

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



**TARİHİ YIĞMA KEMERLERİN FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN  
İNCELENMESİ**

**İbrahim Yakup DOĞAN**

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAATMÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ARALIK, 2022

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**TARİHİ YIĞMA KEMERLERİN FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN**  
**İNCELENMESİ**

Tez Yazarı  
**İbrahim Yakup DOĞAN**

Danışman  
Doç. Dr. Erkut SAYIN

ARALIK 2022  
ELAZIĞ

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

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Tarihi Yığma Kemerlerin FRP ile Güçlendirilmesinin İncelenmesi

Yazarı: İbrahim Yakup DOĞAN

İlk Teslim Tarihi: 22.11.2022

Savunma Tarihi: 21.12.2022

**TEZ ONAYI**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

*İmza*

Danışman: Doç. Dr. Erkut SAYIN

Onayladım

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Başkan: Prof. Dr. Ragıp İNCE

Onayladım

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye: Doç. Dr. Müslüm Murat MARAŞ

Onayladım

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

*İmza*

Prof. Dr. Burhan ERGEN  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım ‘‘Tarihi Yıgma Kemerlerin FRP ile Güçlendirilmesinin İncelenmesi’’ yüksek lisans tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir Şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

21.12.2022

**İbrahim Yakup DOĞAN**



# ÖNSÖZ

---

Yapmış olduğum tez çalışmasında beni bilgisiyle ve emeğiyle hiç yalnız bırakmayan, sadece danışmanlığıyla değil insani yönüyle de her zaman örnek alacağım değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Erkut SAYIN'a gönülden teşekkür ederim. Tez çalışmamda Prof. Dr. Ragıp İNCE, Dr. Arş. Gör Musa YETKİN ve Arş. Gör. Ömer Faruk TAŞ hocamlarımın katkılarından dolayı teşekkür ediyorum. Maddi yönden tezimizi destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimine (FÜBAP), MF.21.38 numaralı projemizi destekledikleri için teşekkür ederim.

Dualarımı ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyerek bana karşı göstermiş oldukları destekten dolayı aileme sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

**İbrahim Yakup DOĞAN**

ELAZIĞ, 2022

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|   |           |
|---|-----------|
| ÖNSÖZ.....  | iv        |
| İÇİNDEKİLER .....   | v         |
| ÖZET .....  | vii       |
| ABSTRACT .....  | viii      |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....  | ix        |
| TABLolar LİSTESİ .....  | xi        |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....   | xii       |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Konunun Önemi .....  | 1         |
| 1.2. Literatür Çalışmaları .....  | 2         |
| 1.3. Tezin İçeriği ve Amacı.....  | 5         |
| <b>2. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>3. TARİHİ YIĞMA KEMERLERDE ONARIM VE GÜÇLENDİRME .....</b>             | <b>8</b>  |
| 3.1. Kemerler.....  | 8         |
| 3.2. Kemerlerde Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme .....                     | 13        |
| 3.2.1. Kemerlerde Oluşan Hasarlar .....                                   | 13        |
| 3.2.2. Kemerlerde Onarım ve Güçlendirme.....                              | 15        |
| <b>4. FRP (FİBER TAKVİYELİ POLİMER) TÜRLERİ VE UYGULAMA ALANLARI.....</b> | <b>16</b> |
| 4.1. FRP Nedir?.....  | 16        |
| 4.2. FRP türleri.....   | 16        |
| 4.2.1. Aramid lifi (AFRP) .....   | 16        |
| 4.2.2. Bazalt Lifi (BFRP) .....   | 17        |
| 4.2.3. Cam Lifi (GFRP).....   | 17        |
| 4.2.4. Karbon Lifi (CFRP).....  | 18        |
| 4.2.5. Hibrit Lifi (HFRP).....  | 19        |
| 4.3. FRP ile Güçlendirme Tekniğinin Uygulama Alanları .....               | 19        |
| <b>5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ .....</b>             | <b>22</b> |
| 5.1. Harcın Özellikleri.....  | 22        |
| 5.1.1 Basınç Dayanımı Deneyleri.....                                      | 22        |
| 5.1.2. Çekme Dayanımı Deneyleri .....                                     | 23        |
| 5.2. Pres Tuğla Özellikleri .....   | 24        |
| 5.2.1.Tuğla Basınç Dayanımı Deneyleri .....                               | 24        |
| 5.2.2. Tuğla Eğilmede Çekme Dayanım Deneyleri.....                        | 25        |
| 5.3. MasterBrace SAT 4500 Epoksi Yapıştırıcı .....                        | 27        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.4. Kemerlerin Güçlendirilmesinde Kullanılacak FRP Türleri .....      | 27        |
| 5.4.1. Karbon Fiber Kumaş (CFRP) .....                                 | 27        |
| 5.4.2. Aramid (Kevlar) Fiber Kumaş (AFRP) .....                        | 28        |
| 5.4.3. Cam Fiber Kumaş (GFRP) .....                                    | 28        |
| <b>6. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>                                       | <b>29</b> |
| 6.1. Deneyde Kullanılacak Kemer Numunelerinin Yapımı .....             | 29        |
| 6.2. Kemer Numunelere Fiber Kumaşların Uygulanması .....               | 31        |
| 6.2.1. Model – 1 (Karbon Fiber Kumaşın Tuğla Kemere Uygulanması) ..... | 31        |
| 6.2.2. Model – 2 (Aramid Fiber Kumaşın Tuğla Kemere Uygulanması) ..... | 32        |
| 6.2.3. Model – 3 (Cam Fiber Kumaşın Tuğla Kemere Uygulanması).....     | 33        |
| 6.3. Deney Düzenegi ve Yapılan Deneyler .....                          | 35        |
| 6.3.1. Referans Kemer Numune .....                                     | 36        |
| 6.3.2. Karbon Fiber Kumaş (CFRP) Uygulanmış Numuneler (Model-1) .....  | 38        |
| 6.3.3. Aramid Fiber Kumaş (AFRP) Uygulanmış Numuneler (Model-2).....   | 44        |
| 6.3.4. Cam Fiber Kumaş (GFRP) uygulanmış numuneler (Model-3) .....     | 50        |
| <b>5. SONUÇLAR.....</b>  | <b>57</b> |
| KAYNAKLAR .....  | 58        |
| ÖZGEÇMİŞ   |           |

