kiriş yüzeyine yapıştırılması

3.2.2. Deney elemanlarının isimlendirilmesi

Deney elemanlarının isimlendirilmesinde bölüm 3.1.5 de belirtilen değişkenler göz önünde bulundurulmuştur. İsimlendirilmede kullanılan K harfi kiriş kelimesini simgelemektedir. Güçlendirme yapılmayan kirişlerin belirtilmesi için yalın kiriş anlamına gelen KY ifadeleri kullanılmıştır. Yalın kirişlerden 3 adet bulunmaktadır ve KY-1, KY-2, KY-3 şeklinde birbirinden ayırt edilmesi sağlanmıştır.

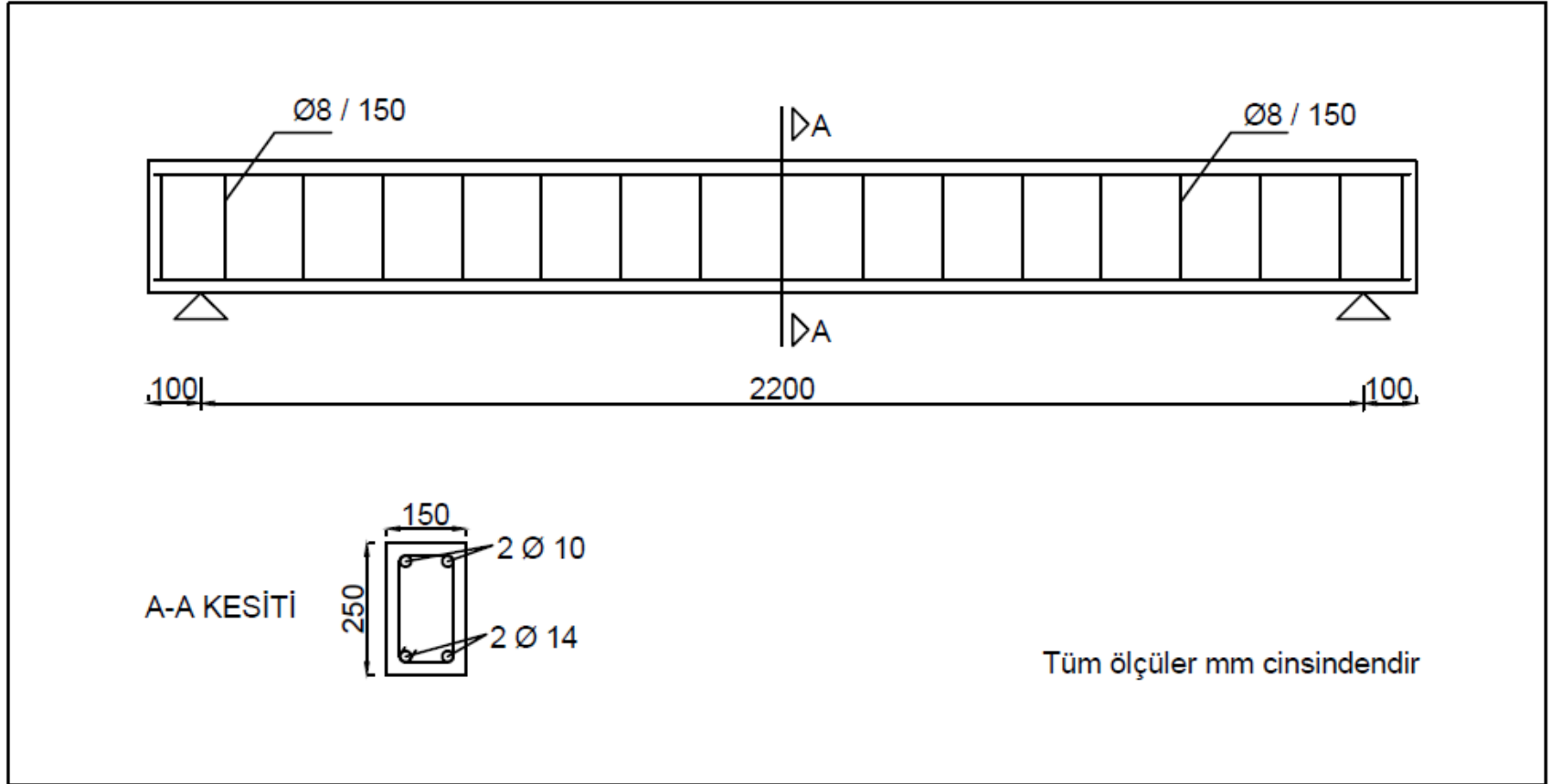
Güçlendirme yapılan kirişlerin belirtilmesi için, güçlendirme malzemesi olarak kullanılan Honeycomb sandviç panelin ilk harfinden esinlenilerek KH ifadesi kullanılmıştır. Sandviç panel yüksekliklerinin farklı olması sebebiyle, 6 mm yüksekliğe sahip paneller birinci seri, 11 mm yüksekliğe sahip paneller ikinci seri, 14,3 mm yüksekliğe sahip paneller üçüncü seri olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, güçlendirilen kirişler KH1, KH2, KH3 şeklinde ifade edilmiştir. Birinci seride 3 adet kiriş bulunmaktadır ve KH1-1, KH1-2, KH1-3 şeklinde birbirinden ayırt edilmesi sağlanmıştır. Aynı şekilde isimlendirme yapılarak ikinci (KH2-1, KH2-2, KH2-3) ve üçüncü serideki (KH3-1, KH3-2, KH3-3) kirişlerin de birbirinden ayırt edilmesi sağlanmıştır. Yapılan isimlendirme Çizelge 3.4' te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Deney elemanlarının isimlendirilmesi

Numune Adı	Kiriş Boyutları	Basınç Donatısı	Çekme Donatısı	Etriye Donatısı	Sandviç Panel Çekirdek Yüksekliği
KY-1	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	-
KY-2	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	-
KY-3	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	-
KH1-1	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	6
KH1-2	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	6
KH1-3	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	6
KH2-1	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	11
KH2-2	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	11
KH2-3	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	11
KH3-1	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	14,3
KH3-2	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	14,3
KH3-3	150×250	2Ø10	2Ø14	Ø 8/15	14,3
Tüm ölçüler mm cinsindendir.					

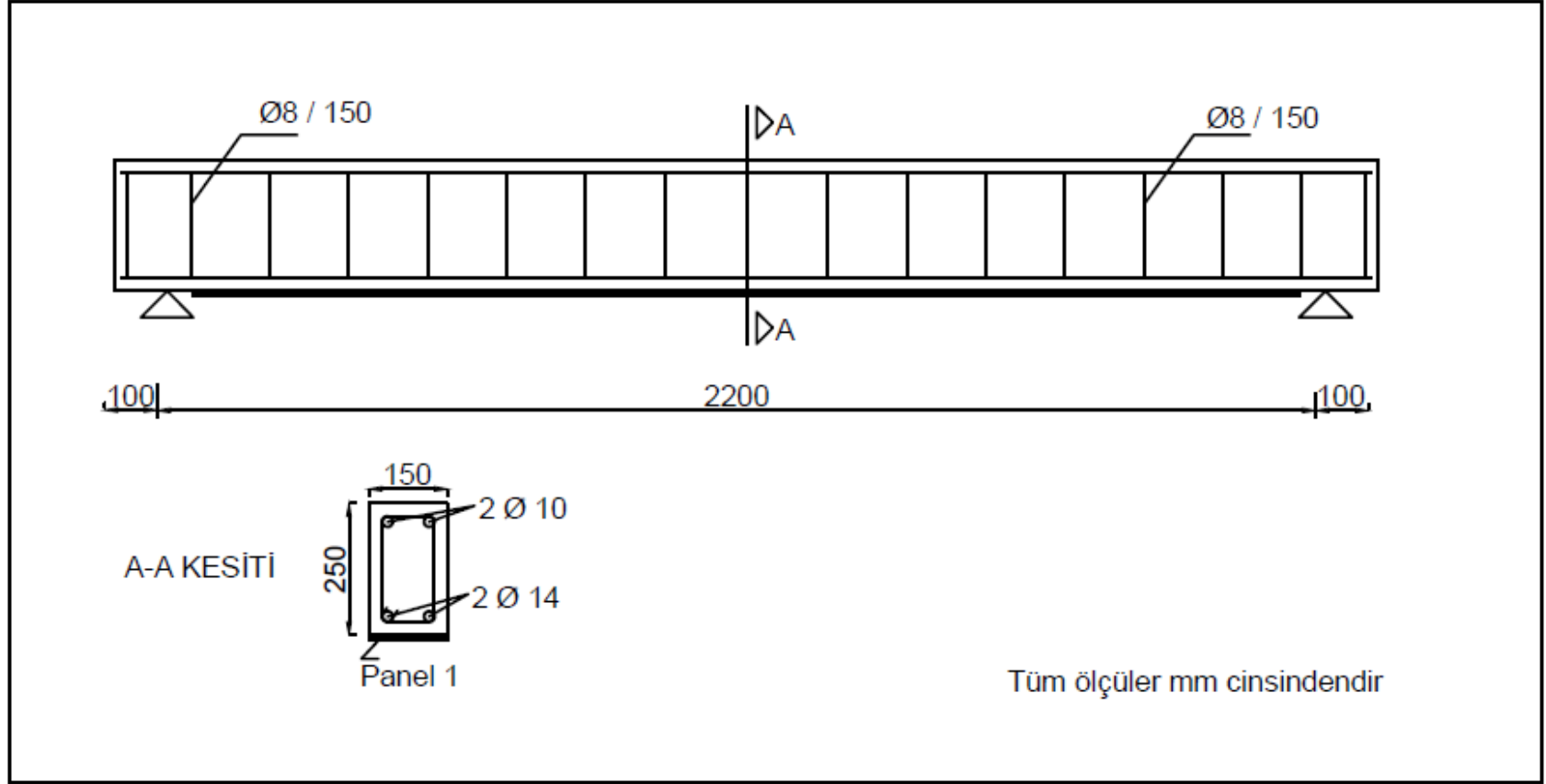
3.2.3. Deney elemanlarının detaylandırılması

Güçlendirme çalışması yapılmayarak referans olarak kullanılan KY-1, KY-2 ve KY-3 yalın deney elemanlarının detayı Şekil 3.18’ de verilmiştir.