# ÖZET

---

## Tarihi Yığma Kemerlerin FRP İle Güçlendirilmesinin İncelenmesi

**İbrahim Yakup DOĞAN**

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Aralık 2022, Sayfa: xii + 60

---

Tarihi yapılar inşa edildiği dönemin yaşam biçimini ve kültürünü geleceğe ulaştırır. Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem olarak kullanılan yığma kemerlerin çeşitli formları su yolları, cami, kilise, su kemeri ve hamam gibi yapılarda sıklıkla görülür. Dönemin kültürünü, yaşam biçimini yansıtan bu tarihi yığma kemerlerin korunması ve muhafaza edilmesi oldukça önem arz etmektedir. İnsanın sebep olduğu zararlar, doğal afetler, savaşlar ve yapıyı meydana getiren malzemelerin zamanla özelliğini kaybetmesi gibi olumsuz faktörlerden dolayı bu yığma kemerler hasar alabilir veya yıkılabilir. Bu sebeple yığma kemerlerin onarım veya güçlendirmelerinin yapılması önemlidir.

Tarihi yığma kemerlerin onarım ve güçlendirilmesinde daha çok yapının askıya alınması ve gergi düzenlemesi gibi yöntemler kullanılır. Onarım ve güçlendirme işleminde iki faktör önemlidir. Bunlardan ilki onarım için kullanılacak malzemenin yapıya ilave yük getirmemesi, ikincisi ise eğer güçlendirilecek yapı tarihi ise bu yapının orijinalliğinin bozulmamasıdır. FRP tekniğiyle yapılacak olan onarım ve güçlendirme bu iki faktörü büyük oranda sağlar.

Bu çalışma kapsamında 1 adet referans ve 9 adet güçlendirilmiş kemer numunesi olmak üzere 10 adet kemer numunesi hazırlanmıştır. Daha sonra tüm numuneler 28 gün bekletilmiş, güçlendirilecek numuneler ise epoksi sürülerek üçü karbon, üçü aramid (kevlar) ve üçü cam fiber kumaş (FRP) ile kemer karın bölgesi ve üzengi taşı iki alt tuğlasını kapsayacak şekilde kaplanmıştır. Bu işlemten sonra güçlendirilmiş kemer numuneler 7 gün daha bekletilerek deneye tabi tutulmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda numunelerin yük – yer değiştirme grafikleri Excel programı yardımıyla çizilmiştir. Referans numunenin maksimum taşıma yük değeri 6.49 kN, karbon fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri 10.18 kN, aramid fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri 14.20 kN ve cam fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri ise 13.09 kN'dur. Güçlendirilmiş kemer numuneler arasında maksimum yük değeri aramid fiber kumaştan elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yığma kemer, FRP, Güçlendirme

# ABSTRACT

---

## Investigation of FRP Reinforcement of Historical Masonry Arches

**İbrahim Yakup DOĞAN**

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY  
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering  
December 2022, Page: xii + 60

---

Historical buildings convey the lifestyle and culture of the period in which they were built to the future. Various forms of masonry arches, which are used as carrier systems in historical buildings, are frequently seen in structures such as waterways, mosques, churches, aqueducts and baths. It is very important to protect and preserve these historical masonry arches, which reflect the culture and lifestyle of the period. These masonry arches may be damaged or destroyed due to negative factors such as human-caused damages, natural disasters, wars, and degradations in the properties of the materials over time. For this reason, it is important to repair or strengthen of masonry arches.

In the repair and strengthening of historical masonry arches, methods such as supporting with scaffolds and tension arrangement are used. In the repair and strengthening process, there are two important factors. The first is that the material to be used for repair should not bring an additional load to the structure while the second is that if the structure to be strengthened is a historical one, the originality of the structure should not be corrupted. Repair and strengthening with Fiber Reinforced Polymer (FRP) technique provides these two factors to a large extent.

In this study, 10 arch samples (1 reference and 9 strengthened) were prepared. Then, all samples were kept for 28 days, and the samples to be strengthened were coated with three carbon, three aramid (kevlar) and three glass fiber fabric (FRP) by using epoxy to cover the two lower bricks of the arches abdomen and springer stone. After this process, the strengthened arches samples were kept for 7 more days and tested.

As a result of the experiments, the load-displacement graphs of the samples were drawn with the help of Excel program. The maximum load value of the reference sample is 6.49 kN, the average maximum load value obtained from the samples strengthened with carbon fiber fabric is 10.18 kN, the average maximum load value obtained from the samples strengthened with aramid fiber fabric is 14.20 kN and the average maximum load value obtained from the samples strengthened with glass fiber fabric is 13.09 kN. The maximum load value among the strengthened arches samples was obtained from aramid fiber fabric.

**Key words:** Masonry arches, FRP, Strengthening

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 3.1.  | Farklı tarihi yapılarda kullanılan kemer formları .....                                 | 8  |
| Şekil 3.2.  | Kemerlerin örnek yük aktarma şeması.....  | 9  |
| Şekil 3.3.  | Kemerin muhtelif kısımları .....  | 10 |
| Şekil 3.4.  | Kemer gelişim şeması .....  | 10 |
| Şekil 3.5.  | Görünüşlerine göre kemer çeşitleri .....  | 11 |
| Şekil 3.6.  | Kemerlere etki eden kuvvetler ve itki çizgisinin konumu.....                            | 12 |
| Şekil 3.7.  | Zincir eğrileri ve kemerler .....   | 13 |
| Şekil 3.8.  | Kemerlerde oluşan hasarlar.....   | 14 |
| Şekil 3.9.  | Kemerin askıya alınması ve gergi düzenlemesi .....                                      | 15 |
| Şekil 4.1.  | Aramid lifli kumaş .....  | 17 |
| Şekil 4.2.  | Bazalt lifli kumaş .....  | 17 |
| Şekil 4.3.  | Cam lifli kumaş (cam elyaf) .....   | 18 |
| Şekil 4.4.  | Karbon lifli kumaş .....  | 18 |
| Şekil 4.5.  | Hibrit lifli kumaş.....   | 19 |
| Şekil 5.1.  | Harcın basınç dayanım testi .....   | 22 |
| Şekil 5.2.  | Harcın çekme dayanım testi.....   | 23 |
| Şekil 5.3.  | Pres tuğlanın farklı açılardan görünüşü ve ölçüleri.....                                | 24 |
| Şekil 5.4.  | Pres tuğlanın deliğe paralel yönde ve deliğe dik yönde basınç dayanım deneyleri .....   | 25 |
| Şekil 5.5.  | Pres tuğlanın deliğe paralel ve deliğe dik yönde eğilmede çekme dayanım deneyleri ..... | 26 |
| Şekil 6.1.  | Kemer yapımının aşamaları .....   | 29 |
| Şekil 6.2.  | Kemer üstü lento giriş imalatı.....   | 30 |
| Şekil 6.3.  | Tuğla kemer numunesinin bölümleri ve ölçüleri .....                                     | 30 |
| Şekil 6.4.  | Karbon Fiber kumaşın genel görüntüsü ve tuğla kemere uygulanmış hali .....              | 31 |
| Şekil 6.5.  | Aramid Fiber kumaşın genel görüntüsü ve tuğla kemere uygulanmış hali .....              | 32 |
| Şekil 6.6.  | Cam Fiber kumaşın genel görüntüsü ve tuğla kemere uygulanmış hali.....                  | 33 |
| Şekil 6.7.  | Linear Variable Differential Transformer (LVDT).....                                    | 34 |
| Şekil 6.8.  | LVDT lerin kemer numune üzerindeki yerleşimi .....                                      | 34 |
| Şekil 6.9.  | Deney düzeneği yerleşimi.....   | 35 |
| Şekil 6.10. | Referans numunesinin yükleme önceki durumu .....  | 36 |
| Şekil 6.11. | Referans numunesi göçme durumu ayrıntıları .....  | 37 |
| Şekil 6.12. | Referans numunesi LVDT grafikleri .....   | 38 |
| Şekil 6.13. | Karbon fiber uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu .....                                 | 39 |
| Şekil 6.14. | Karbon fiber uygulanmış 1. Numunenin LVDT grafikleri .....                              | 40 |
| Şekil 6.15. | Karbon fiber uygulanmış 2. Numunenin göçme durumu .....                                 | 41 |
| Şekil 6.16. | Karbon fiber uygulanmış 2. Numunenin LVDT grafikleri .....                              | 42 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Şekil 6.17.</b> Karbon fiber uygulanmış 3. Numunenin göçme durumu.....     | 43 |
| <b>Şekil 6.18.</b> Karbon fiber uygulanmış 3. Numunenin LVDT grafikleri ..... | 44 |
| <b>Şekil 6.19.</b> Aramid fiber uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu.....     | 45 |
| <b>Şekil 6.20.</b> Aramid fiber uygulanmış 1. Numunenin LVDT grafikleri ..... | 46 |
| <b>Şekil 6.21.</b> Aramid fiber uygulanmış 2. Numunenin göçme durumu.....     | 47 |
| <b>Şekil 6.22.</b> Aramid fiber uygulanmış 2. Numunenin LVDT grafikleri ..... | 48 |
| <b>Şekil 6.23.</b> Aramid fiber uygulanmış 3. Numunenin göçme durumu.....     | 49 |
| <b>Şekil 6.24.</b> Aramid fiber uygulanmış 3. Numunenin LVDT grafikleri ..... | 50 |
| <b>Şekil 6.25.</b> Cam fiber uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu .....       | 51 |
| <b>Şekil 6.26.</b> Cam fiber uygulanmış 1. Numunenin LVDT grafikleri.....     | 52 |
| <b>Şekil 6.27.</b> Cam fiber uygulanmış 2. Numunenin göçme durumu .....       | 53 |
| <b>Şekil 6.28.</b> Cam fiber uygulanmış 2. Numunenin LVDT grafikleri.....     | 54 |
| <b>Şekil 6.29.</b> Cam fiber uygulanmış 3. Numunenin göçme durumu .....       | 55 |
| <b>Şekil 6.30.</b> Cam fiber uygulanmış 3. Numunenin LVDT grafikleri.....     | 56 |
| <b>Şekil 6.31.</b> Numunelerin maksimum taşıma yük değerleri .....            | 56 |