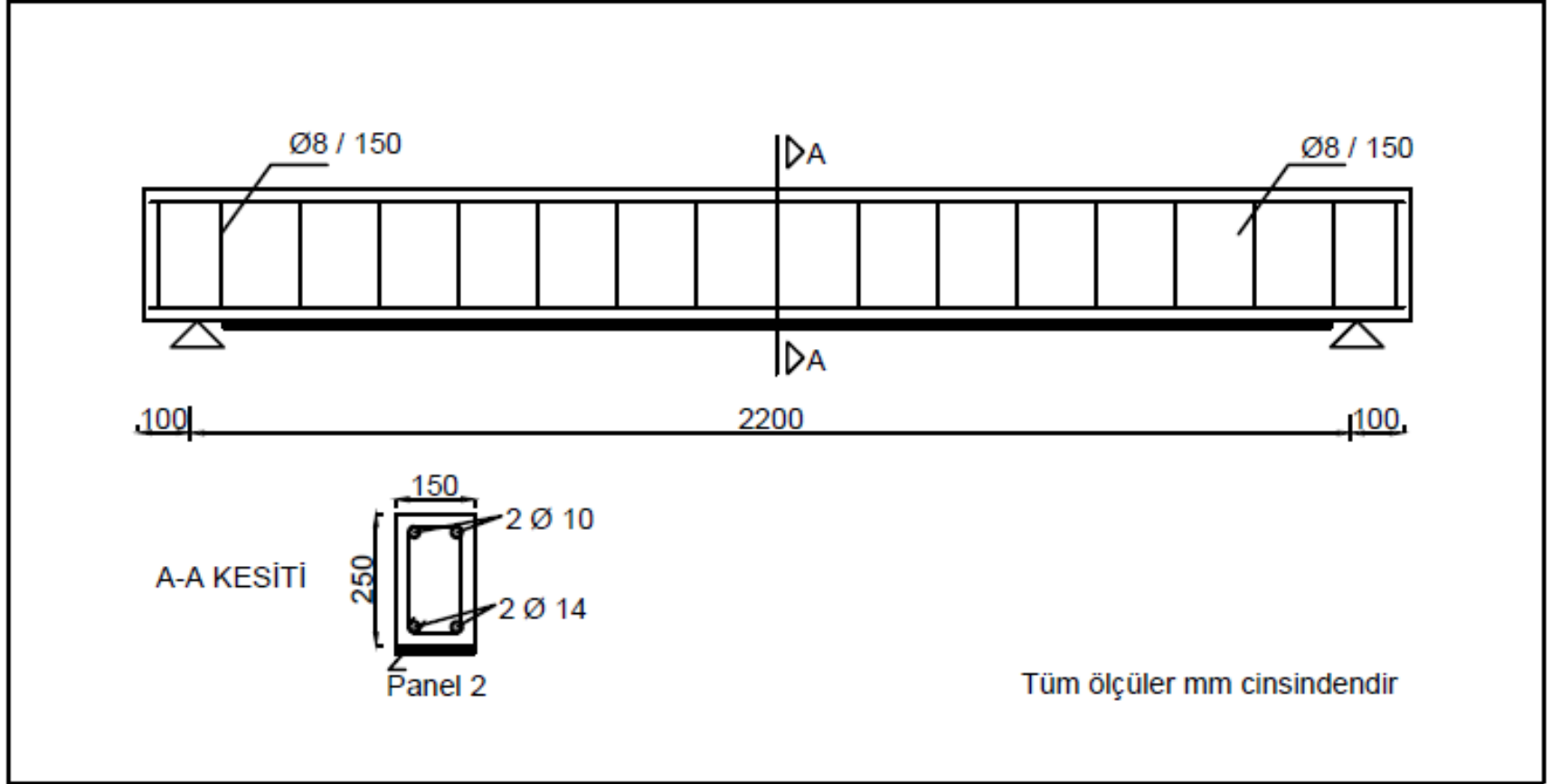
Şekil 3.18. KY-1, KY-2 ve KY-3 deney elemanlarının detaylandırılması

6 mm çekirdek yüksekliğine sahip CTP kaplı alüminyum Honeycomb ile güçlendirilen KH1-1, KH1-2 ve KH1-3 deney elemanlarının detayı Şekil 3.19’ da verilmiştir.



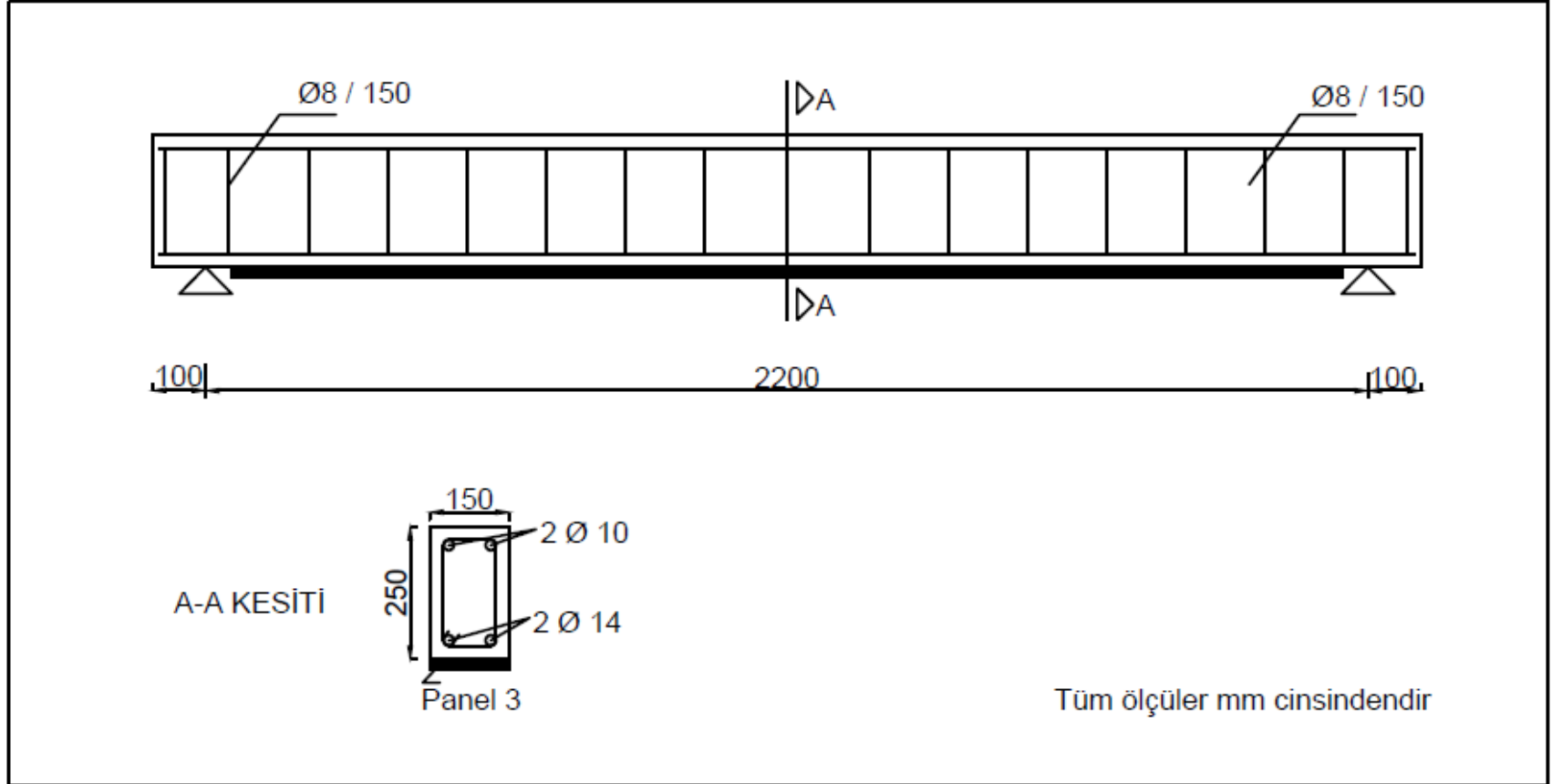
Şekil 3.19. KH1-1, KH1-2 ve KH1-3 deney elemanlarının detaylandırılması

11 mm çekirdek yüksekliğine sahip CTP kaplı alüminyum Honeycomb ile güçlendirilen KH2-1, KH2-2 ve KH2-3 deney elemanlarının detayı Şekil 3.20’ de verilmiştir.



Şekil 3.20. KH2-1, KH2-2 ve KH2-3 deney elemanlarının detaylandırılması

14,3 mm çekirdek yüksekliğine sahip CTP kaplı alüminyum Honeycomb ile güçlendirilen KH3-1, KH3-2 ve KH3-3 deney elemanlarının detayı Şekil 3.21’ de verilmiştir.