## TABLolar LİSTESİ

|   | Sayfa |
|---|-------|
| <b>Tablo 4.1.</b> Farklı türde FRP'lerin tasarımın özellikler .....                         | 19    |
| <b>Tablo 5.1.</b> Harcın basınç dayanımı deney sonuçları.....                               | 23    |
| <b>Tablo 5.2.</b> Harcın çekme dayanımı deneyi sonuçları .....                              | 23    |
| <b>Tablo 5.3.</b> Pres tuğlanın deliğe paralel yönde yapılan basınç deneyi sonuçları .....  | 25    |
| <b>Tablo 5.4.</b> Pres tuğlanın deliğe dik yönde yapılan basınç deneyi sonuçları .....      | 25    |
| <b>Tablo 5.5.</b> Pres tuğlanın deliğe paralel yönde eğilmede çekme dayanım sonuçları ..... | 26    |
| <b>Tablo 5.6.</b> Deliğe dik yönde eğilmede çekme dayanım sonuçları.....                    | 27    |
| <b>Tablo 5.7.</b> MasterBrace SAT 4500 epoksi yapıştırıcısının teknik özellikleri.....      | 27    |
| <b>Tablo 5.8.</b> Karbon lifi (CFRP) teknik özellikleri .....                               | 28    |
| <b>Tablo 5.9.</b> Aramid lifi (AFRP) teknik özellikleri.....                                | 28    |
| <b>Tablo 5.10.</b> Cam lifi (GFRP) teknik özellikleri .....                                 | 28    |

# SİMGELER VE KISALTMALAR

## Simgeler

---

|             |   |
|-------------|---|
| $b$         | : Tuğlanın genişliği                                |
| $d$         | : Tuğlanın yüksekliği                               |
| $f_{est'm}$ | : Yarmada çekme deneyi sonucu harcın çekme dayanımı |
| FRP         | : Fiber Reinforced Polymer (Lif Takviyeli Polimer)  |
| $h_c$       | : Silindir numunenin yüksekliği                     |
| $l_c$       | : Silindir numunenin uzunluğu                       |
| $L$         | : Tuğlanın boyu                                     |
| LVDT        | : Linear Variable Differential Transformer          |
| $P$         | : Maksimum yük                                      |
| $P_s$       | : Yarmada çekme deneyinde uygulanan maksimum yük    |
| $R_{tf}$    | : Eğilmede çekme dayanımı                           |
| $\sigma$    | : Gerilme   |
| $F$         | : Kırılma anına kadar gelen en büyük yük            |

## Kısaltmalar

---

|      |  |
|------|--|
| CFRP | : Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon lif takviyeli polimer) |
| AFRP | : Aramid Fiber Reinforced Polymer (Aramid lif takviyeli polimer) |
| GFRP | : Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam lif takviyeli polimer)     |
| BFRP | : Bazalt lif takviyeli polimer                                   |
| HFRP | : Hibrit lif takviyeli polimer                                   |
| LVDT | : Linear Variable Differential Transformer                       |
| TS   | : Türk Standardı   |

# 1. GİRİŞ

Tarihi yapılar yapıldığı dönemin kültürünü, yaşayışını ve ayakta kaldığı sürece zamanın izlerini geleceğe ulaştırır. Bu yapılar var olduğu sürece yapının gelecek kuşaklara ulaşmasını negatif yönde etkileyecek birçok faktör bulunmaktadır. İnsanın sebep olduğu zararlar, yapıyı meydana getiren malzemelerin zamanla özelliğini kaybetmesi (aşınması, deforme olması vb.), savaşılar, doğal afetler (deprem, sel vb.) ve çevre kirliliği gibi olumsuz faktörlerden kaynaklı hasarlar bunlara örnek verilebilir. Tarihi yapıların, taşıyıcı sistemlerinin onarılması, güçlendirilmesi, deprem ve rüzgâr yüklerine karşı mukavemet göstererek geleceğe ulaşması konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Ancak yığma kemerler konusunda yapılan çalışma sayısı sınırlıdır. Ayrıca yığma kemerlerin yeni nesil malzemeler ile güçlendirilmesi konusunda da literatürde de eksiklikler mevcuttur. Güçlendirme işlemi yapılırken tarihi değeri yüksek yapılarda güçlendirilen yapının orijinalliğinin ve tarihi değerinin bozulmaması da önemlidir.