Şekil 3.21. KH3-1, KH3-2 ve KH3-3 deney elemanlarının detaylandırılması

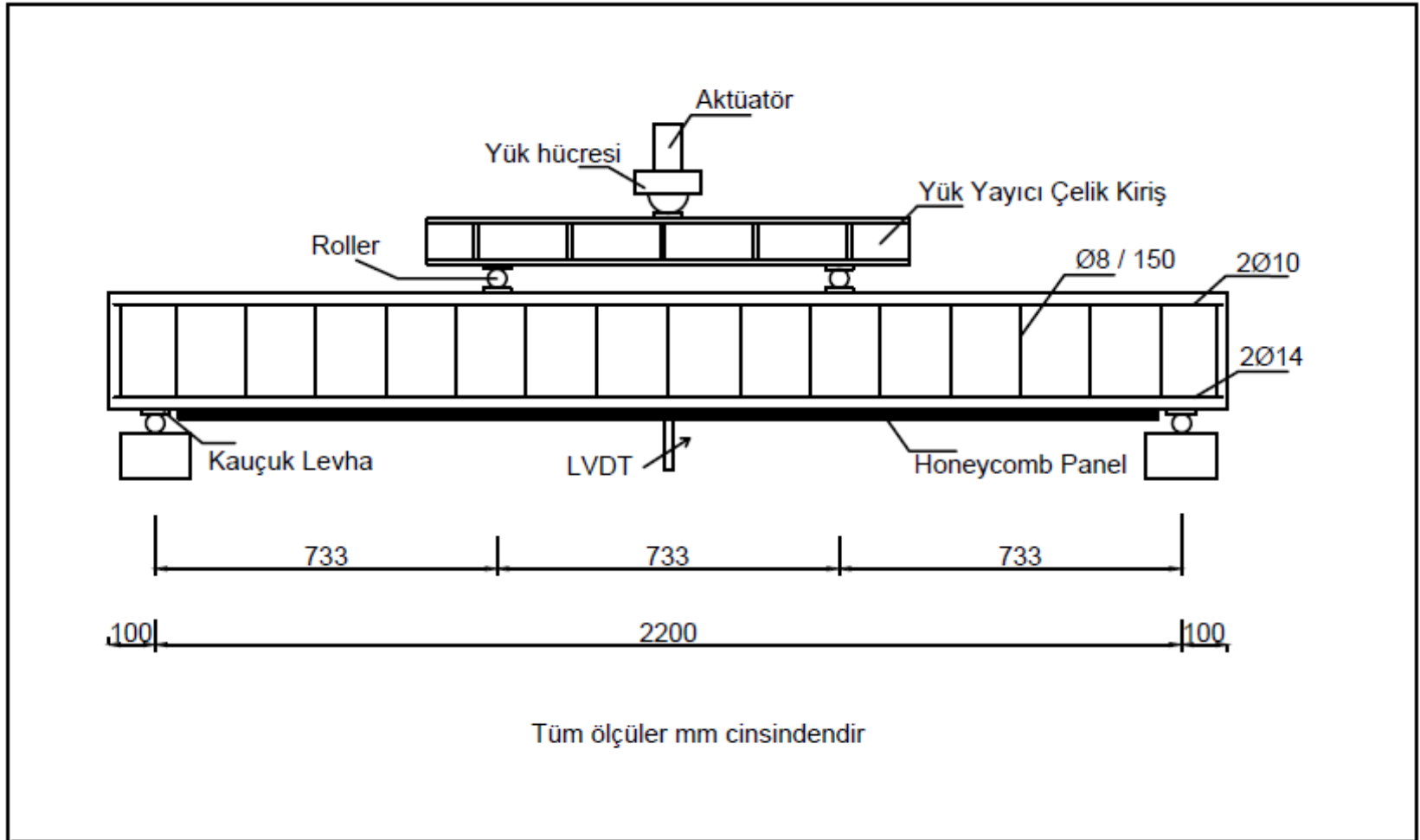
3.3.Deney Düzeneği

Deneyler, İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Betonarme kiriş deney elemanlarına yükleme yapmak amacıyla 80 ton kapasiteli çelik yük çerçevesi kullanılmıştır (Şekil 3.22). Çerçeve, reaksiyonları kendi içinde deney elemanına iletmektedir. Yükleme, deplasman kontrollü hidrolik servo-kontrol ünitesi yardımıyla gerçekleştirilmiş ve rijit çelik kiriş ile deney elemanlarına aktarılmıştır. Yüken büyüklüğü aktüatör üzerinde bulunan yük hücresi (loadcell) ile ölçülmüştür. Yüken hücresi çelik kirişin tam ortasına yerleştirilmiş ve yüklemeye sıfırdan başlayıp göçme meydana gelene kadar devam edilmiştir. Deney elemanlarının tam orta noktasına LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) yerleştirilerek her yük değerine karşılık gelen deplasman değerleri datalogger aracılığıyla bilgisayar ortamına anlık olarak aktarılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.23' te gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Eğilme deney düzeneği



Şekil 3.23. Eğilme deney düzeneğinin detaylandırılması

Deney düzeneği hazırlanırken deney elemanları basit mesnetli kiriş şeklinde mesnetlenmiştir. Kirişin bir ucu sabit mesnet iken diğer ucu hareketli mesnet olarak hazırlanmıştır. Deney modelinde kesme kuvvetinin olmadığı, basit eğilme etkisindeki bir bölgenin oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaçla dört noktalı yükleme sistemi oluşturulmuştur. Yük aralığı düzgün yayılı yük altında oluşan moment diyagramını kapsayacak şekilde belirlenerek, mesnetlerden $L/3$ kadar uzaklıkta yerleştirilmiştir. Böylece P büyüklüğündeki tekil yük, $P/2$ büyüklüğünde eşit iki tekil yük halinde deney elemanlarına iletilmiştir.

Deney esnasında, 6 mm kalınlığa sahip 75x150 mm ebadında dikdörtgen kauçuk parçalar kullanılmıştır. Mesnetler ile kiriş alt ve üst yüzeyleri arasına yerleştirilen kauçuk parçalar sayesinde kirişlerin mesnet bölgelerinden ezilmesi önlenmiştir.

3.4.Ölçüm Tekniği

Deney elemanlarının orta nokta deplasmanını ölçmek amacıyla kiriş orta noktasına LVDT yerleştirilmiştir. Yük ölçümü ise yük hücresi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. LVDT'lere gelen anlık veriler bir okuyucu tarayıcıdan geçtikten sonra bilgisayara kaydedilmiştir. Saniyede 10 veri okunarak anlık olarak yük-deplasman değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.24. Deneylerde kullanılan veri aktarım sistemi ve bilgisayar programı
(Başsürücü, 2013)

Yük hücrelerinden aktarılan değerler UTEST Veri Toplama Yazılım Programı aracılığıyla, bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Veri toplama sisteminin temel fonksiyonu, sensörlerden gelen, yavaş değişen (statik/dinamik) sinyalleri dijital veriye çevirerek bilgisayar ortamına aktarmaktır. Deneyler sırasında; yük hücresi ve LVDT'den alınan veriler, veri toplama kutusuna (datalogger)

iletilmiştir. Yazılım programı sayesinde alınan tüm okumalar Excel programında düzenlenmiştir.

Deneylerde kullanılan LVDT ve yük hücresinin kalibrasyonları laboratuvarında hassas bir şekilde yapılmıştır. Aynı zamanda deney sırasında kirişteki deplasman ile yük değişimi bilgisayar ekranında grafik olarak izlenmiştir. Deney boyunca Novotechnik marka LVDT ve KYOWA marka datalogger kullanılmıştır.

Yük-deplasman grafikleri deney sonuçlarının değerlendirilmesi açısından oldukça önemli verilerdir. Bu grafiklerle kirişlerin deney boyunca davranışları yorumlanabilmektedir.

3.5.Deney Aşaması

Deney programında yer alan tüm deney elemanları, deney çerçevesine mesnet ve merkez noktalarına, yük aralıklarına dikkat edilerek özenle yerleştirilmiştir. Yerleştirilme işleminden sonra yükleme ve ölçüm aletleri bağlanmış ve deneye başlanmıştır. Yükleme deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiş ve saniyede 3 mikron yükleme yapılarak, deney elemanlarının deplasman değerleri ölçülmüştür. Aynı zamanda deney esnasında anlık olarak yük- deplasman grafiği çizilmiştir. Deney sırasında meydana gelen olaylar, elemanda fark edilen tüm değişiklikler kayıt altına alınmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde; deneyde kullanılan beton ve donatı özellikleri ile 12 adet deney elemanı üzerinde yapılan eğilme deneyi sonucunda elde edilen veriler yer almaktadır.

4.1.Beton Basınç Deneyi

Deney elemanları hazırlanırken 6 adet 150×150 mm küp numune alınmıştır. Alınan numunelerden üç tanesi 7 gün, kalan üç tanesi 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. Kür süresi tamamlanan numuneler basınç testine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler Çizelge 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kür süresi tamamlanan numunelerin basınç dayanım testine tabi tutulması

Çizelge 4.1 Karakteristik basınç dayanım değerleri

Numune Adı	Numune Yaşı (gün)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	7	20,9
2	7	20,3
3	7	20,4
4	28	27,3
5	28	26,9
6	28	26,2

Beton sınıfının; basınç dayanım değerleri TS EN 206-1 standardına göre değerlendirildiğinde C20/25 olduğu görülmektedir.