Ayrıca yapı elamanına uygulanacak olan onarım ve güçlendirme yönteminin yapıya ilave yük oluşturmaması da önemlidir. Eğer ilave yük oluştursa yapıda ciddi hasarlar meydana gelebilir. Bu sebeple tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesinde yapının orijinalliğinin bozulmaması ve yapıya ilave yük oluşturmaması iki önemli etkidir. Bu durum son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşan lif takviyeli polimer (FRP - Fiber Reinforced Polymer) kullanımı ile sağlanabilmektedir.

## 1.1. Konunun Önemi

Yığma kemerler çeşitli sebeplerden dolayı göçebilir yada ağır hasar alarak kullanılmaz duruma gelebilir. Bu sebepten özellikle tarihi önemi bulunan tarihi kemerlerin onarım veya güçlendirmelerinin yapılması önemlidir. Onarım ve güçlendirmede iki faktör oldukça önemlidir. Bunlardan ilki onarım için kullanılacak malzemenin yapıya ilave yük getirmemesi, ikincisi ise eğer güçlendirilecek yapı tarihi ise bu yapının orijinalliğinin bozulmamasıdır. FRP tekniğiyle yapılacak güçlendirme işlemi yukarıda saydığımız faydaları büyük oranda karşılar. Bunlara ilave olarak bu tekniğin uygulanması diğer güçlendirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha kolaydır. Bu iki avantaj FRP tekniğiyle yapılan güçlendirmelerin son yıllarda sayısını arttırmıştır. Ayrıca, bu tekniğin kolay uygulanabilir olması zaman açısından da diğer güçlendirme seçeneklerine göre FRP tekniğiyle güçlendirmenin önemini artırmıştır.

## 1.2. Literatür Çalışmaları

Bu kısımda çeşitli yapı türleri için FRP kullanılarak yapılmış çalışmalar ve güçlendirme işlemleri sunulmuştur. Eren [1], yaptığı çalışmada hazırlamış olduğu yığma kemerlere hasar vermiş daha sonra bu kemerleri farklı güçlendirme/onarım yöntemleri kullandıktan sonra deneye tabi tutularak incelemesini yapmıştır. Kemer numuneleri kireç faktörlü düşük mukavemetli harç ve pres tuğla kullanarak hazırlamıştır. Deneyler için çalışmada 7 adet kemer numunesi hazırlamış ve 28 güne kadar (yeterli mukavemete) bekletmiştir. Yeterli mukavemeti aldıktan sonra kilit taşı hizasından düşey olarak yüklemeye alınmıştır. Referans alınacak kemer numunesi göçme anına kadar veya göçme yüküne kadar yüklenmiştir. Diğer 6'sı ise referans numunesinin göçme yükünün 0.75'i kadar hasara uğratılmıştır. Daha sonra hasara uğrayan 6 adet kemer numunesine farklı ebatlarda FRP şeritleri, derz doldurma yöntemi ve ankraj uygulamaları içeren altı çeşit güçlendirme tekniğiyle göçme anına kadar düşey yönde numuneler tekrar deneye tabi tutulmuştur. Daha sonra bu kemer numuneleri sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş ve analizleri yapılmış, deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

Toy [2], yaptığı çalışmada pratikte son derece yaygın olarak kullanılan kare ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda yanal kuşatmanın lifli polimer ile sağlanması durumunda meydana gelecek mukavemet artışını araştırmıştır.

Çetinkaya vd. [3], çalışmalarında FRP tekniğini betonarme olarak inşa edilen 4 kiriş üzerinde uygulayarak onarım ve güçlendirilmesini yapmıştır. Her numune kirişinin yük-deplasman grafiklerini elde ederek bu kirişlerinin statik yük etkisi altında onarım ve güçlendirme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonraki davranışlarını incelemiştir. Bu inceleme sonucunda FRP tekniği ile onarım ve güçlendirilmesi yapılan kirişlerin taşıma gücünü ciddi oranda artırdığı sonucuna varmıştır.

Kılınçarslan ve Türker [4], yaptıkları çalışmada FRP ile güçlendirme tekniğinin ahşap malzemenin onarım ve güçlendirilmesinde olumlu ve olumsuz yanları üzerinde durmuş ve FRP kullanımının sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesini incelemişlerdir.