4.2. Donatı Çeliği Çekme Deneyi

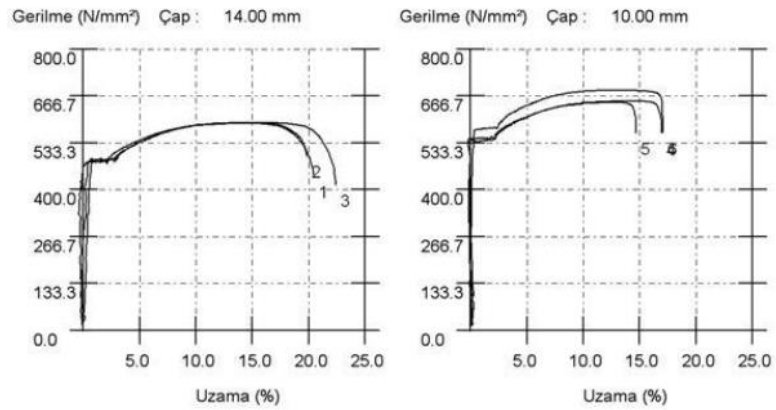
Deney elemanları hazırlanırken Ø10 ve Ø14 donatılarından üçer adet numune alınıp çekme deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler Çizelge 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Donatı çeliği çekme deneyi

Çizelge 4.2. Donatı özellikleri

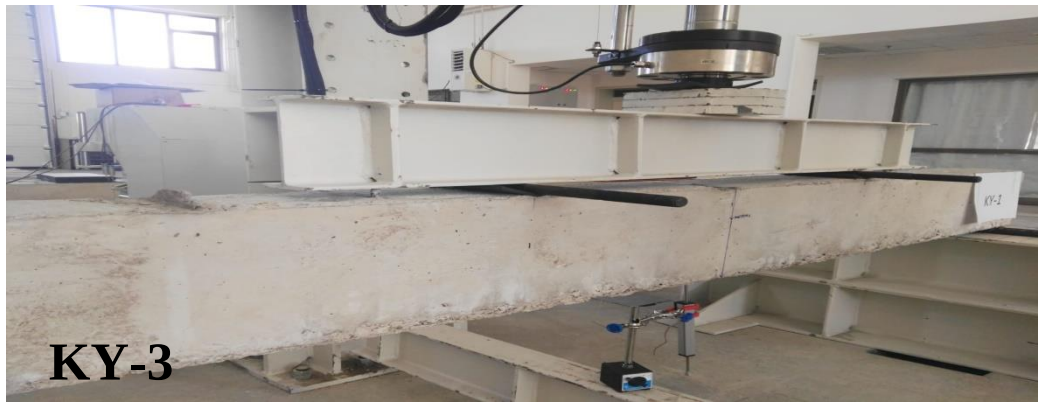
Numune Adı	Çelik Sınıfı	Numune Çapı (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)
1	S420	Ø14	480,69	588,85
2	S420	Ø14	480,31	591,06
3	S420	Ø14	482,78	591,19
4	S420	Ø10	543,69	651,97
5	S420	Ø10	519,36	648,03
6	S420	Ø10	570,57	683,31



Şekil 4.3. Donatı çeliği Gerilme-Uzama grafikleri

4.3.KY-1, KY-2 ve KY-3 (Yalın Kirişler) Eğilme Deneyi

Herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmayan yalın deney elemanları KY-1, KY-2 ve KY-3 kirişleri, güçlendirilmemiş eleman davranışını ortaya çıkarmak amacıyla deneye tabi tutulmuştur.



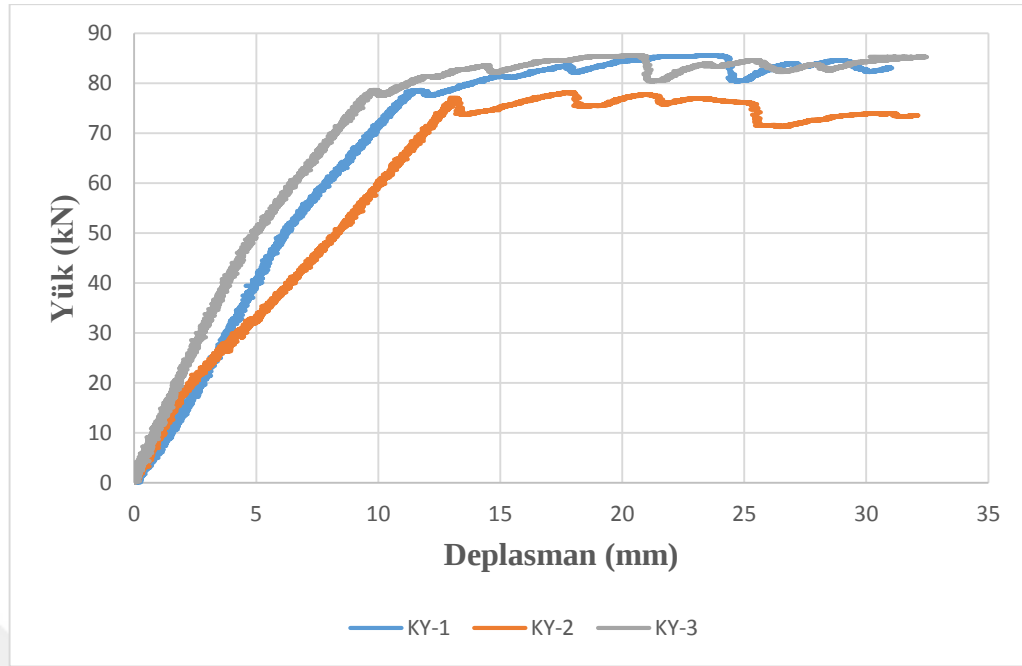
Şekil 4.4. Referans kirişlerin deney öncesi fotoğrafları

Eğilme deneyi sonrasında referans kirişlerin görüntüleri Şekil 4.5’ te verilmiştir.



Şekil 4.5. Referans kirişlerin deney sonrası fotoğrafları

Güçlendirme çalışması yapılmayan referans kirişler, başlangıçtan göçme anına kadar arttırılan düşey yükleme ile eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen değerler ile Yük-Deplasman ilişkisi Şekil 4.6.’ da gösterilmiştir.

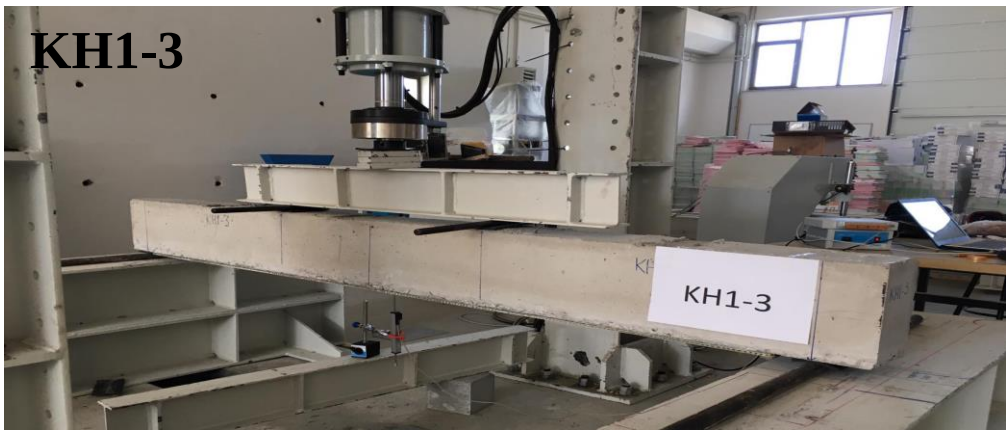
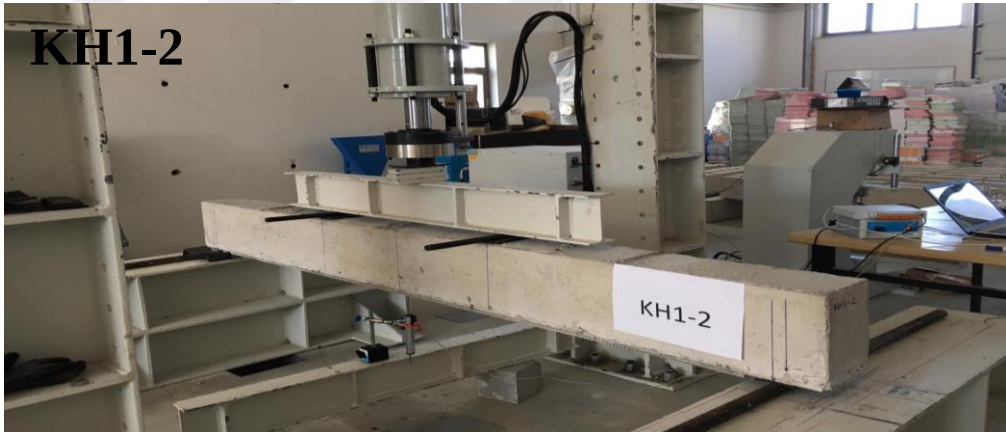


Şekil 4.6. Referans kirişlerin Yük-Deplasman grafikleri

Yük-Deplasman grafiğinden (Şekil 4.6) referans kirişlerin homojen yapıda hazırlandığı anlaşılmaktadır. Grafik verilerinin ortalama değeri referans kirişlerin davranışı olarak baz alındığında, referans kirişlerin 77,36 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır. Akma anındaki orta nokta deplasman değeri ise 11 mm olarak ölçülmüştür. Kirişler yük almaya devam etmiş ve nihai yük taşıma kapasitesi 81,72 kN olarak ölçülmüştür. Nihai yük taşıma kapasitesinden sonra göçme meydana gelmiştir. Deney elemanı üzerindeki yük değeri azalmaya başlarken deplasman değeri artmaya devam etmiş ve maksimum deplasman değeri 33,1 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanlarında kiriş merkez noktasının sağ (Şekil 4.5. KY1 ve KY-3) ve sol (Şekil 4.5. KY2) açıklığında eğilme çatlakları olduğu gözlemlenmiştir.

4.4.KH1-1, KH1-2 ve KH1-3 (Güçlendirilmiş Kirişler) Eğilme Deneyi

CTP kaplı alüminyum honeycomb çekirdekli, 6 mm kalınlığa sahip sandviç panel ile güçlendirilmiş deney elemanlarıdır. Kiriş sağ ve sol uçlarından 150 mm boşluk bırakılarak sandviç panel yapıştırılmıştır.



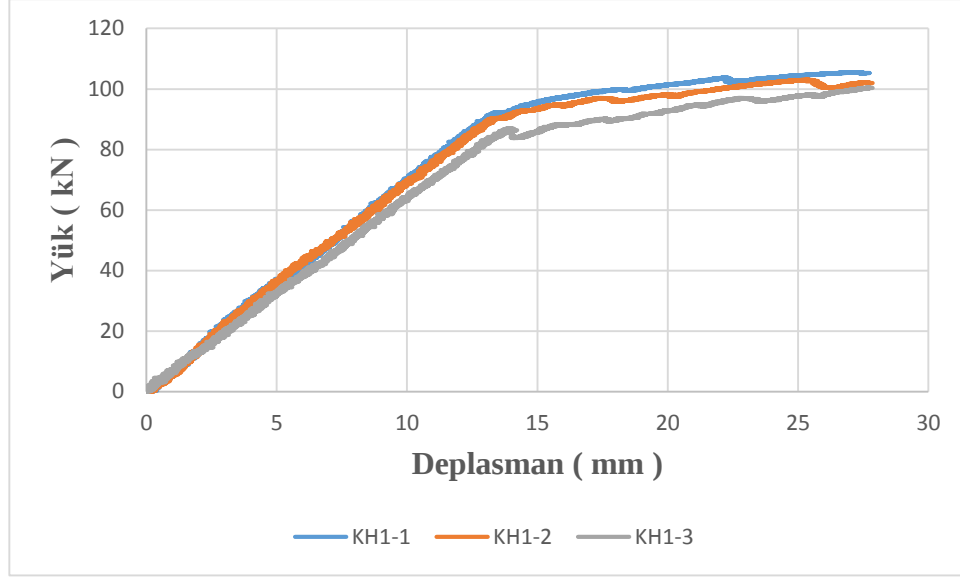
Şekil 4.7. KH1-1, KH1-2 ve KH1-3 kirişlerinin deney öncesi fotoğrafları

Eğilme deneyi sonrasında deney elemanlarının görüntüleri Şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8. KH1-1, KH1-2 ve KH1-3 kirişlerinin deney sonrası fotoğrafları

Panel 1 ile güçlendirilen kirişler, başlangıçtan göçme anına kadar arttırılan düşey yükleme ile eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen değerler ile Yük-Deplasman ilişkisi Şekil 4.9.’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. KH1-1, KH1-2 ve KH1-3 kirişlerinin Yük-Deplasman grafikleri

Yük-Deplasman grafiğinden (Şekil 4.9) güçlendirilmiş kirişlerin homojen yapıda hazırlandığı anlaşılmaktadır. Grafik verilerinin ortalama değeri güçlendirilmiş kirişlerin davranışı olarak baz alındığında, panel 1 ile güçlendirilen kirişlerin 89,5 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır. Akma anındaki orta nokta deplasman değeri ise 14 mm olarak ölçülmüştür. Kirişler yük almaya devam etmiş ve nihai taşıma kapasitesi 102,45 kN olarak ölçülmüştür. Yük artışıyla beraber eğilme çatlaklarının sayısı artmış ve referans kirişlerden farklı olarak kesme-eğilme bölgesinde (mesnet ile yük arasındaki bölgeler) de çatlaklar (Şekil 4.8.KH1-1) oluşmuştur. Bu esnada, yük ve çatlak sayısındaki artışla beraber yapıştırılan honeycomb panel ile kiriş alt yüzeyi arasında kopmalar başlamış ve honeycomb panel kiriş alt yüzeyinden ayrılmıştır (Şekil 4.8.KH1-3). Bu nedenle deney sonlandırılmıştır. Deney elemanı üzerindeki yük değeri azalmaya başlarken deplasman değeri artmaya devam etmiş ve maksimum 27,7 mm deplasman değeri ölçülmüştür.



Şekil 4.10. Honeycomb panelin kiriş yüzeyinden ayrılması



Şekil 4.11. Deney sonrası honeycomb panelin (Panel 1) kiriş yüzeyinden kaldırılması

Deney esnasında uygulanan yükün artmasıyla beraber yapıştırılan honeycomb panel ile beton ara yüz ayrışması gerçekleşmiştir. Bu ayrışmadan sonra honeycomb panelin artık yük taşımayacağı anlaşılmıştır. Yapıştırılan honeycomb panel kiriş alt yüzeyinden ayrılarak güçlendirme işlevini kaybetmiştir. Bu nedenle deney sonlandırılmıştır.

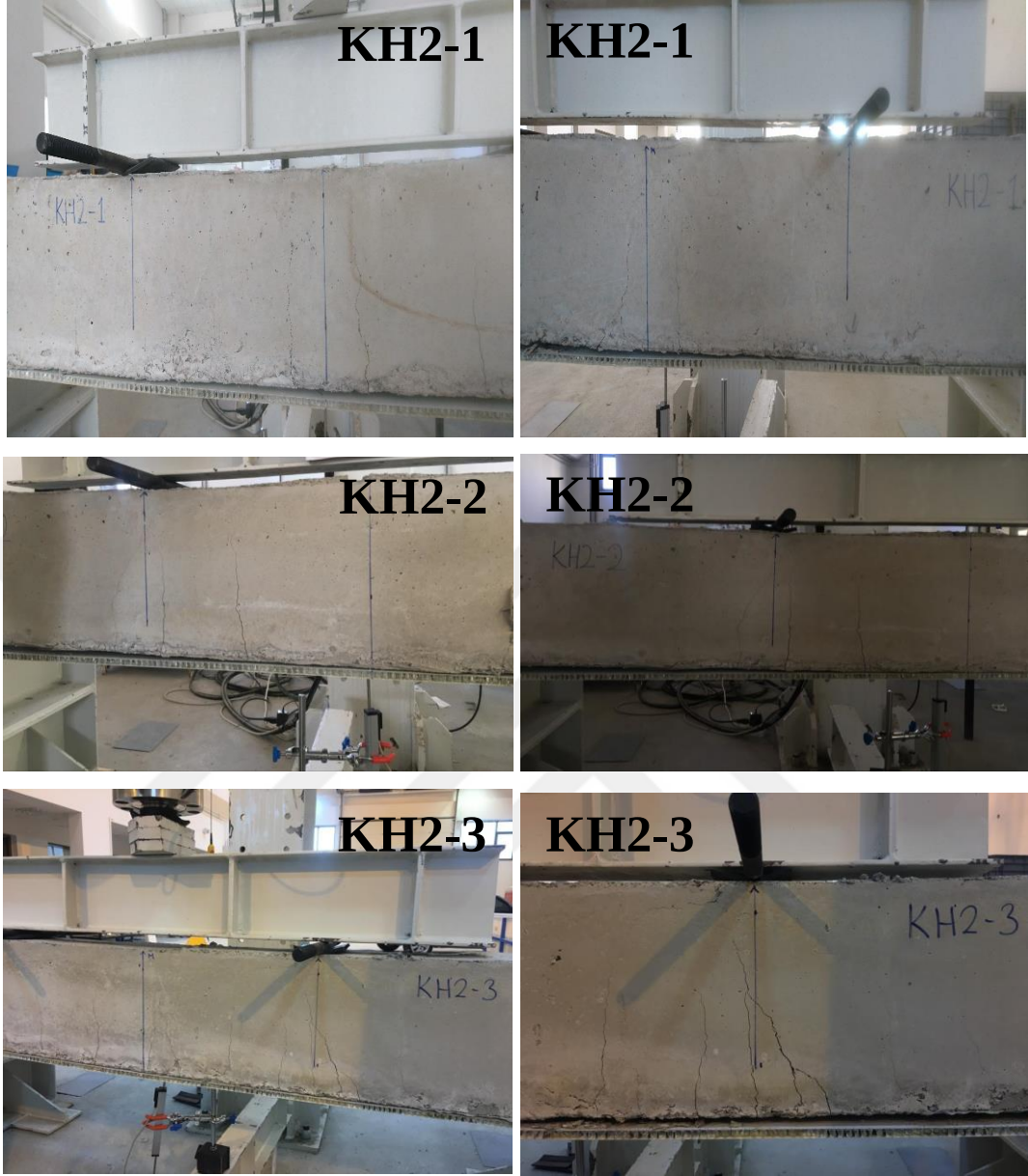
4.5.KH2-1, KH2-2 ve KH2-3 (Güçlendirilmiş Kirişler) Eğilme Deneyi

CTP kaplı alüminyum honeycomb çekirdekli, 11 mm kalınlığa sahip sandviç panel ile güçlendirilmiş deney elemanlarıdır. Kiriş sağ ve sol uçlarından 150 mm boşluk bırakılarak sandviç panel yapıştırılmıştır.



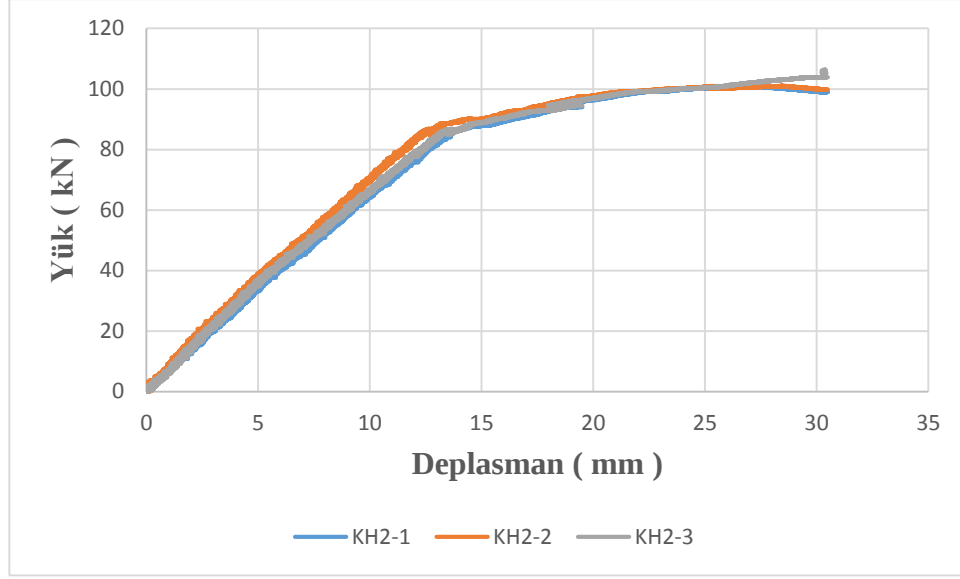
Şekil 4.12. KH2-1, KH2-2 ve KH2-3 kirişlerinin deney öncesi fotoğrafları

Eğilme deneyi sonrasında deney elemanlarının görüntüleri Şekil 4.13.' te verilmiştir.