Gemi vd. [5], çalışmalarında betonarme kirişlerde kullanılan çelik donatıların etkisinin hibrit donatı ve cam FRP'ye göre dezavantajlı durumda olduğunu tespit etmişlerdir. Bunu inceleyebilmek için hibrit donatılı şekilde hem çelik hem cam çubuklu donatılar, yalnız cam çubuklardan ve yalnız çelik çubuklardan oluşan betonarme kirişler üretmişlerdir. Üretilen bu betonarme kirişlere dört nokta eğilme testlerini uygulamışlardır. Deney sonucunda bu farklı tip donatılı kirişlerde maksimum yük taşıma kapasitesini yaklaşık olarak eşit bulmuşlardır. Hem çelik donatılı hem de cam FRP donatılı (hibrit donatılı kiriş) ve sadece çelik donatılı kiriş, gevrek bir davranış sergilerken, cam FRP donatılı kiriş ise sünek bir davranış sergilemiştir. Ayrıca cam FRP donatılı kiriş numunelerinin enerji emme kapasitesi diğer tip kiriş numunelerine oranla ciddi artış gösterdiğini bulmuşlardır.

Özcan [6], çalışmasında FRP tekniği ile güçlendirilmesi yapılmış dikdörtgen şeklindeki betonarme kirişleri üç noktalı eğilme deneyine tabi tutmuştur. Deneyler için 0.15x0.25 m2 kesitli ve 2.20 m uzunluğunda 8 adet betonarme kiriş kullanmışlardır. Deneylerden elde ettikleri sonuçları yük-şekil değiştirme eğrileri ve yük-yer değiştirme eğrileri olarak sunmuşlardır.

Sarıbıyık [7], yaptığı çalışmada standart silindir boyutlarında (150 x 300 mm) üretilmiş betonların FRP kompozit malzemeleri ile güçlendirilmesinde sargı katman sayısı, elyaf tipi ve farklı tür elyafın hibrit olarak kullanımının güçlendirmeye etkilerini araştırmıştır. Aynı şartlar altında üretilmiş, ortalama 30.25 MPa basınç mukavemeti olan betonlar tek doğrultulu karbon ve cam elyaf kumaşlarla enine doğrultuda bir, iki ve üçer kat kumaş sarılmış ve ayrıca karbon ve cam kumaş hibrit olarak sarımı yapılarak güçlendirmiştir. Eksenel basınç testi altında beton numuneleri sabit hızlı yükleme ile test etmiştir. Sargı katman sayısının, elyaf tipinin ve hibrit kullanımının silindir boyutlarında üretilen beton davranışına etkileri birbiriyle kıyaslayarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, sargı katman sayısının artışı betonun deformasyon kabiliyetini ve betonun basınç dayanımını arttırdığını tespit etmiştir. Ayrıca cam ve karbonun birlikte sarıldığı hibrit güçlendirmenin tekil güçlendirmeye oranla daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemiştir.

Koç [8], çalışmasında taştan yapılan kemer numunelerinin hasar görmesi sonucunda güçlendirme amaçlı FRP kompozit kumaşların farklı şekillerde sarılmasıyla bu kemerlerin deplasman ve taşıma gücü gibi davranış etkilerini araştırmıştır. Kemerlerden biri referans numunesi olarak dikkate alınmıştır. Referans numunesi haricinde diğer 6 kemer numunesine referans numunesi alınan kemerin göçme yükünün %75'i kadar düşey yönde kilit taşı hizasından yük verilmiştir. Referans numunesinin 0.75' i kadar yük uygulaması sonucunda hasara uğrayan kemer numunelerinden dördü FRP kompozit malzemeler farklı ebatlarda kesilerek farklı kemer bölgelerine uygulanmıştır. Hasar gören diğer bir adet kemer numunesinin derz kısmına FRP ile ankraj yapılmış ve kalan bir adet hasar gören kemer numunesinin derzlerine ise epoksi esaslı harç ile onarım güçlendirmiştir. Değişik tiplerde onarım ve güçlendirme yöntemi yapılan bu 6 adet kemer numunesini tekrardan düşey olarak yüklemeye almıştır. Güçlendirilmiş kemer numunesinin kapasitesini referans numunesi olarak alınan kemer numunesinin kapasitesine oranla en az % 24 artış sağladığı ve ayrıca kemer derzlerinin sadece epoksi reçinesiyle doldurulmasının taş kemerin taşıma gücünü ve kapasitesini ciddi oranda arttırdığını tespit etmiştir.

Bal ve Şimşek [9], yaptıkları çalışmada FRP kompozit malzemesiyle iki katlı tarihi yapının güçlendirilmesini araştırmışlardır. Yapının önce sonlu eleman modeli oluşturulmuş; görelî ötelenmeler ve yapı periyotları bulunmuş daha sonra çeşitli FRP kompozit malzemeler yapıya uygulanmış ve yapının dinamik değişimlerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında tarihi yığma duvarlara FRP'nin uygulanmasını ve FRP'nin bu tarihi yapıda değişik şekilde kombinasyonlarla uygulanışını araştırmışlardır. Sonuçta tarihi yapıyı FRP ile onarım ve güçlendirmesini yapmışlardır.