Şekil 4.13. KH2-1, KH2-2 ve KH2-3 kirişlerinin deney sonrası fotoğrafları

Panel 2 ile güçlendirilen kirişler, başlangıçtan göçme anına kadar arttırılan düşey yükleme ile eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen değerler ile Yük-Deplasman ilişkisi Şekil 4.14.' te gösterilmiştir.

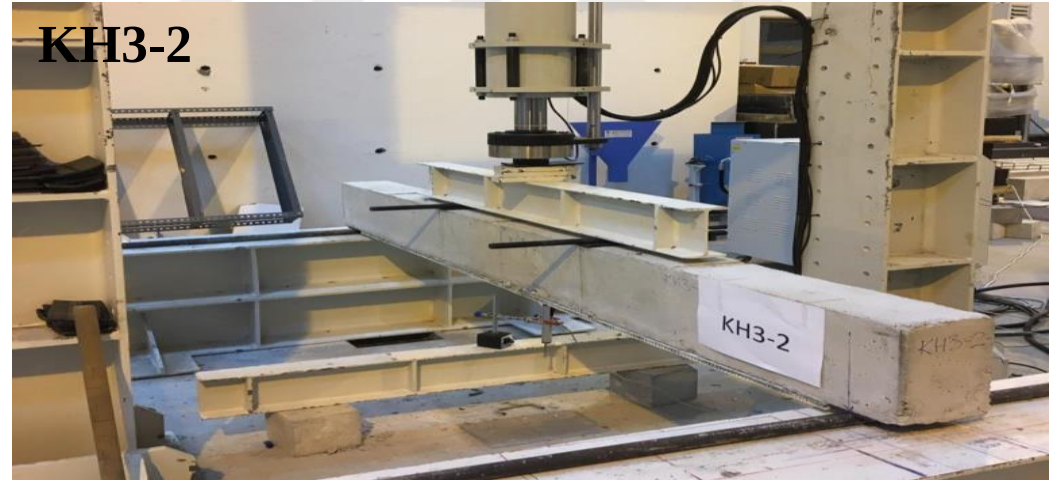
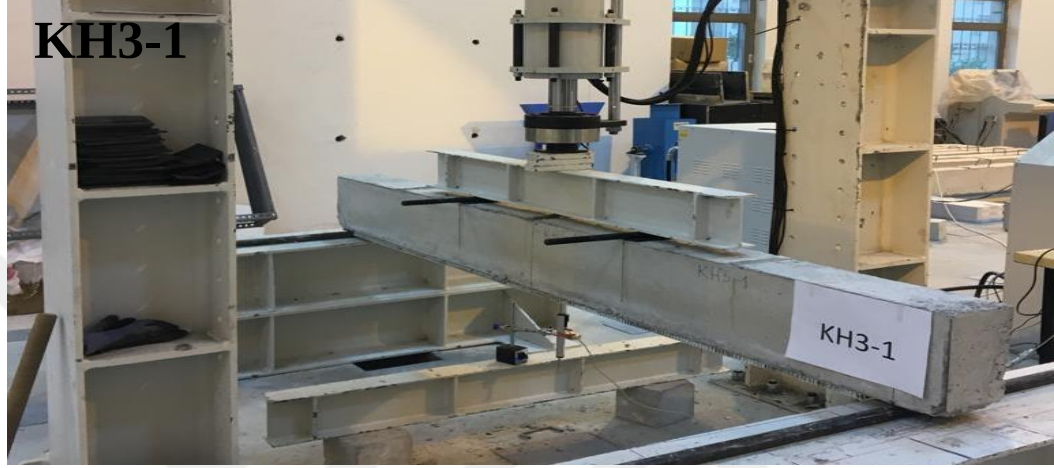


Şekil 4.14. KH2-1, KH2-2 ve KH2-3 kirişlerinin Yük-Deplasman grafikleri

Yük-Deplasman grafiğinden (Şekil 4.14.) güçlendirilmiş kirişlerin homojen yapıda hazırlandığı anlaşılmaktadır. Grafik verilerinin ortalama değeri güçlendirilmiş kirişlerin davranışı olarak baz alındığında, panel 2 ile güçlendirilen kirişlerin 86,35 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır. Akma anındaki orta nokta deplasman değeri ise 13 mm olarak ölçülmüştür. Kirişler yük almaya devam etmiş ve nihai yük taşıma kapasitesi 102,75 kN olarak ölçülmüştür. Yük artışıyla beraber eğilme çatlaklarının sayısı da artmıştır. Referans kirişlerdeki eğilme çatlaklarına ek olarak kesme-eğilme bölgesinde (mesnet ile yük arasındaki bölgeler) de çatlaklar (Şekil 4.13.KH2-3) oluşmuştur. Çatlak sayısının artmaya başlamasıyla beraber honeycomb panel ile kiriş alt yüzeyi arasında kopmalar meydana gelmiştir. Yapıştırılan honeycomb panel kiriş yüzeyinden ayrılarak güçlendirme işlevini kaybetmiştir. Bu nedenle deney sonlandırılmıştır. Deney elemanı üzerindeki yük değeri azalırken deplasman değeri artmaya devam etmiş ve maksimum 30,5 mm deplasman değeri ölçülmüştür.

4.6.KH3-1, KH3-2 ve KH3-3 (Güçlendirilmiş Kirişler) Eğilme Deneyi

CTP kaplı alüminyum honeycomb çekirdekli 14,3 mm kalınlığa sahip sandviç panel ile güçlendirilmiş deney elemanlarıdır. Kiriş sağ ve sol uçlarından 150 mm boşluk bırakılarak sandviç panel yapıştırılmıştır.



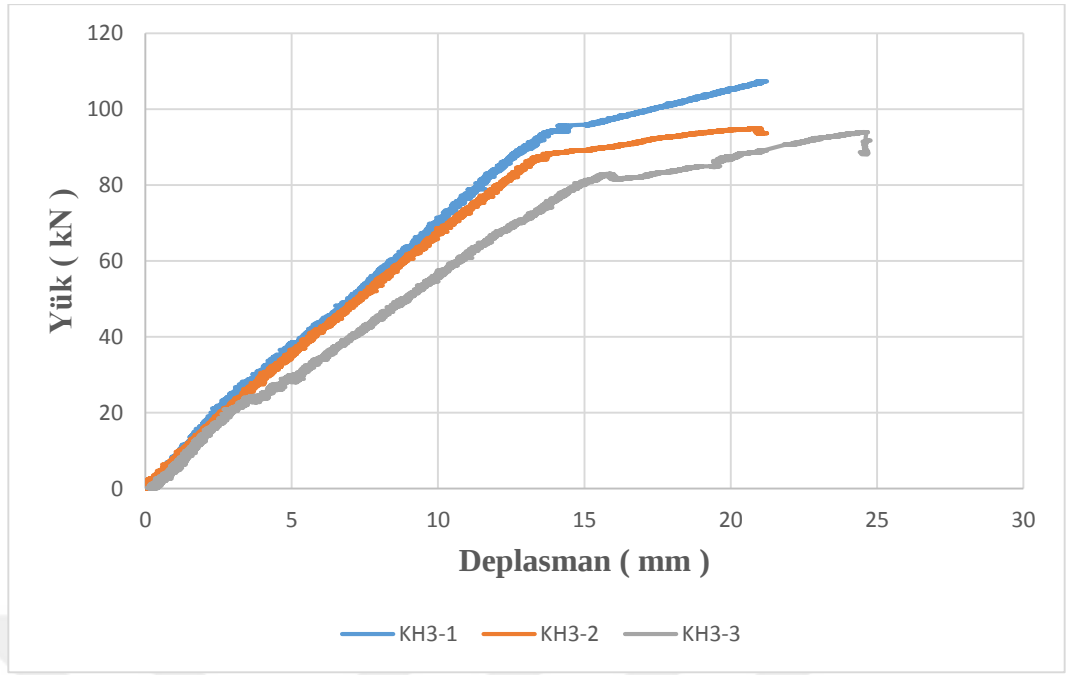
Şekil 4.15. KH3-1, KH3-2 ve KH3-3 kirişlerinin deney öncesi fotoğrafları

Eğilme deneyi sonrasında deney elemanlarının görüntüleri Şekil 4.16.' da verilmiştir.



Şekil 4.16. KH3-1, KH3-2 ve KH3-3 kirişlerinin deney sonrası fotoğrafları

Panel 3 ile güçlendirilen kirişler, başlangıçtan göçme anına kadar arttırılan düşey yükleme ile eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen değerler ile Yük-Deplasman ilişkisi Şekil 4.17.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. KH3-1, KH3-2 ve KH3-3 kirişlerinin Yük-Deplasman grafikleri

Yük-Deplasman grafiğinden (Şekil 4.17) güçlendirilmiş kirişlerin homojen yapıda hazırlandığı anlaşılmaktadır. Grafik verilerinin ortalama değeri güçlendirilmiş kirişlerin davranışı olarak baz alındığında, panel 3 ile güçlendirilen kirişlerin 88,03 kN yük değerinde çekme donatısı akmaya başlamıştır. Akma anındaki orta nokta deplasman değeri ise 14,23 mm olarak ölçülmüştür. Kirişler yük almaya devam etmiş ve nihai yük taşıma kapasitesi 98,31 kN olarak ölçülmüştür. Yük artışıyla beraber eğilme çatlaklarının sayısı da artmıştır. Referans kirişlerdeki eğilme çatlaklarına ek olarak kesme-eğilme bölgesinde (mesnet ile yük arasındaki bölgeler) de çatlaklar (Şekil 4.16.KH3-1) oluşmuştur. Çatlak sayısının artmaya başlamasıyla beraber honeycomb panel ile kiriş alt yüzeyi arasında kopmalar meydana gelmiştir. Yapıştırılan honeycomb panel, kiriş yüzeyinden ayrılarak güçlendirme işlevini kaybetmiştir. Bu nedenle deney sonlandırılmıştır. Deney elemanı üzerindeki yük değeri azalırken deplasman değeri artmaya devam etmiş ve maksimum 22,25 mm deplasman değeri ölçülmüştür.

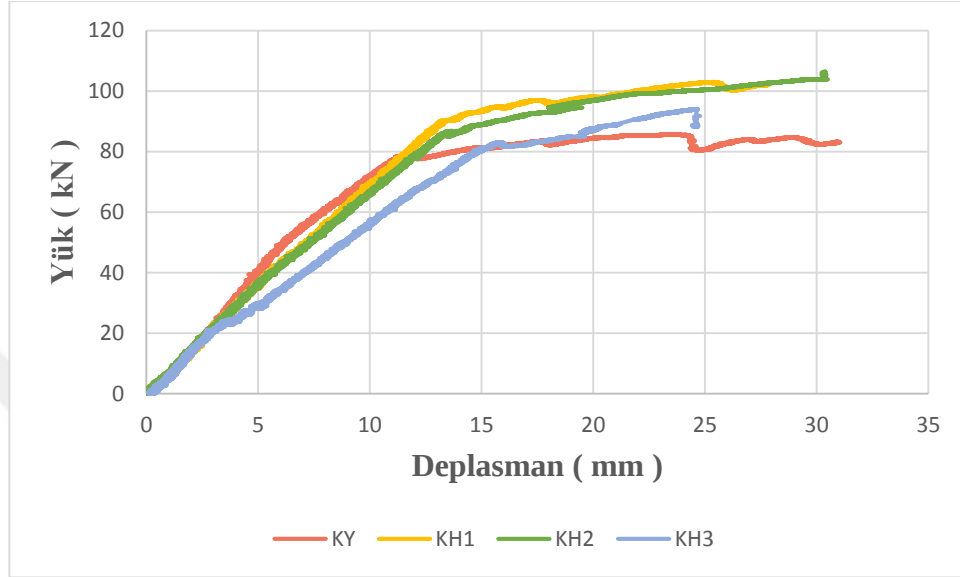


Şekil 4.18. Deney sonrası honeycomb panelin (Panel 3) kiriş yüzeyinden kaldırılması

Deney esnasında yük artışı ve buna bağlı olarak çatlak sayısının da artmasıyla panel ile beton ara yüzeyinde ayrışma meydana gelmiştir. Ayrıca Panel 3’ te, bal peteği çekirdek ile yüzey örtü tabakasının ayrışması olarak tanımlanan delaminasyon (Şekil 4.18) olduğu da gözlenmiştir. Deney sonucunda hem beton yüzeyden hem de CTP kaplı yüzey örtüsünden ayrılan panel incelendiğinde ve deney verileri göz önünde bulundurulduğunda Panel 3’ ün diğer panellere oranla kirişte oluşan gerilmeleri daha az karşıladığı görülmüştür. Daha kısa sürede kiriş alt yüzeyinden ayrılan Panel 3’ ün diğer honeycomb panellere göre daha rijit davrandığı anlaşılmıştır.

4.7.Yalın Kirişler ile Güçlendirilmiş Kirişlerin Kıyaslanması

Deneyler sonucunda güçlendirme yapılmayan ve yapılan serilerin birbiri ile kıyaslanabilmesi için elde edilen verilerin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan veriler tek grafik üzerinde birleştirilerek Şekil 4.18 elde edilmiştir.



Şekil 4.19. KY, KH1, KH2 ve KH3 kirişlerinin Yük-Deplasman grafikleri

Çizelge 4.3. Deney sonucunda elde edilen veriler

Kiriş Adı	Yük Kapasitesi (kN)		Deplasman (mm)		Enerji Absorbe Kapasitesi (kN. mm)	Çatlak Tipi
	Akma Yüğü	Max Yük Değeri	Akma Yüğü Anında	Max Deplasman Değeri		
KY	77,36	81,72	11	33,1	1289,51	Eğilme
KH1	89,5	102,45	14	27,7	1442,89	Eğilme / Kesme
KH2	86,35	103,87	13	30,5	1584,01	Eğilme / Kesme
KH3	82,93	93,76	15,6	24,46	1146,68	Eğilme / Kesme

Deneyssel çalışma sonucunda elde edilen veriler ile oluşturulan Çizelge 4.3' te; güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yalın kirişlere oranla %14 ile %25 arasında daha fazla yük taşıyabildiği ve enerji absorbe kapasitesinin % 22 daha fazla olduğu görülmektedir. Literatürde ki benzer güçlendirme çalışmaları ile deneyssel çalışmanın sonuçları aşağıda kıyaslanmaktadır.

Köse ve Özgen (2003) tarafından çelik lamaların epoksi ile kiriş yüzeyine yapıştırılmasıyla hazırlanan güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme ve çekme kuvvetlerinde belirgin artışlar olduğu ifade edilmiştir. Mosallam ve Banerjee (2007) tarafından fiber takviyeli polimer şeritler ile yapılan güçlendirme işleminin, betonarme kirişlerin kayma mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Kim vd. (2008) tarafından karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) şeritler ile karbon fiber tabaka (CFS) ile güçlendirilen betonarme kirişlerin, kontrol kirişlerine oranla daha fazla yük taşıma kapasitesine imkân verdiği görülmüştür. Tekin vd. (2008) tarafından prefabrik levhaların epoksi ile yapıştırılmasıyla hazırlanan güçlendirilmiş kirişlerin yük taşıma kapasitesinde %32 oranında artış sağlandığı ifade edilmiştir. Vulaş (2010) tarafından farklı elastisite modülüne sahip fiber takviyeli polimerler (FRP) kullanılarak güçlendirilen kirişlerin daha fazla yük taşıma kapasitesine bağlı olduğu belirlenmiştir. Acar (2008) tarafından yapılan güçlendirme çalışmasında karbon kumaş ve çelik levhaların beraber kullanılmasıyla betonarme kirişlerin enerji absorbe kapasitesinde %20 oranında artış meydana geldiği ifade edilmiştir. Zand vd. (2016) tarafından karbon fiber takviyeli polimer ile güçlendirilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesinde %26 oranında artış sağladığı gözlemlenmiştir. Akroush vd. (2017) tarafından karbon fiber takviyeli polimer ile güçlendirilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesinde %21 oranında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Hawileh vd. (2018) tarafından betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde çelikle güçlendirilmiş fiber kumaş epoksi ile kiriş alt yüzeyine yapıştırılmıştır. Bu güçlendirme işleminin kirişlerin yük taşıma kapasitesinde %29 artış sağladığı belirtilmiştir. Chen vd. (2018) tarafından yapılan güçlendirme çalışmasında bazalt fiber takviyeli polimer şeritler kiriş alt ve yan yüzeylerine yapıştırılmıştır. Bazalt fiber takviyeli polimer tabakaların betonarme kirişlerin eğilme dayanımını arttırmak için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, malzeme biliminin son gelişmelerinden olan bal peteği yapılı kompozit malzemelerin güçlendirmeye etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda farklı türdeki malzemelerin hibriti ile elde edilmiş cam takviyeli polimer (CTP) ile kaplı, alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip sandviç paneller temin edilmiştir. Farklı bal peteği çekirdek yüksekliğine sahip sandviç paneller kullanılarak, levha kalınlığının güçlendirme üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında 3 adet referans kiriş, 9 adet güçlendirilmiş kiriş olmak üzere toplamda 12 adet betonarme kiriş numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan kirişler dört noktalı yükleme deneyinde test edilmiş ve davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarının daha doğru verileri yansıtması için her panel kalınlığında üçer adet kiriş kullanılmıştır.

Deney verilerinin sonuçlarıyla yapılan değerlendirme sonucunda;

- Kullanılan cam takviyeli polimer ile kaplı alüminyum bal peteği kompozitin güçlendirme üzerinde olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir.
- Kirişlerin taşıyabildiği maksimum yük değeri referans kirişe göre; KH1 elemanında %25.4, KH2 elemanında %25.7, KH3 elemanında %14.7 oranında artış sağlamıştır. Güçlendirme paneli; kirişteki gerilmeleri karşılayarak daha fazla yük taşınmasına imkân sağlamıştır. Buradan hareketle, kullanılan kompozit malzemenin betonarme kirişlerin eğilme dayanımını arttırmak için uygun bir güçlendirme yöntemi olduğu belirlenmiştir.
- Yük-Deplasman eğrisinin altında kalan alan, enerji absorbe kapasitesini göstermektedir. KH1 ve KH2 kirişleri, referans kirişe oranla %22 daha fazla enerji absorbe yeteneğine sahip olduğu görülmektedir.
- Elde edilen veriler incelendiğinde 14,3 mm çekirdek kalınlığına sahip honeycomb malzemenin betonarme kiriş ile beraber hareket etmediği ve diğer panellerden daha kısa bir sürede kirişten ayrıldığı

gözlemlenmiştir. Bu veriler sonucunda 14,3 mm kalınlığa sahip honeycomb malzemenin diğer kalınlıklara göre daha rijit davrandığı anlaşılmaktadır.