Aydın [10], yaptığı çalışmada FRP malzemelerden en çok tercih edilen GFRP (Glass Reinforced Plastic) tipli kompozit malzemenin aşınma davranışını deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla böhme aşınma test cihazında GFRP kutu numuneler test edilerek, aşınma oranları liflere paralel ve dik olarak tespit edilmiştir. Ayrıca 3 mukavemet sınıfında üretilen beton numunelerin aşınma oranları ile GFRP kutu numunelerin aşınma oranlarını mukayese etmiştir.

Durmaz [11], çalışmasında betonarme çeliğinin yerine kullanılabilen FRP donatılardan olan bazalt, karbon, cam ve aramid tipli donatıların özgül ağırlıkları, çekme dayanımları ve lif oranlarını bulmuştur. Bu donatılar kullanılarak (110x110x10 cm<sup>3</sup>) boyutlarında betonarme döşemeler üretilmiş ve bu döşemelerin eğilme testleri yapılarak sonuçları incelemiştir.

Borri vd. [12], yaptıkları çalışmada yeni bir güçlendirme tekniği olan karbon plaka kullanımının etkinliğini kemerlerin güçlendirilmesinde araştırmışlardır. 15 adet tuğla kemeri farklı şekillerde kompozit malzemelerle güçlendirdikten sonra kemere düşey yük uygulayarak test etmişlerdir.

Felice vd. [13], yaptıkları çalışmada taş kemer köprülerin yük taşıma kapasitesine etki eden faktörleri ve lifli elemanların uygulanması sonucunda yük değişimini incelemiştir.

Shrive [14], yaptığı çalışmada yapı elemanı olan kemerlerde, oluşabilecek depremlerde kemerin dayanımını artıracak FRP güçlendirme metodunun nasıl kullanılacağını araştırmıştır.

Baratta ve Corbi [15], yaptıkları çalışmada yığma kemeri FRP şeritler ile farklı şekillerde güçlendirerek yığma kemerin güçlendirilme yapılmamış mevcut durumuna göre davranışını deneysel yollarla araştırmıştır.

Caporale vd. [16], yaptıkları çalışmada farklı özelliklerdeki kemerleri FRP tekniğiyle güçlendirerek kemerlerin göçme yükünü elde etmişlerdir. Nonlineer ve lineer olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak iki farklı yöntemin avantajlarını incelemiştir. Ayrıca FRP tekniğiyle güçlendirilmiş değişik tipte kemerlerin işlevselliğini araştırmışlardır.

Tao vd. [17], yaptıkları çalışmada iki açıklığı olan dairesel yığma kemerlerde FRP ile yapılan güçlendirmenin incelenen kemerlere olan etkisini incelemiştir. Taş kemer köprülerin performansının artmasında FRP'nin etkili bir güçlendirme tekniği olduğunu belirtmişlerdir.

Aykaç ve Acar [18], yaptıkları çalışmada çelik levhadaki yüksek süneklik özelliğinin yanı sıra lifli polimer kumaşın yüksek dayanım özelliği talebinin de ihtiyaç olduğu durumda bu iki malzeme olan çelik levha ve lifli polimerin birbirinin eksiklerini giderecek şekilde kullanılmasının betonarme kirişler üzerinde oluşan etkilerini incelemiştir. Bu amaçla betonarme kirişlerden biri herhangi bir işlem görmeden (yalın), ikisi yalnız karbon fiber kumaşla güçlendirilmiş, 8 tanesi ise hem çelik levha hemde karbon fiber kumaşla güçlendirilmiş 11 adet betonarme kiriş düşey yük altında deneye tabi tutulmuştur. Çalışmada çelik levha ve karbon kumaşın katman sayısı, çelik levhanın kalınlığı ve yapıştırma sırası değişken parametre olarak kullanılmıştır. Yapıştırma

sırasının kirişin davranışında çok önemli bir etken olduğu ve kirişin dayanımında ve davranışı üzerine her iki malzemenin birlikte kullanımının çok büyük katkı oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Köksal vd. [19], yaptıkları çalışmada betonarme olarak imal edilen 7 adet kirişin çevresini karbon lifli polimerle sarıp üç noktalı eğilme deneyine tabi tutup sonuçlarını araştırmışlardır. 15x25x150 cm boyutlarında kirişlerin imal edilmesi için iki farklı dayanımda beton karışımı hazırlamışlardır. İlk grupta 4 adet betonarme kiriş 25.7 MPa ortalama basınç dayanımıyla hazırlanırken ikinci gruptaki 3 adet kiriş ise eski betonarme binaların düşük beton basınç dayanımını yansıtmak için 6.8 MPa düşük dayanımlı beton karışımıyla yapmışlardır. Bu 7 adet betonarme kirişin lifli polimerler ile güçlendirilmesinde üç farklı seçenek kullanmışlardır. Deneylerin neticesinde farklı güçlendirme seçenekleri göz önünde bulundurarak kirişlerin göçme şekillerini ve eğilme davranışlarını incelemişlerdir.