- Akma yükünde; güçlendirilmiş KH1, KH2 ve KH3 kirişleri referans KY kirişine oranla sırasıyla %15.7, %11, %7.2 artış sağlamıştır.
- Honeycomb çekirdek kalınlığının artması, yük taşıma kapasitesinde dikkate değer bir farklılık oluşturmamıştır. 6 mm ve 11 mm çekirdek kalınlığına sahip paneller birbirine yakın sonuçlar verirken 14,3 mm kalınlığa sahip panelden daha düşük veriler elde edilmiştir. Malzeme kalınlığındaki artışın, taşıma yükünde ve enerji absorbe kapasitesinde önemli bir unsur olmadığı ancak 11 mm kalınlıktan sonra etkisinin azaldığı deneysel çalışma sonucunda anlaşılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Deneysel çalışma esnasında epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılmıştır. Çatlakların artmasıyla beraber kompozit malzemenin kiriş alt yüzeyinden ayrılması hızlanmıştır. Bunun engellenebilmesi için farklı yapıştırma teknikleri veya ankraj yöntemi uygulanabilir.
- Kullanılan kompozit malzemenin çekirdek veya yüzey örtü kısmındaki malzeme cinsi değiştirilerek oluşturulan yeni malzemenin güçlendirmeye etkisi araştırılabilir.
- Çalışma kapsamında sadece kiriş alt yüzeyinden güçlendirme yapılmıştır. Kiriş yan yüzeyleri de güçlendirilerek kompozit malzemenin kesme dayanımına karşı etkisi araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Acar, D. (2014). *Çelik Levha ve Karbon Kumaşlarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Ankara.
- Akroush, N., Almahallawi, T., Seif, M., Sayed-Ahmed, E. (2017). CFRP Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams in Zones of Combined Shear and Normal Stresses. *Composite Structures*. **162**, 47-53.
- Anonim,(2015). <https://www.slideshare.net/DuranTuncel1/balpetei-kompozitler-56210673>, (on-line access on 16 Dec, 2015).
- Arslan, M. (1991). *Betonarme Kirişlerin Epoksi İle Yapıştırılan Çelik Levhalarla Güçlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Arslan, N., Kaman, M. O. (2002, Ekim). Alüminyum, Kağıt ve Cam Elyaf Petek Yapılı Kompozitlerin Üretim Teknikleri ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*. **4**, 113-123.
- Başsürücü, M. (2013). *Çelik Sac-Beton Kompozit Döşeme Sistemlerinin Boyuna Kayma Dayanımının Deneysel Olarak Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Bekem, A., Ercan, H., Doğu, M., Ünal, A. (2011). Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*. Elazığ.
- Bitzer T. (1997), Honeycomb Technology, *Springer-Science-Business Media B.V*, Dublin, CA.
- Chen, W., Pham, T., Sichembe, H., Chen, L., Hao, H. (2018). Experimental Study of Flexural Behaviour of RC Beams Strengthened by Longitudinal and U-Shaped Basalt FRP Sheet. *Composites Part B*. **134**, 114-126.

- Çetinkaya, N., Kaplan, H., Şenel, M. Ş. (2004). Betonarme Kirişlerin Lifli Polimer (FRP) Kullanılarak Onarım ve Güçlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. **10**, 291-298.
- Hawileh, R., Nawaz, W., Abdalla, J. (2018). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened With Hardwire Steel-Fiber Sheets. *Construction and Building Materials*. **172**, 562-573.
- 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.
- Kankal, Z. Ç. (2011). *Betonarme Kirişlerin Cam Fiber Plakalarla Kesmeye Karşı Güçlendirilmesinde Ankraj Sayısının Etkisi*. Yüksek lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Kazanç, V. (2002). *Kompozit Malzemeler ve Mekanik Özellikleri*. Bitirme Ödevi, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Isparta.
- Kim, G., Sim, J., Oh, H. (2008). Shear Strength of Strengthened RC Beams with FRPs in Shear. *Construction and Building Materials*. **22**, 1261–1270.
- Köse, M., Özgen, K. (2003). Betonarme Elemanları Çelik Lamalarla Güçlendirilmesi. *İTÜ Dergisi/a Mimarlık, Planlama, Tasarım*. **2**, 41-50.
- McCracken, A., Sadeghian, P. (2018). Partial-Composite Behavior of Sandwich Beams Composed of Fiberglass Facesheets and Woven Fabric Core. *Thin-Walled Structures*. **131**, 805-815.
- Mosallam, A., Banerjee, S. (2007). Shear Enhancement of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composite Laminates. *Composites: Part B*. **38**, 781-793.
- Özcan, Z. (2015). Betonarme Kirişlerin Kompozit Malzemeler İle Güçlendirilmesi. *Deprem Sempozyumu*, Mart 23-25, 1016-1022, Kocaeli.

- Özdemirli, E. (2006). *Anlık Basınç Yüğü Etkisindeki Kompozit Sandviç Plağın Dinamik Davranışının DeneySEL ve Sayısal İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, A. U. (2009). *Sandviç kompozitlerde "Balpeteği" Yapısının Optimizasyonu*. Bitirme Projesi, İzmir.
- Öztürk, M. (2010). *Deprem Dayanımı Yetersiz Betonarme Çerçeveselerin Bağ Kirişli Dış Perde Duvar Uygulaması İle Güçlendirilmesi*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Qeshta, I., Shafigh, P., Jumaat, M. (2015). Flexural Behaviour of RC Beams Strengthened With Wire Mesh-Epoxy Composite. *Construction and Building Materials*. **79**, 104-114.
- Sayın, B., Yıldızlar, B., Özyazgan, C. (2010). Fiber Takviyeli Polimer (FRP) Uygulanan Betonarme Kirişlerde Moment-Eğrilik İlişkisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*. **6**, 42-56.
- Sevinç, T. (2008). *Betonarme Kirişlerin CFRP Çelik ve Betonarme Levhalarla Taşıma Gücünün Arttırılmasının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Shahverdi, M., Czaderski, C., Annen, P., Motavalli, M. (2016). Strengthening of RC Beams by Iron-Based Shape Memory Alloy Bars Embedded in a Shotcrete Layer. *Engineering Structures*. **117**, 263-273.
- Shi, S., Sun, Z., Hu, X., Chen, H. (2014). Flexural Strength and Energy Absorption of Carbon-Fiber–Aluminum Honeycomb Composite Sandwich Reinforced by Aluminum Grid. *Thin-Walled Structures*. **84**, 416-422.
- Shi, S.-s., Sun, Z., Hu, X.-z., Chen, H.-r. (2014). Carbon-fiber and Aluminum-Honeycomb Sandwich Composites With and Without Kevlar-fiber Interfacial Toughening. *Composites: Part A*. **67**, 102-110.
- Solmaz, M. Y., Çelik, E. (2018). 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. **30**, 277-286.

- Solmaz, M. Y., Kaman, M. O., Turan, K., Turgut, A. (2010). Petek Yapılı Kompozit Levhaların Eğilme Davranışlarının İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. **22**, 1-11.
- Subaşı, S., Çetin, V., Şamandar, A. (2017). Kompozit Panellerde CTP Levha ve Çekirdek Kalınlığının Mekanik Özelliklere Etkisi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. **4**, 135-145.
- Şakar, G., Yaman, M., Bolat, F. Ç. (2010). Bal Peteği Sandviç Kompozit Yapıların Dinamik Analizi. 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir.
- Tekin, M., Alsancak, E., Demir, A., Şeker, S. (2008). Betonarme Kirişlerin Prefabrik Levhalarla Güçlendirilmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. **4**, 37-44.
- Uysal, A. (2006). *Betonarme Kirişlerin Epoksi İle Yapıştırılan Delikli Çelik Levhalarla Güçlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Varyoz, H., Dikdere, O., Dinç, A. M., Tiryaki, M., Aygahoğlu, A. (2015). Metal Köpükler. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (2015 Özel Sayı- ISSN 1302-3055)*, 195-200.
- Vulaş, Y. Z. (2010). *Betonarme Kirişlerin Kesme Dayanımlarının Lifli Polimerlerle Arttırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Zand, A., Badaruzzaman, W., Mutalib, A., Hilo, S. (2016). The Enhanced Performance of CFST Beams Using Different Strengthening Schemes Involving Unidirectional CFRP Sheets: An Experimental Study. *Engineering Structures*. **128**, 184-198.
- Zhang, D., Zhao, Y., Ueda, T., Li, X., Xu, Q. (2016). CFRP Strengthened RC Beams with Pre-Strengthening Non-Uniform Reinforcement Corrosion Subjected to Post-Strengthening Wetting/Drying Cycles. *Engineering Structures*. **127**, 331-343.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Edahan KOÇ

Doğum Yeri ve Tarihi: MALATYA – 25.05.1992

Adres: Bostanbaşı Cristalpark Evleri B Blok Daire:6 Yeşilyurt / MALATYA

E-Posta: edahan_koc@hotmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Aralık 2015 – Mart 2017	Park44 Yapı Denetim / Kontrol Mühendisi
Mart 2017 – Ağustos 2017	Sarvan Yapı Denetim / Kontrol Mühendisi
Ağustos 2017 – Ağustos 2018	Perka Yapı / Saha Mühendisi
Ağustos 2018 – Halen	Yeşilsu Yapı / Şantiye Şefi

Yayın Listesi:

- Öngenli, B., Koç, E., Bettemir, H, Ö. (2016). “Skreyperin Maksimum Kazı Oranını Sağlayan Dolum Miktarının Yenileme ile Belirlenmesi”, International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE’16), March 19-20, Kilis
- Koç, E., Öngenli, B., Bettemir, H, Ö. (2016). “İçme Suyu Sisteminin Maliyet Tabanlı Optimum Tasarımı”, Uluslararası Kentsel Su ve Atık Su Yönetimi Sempozyumu, 26-28 Ekim, Malatya
- Koç, E., Bettemir, H, Ö. (2016). “Kaynak Dengeleme Problemlerinin Arama Uzayının Belirlenmesi”, 4. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, 3 – 5 Kasım, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir
- Ayaz, Y., Berktaş, B., Koç, E. (2017). “Beam Strengthening Using Honeycomb Plates”, Proceedings of 130th The IIER International Conference, 8th-9th October, Saint Petersburg, Russia