Maraş [20], yaptığı çalışmada literatürde FRP ile ilgili yapılan geçmiş çalışmaların ışığında FRP'nin güçlendirme alanında önemli avantajlar sağladığından dolayı mühendislik dalına katkı sunmuştur. FRP'nin yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu için deprem esnasında büyük deplasmanlar oluşturarak yüksek enerji ve sünek davranış gösterdiğini açıklamıştır. Ayrıca korozyon oluşturmaması ve kolayca uygulanması gibi nedenlerden dolayı FRP'nin yaygın bir kullanım alanı olduğunu geçmiş yapılan çalışmaların ışığında açıklamıştır.

Sayın vd. [21], yaptıkları çalışmada mevcut deneysel bir çalışmadaki betonarme olarak imal edilen kirişleri kullanmak suretiyle, alt yüzeyine FRP uyguladığı kirişlerin moment-eğrilik ilişkisini analitik olarak incelemişlerdir. Referans yalın betonarme kiriş numunesi ve farklı yapıstırıcı kalınlıklara sahip 4 adet FRP'li betonarme kiriş modelini analitik olarak birbiriyle kıyaslamışlardır. Analitik programa yapıstırıcı modülleri ve FRP eklenerek moment-eğrilik ve gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini bulmuşlardır. Böylece kıyaslama imkanı sağlamışlar. Ayrıca yapıstırıcı kalınlıklarındaki farklılığa bağlı olarak moment-eğrilik ve maksimum taşıma gücü gibi parametreleri incelemişlerdir.

### **1.3. Tezin İçeriği ve Amacı**

Bu tez çalışmasında yığma kemerler hakkında bilgi verilip yığma kemerlerin güçlendirme seçenekleri üzerinde durulmuştur. Bu amaçla FRP hakkında bilgi verilmiş ve FRP'nin yığma kemerler dışında betonarme ve diğer yapı elemanlarındaki kullanımı da literatürden faydalanılarak anlatılmıştır.

Çalışmada yığma kemerlerin FRP tekniği ile güçlendirilmesi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla 10 adet yığma kemer hazırlanmıştır. Hazırlanan bu kemerlerin biri referans kemer olarak dikkate alınmıştır. Bu kemerde herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. Diğer 9 kemer ise üç farklı FRP malzeme (karbon, aramid ve cam lifi) kullanılarak güçlendirilmiştir.

Deneyler için 300 kN kapasiteye sahip hidrolik basınç test presi kullanılmıştır. Bu amaçla numunelere düzgün artan bir yük uygulanmıştır. Numunelerin taşıdığı yük değerleri yük hücresi yardımıyla, yapmış oldukları düşey ve yatay yerdeğıştirmeler ise potansiyometrik cetveller yardımıyla okunmuştur. Böylece kemerlerin güçlendirilmesi için kullanılan FRP malzemenin (karbon, aramit ve cam lifi) etkinliğı araştırılmıştır. Literatür incelendiğinde kemerler için üç farklı fiber kumaşın uygulandığı çalışmaya rastlanmamıştır.



## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında yığma kemerlerin FRP tekniğiyle güçlendirilmesi deneysel olarak incelenmiştir. Toplamda 10 adet kemer numunesi oluşturulup 1'i referans numunesi diğer 9 numune ise farklı fiber kumaşlarla (karbon, aramit ve cam lifi) güçlendirilmiştir. Tüm numuneler, numune tamamlandıktan sonra 28 gün bekletilmiştir. Güçlendirilmiş numuneler ise 28 günün sonunda fiber kumaşlarla güçlendirilerek 7 gün daha bekletilmiştir.

Fiber kumaşlar güçlendirilecek numunelere uygulanırken epoksi yapıştırıcı malzemesi ile yapıştırılmıştır. Yükleme alına tüm numuneler 300 kN'luk kapasiteye sahip yük hücresinden düşey yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur. Kemerin her iki tarafındaki üzengi taşı hizasına 2 adet ve kemerin kilit taşının hizasına ise 1 adet potansiyometrik cetvel (LVDT) yerleştirilmiştir. Bu LVDT'ler yardımıyla kemerlerde meydana gelecek yerdeğiştirme değerleri okunmuştur. Kemer numuneleri maksimum taşıma gücüne (göçme yüküne) ulaşana kadar yükleme işlemine devam edilmiştir. Böylece karbon, aramid ve cam gibi farklı lif kumaşlarla güçlendirilmiş numunelerin referans numunesine göre etkinliği incelenmiştir. Ayrıca farklı fiber kumaşların birbirlerine göre etkinliği de mukayese edilmiştir.

### 3. TARİHİ YIĞMA KEMERLERDE ONARIM VE GÜÇLENDİRME

#### 3.1. Kemerler

Tarihi yapılarda taşıyıcı eleman olarak düzlemsel ve eğrisel elemanlar sıklıkla kullanılmıştır. Payanda, ayak, sütun, düz atkı (lento), duvar ve Türk üçgeni düzlemsel elemanlara örnek olarak verilebilir. Eğrisel elemanlar için ise kemer, kubbe, tonoz ve pandantif kullanılmıştır [1]. Kemerlerin ilk örneklerini M.Ö. 3000 yıllarda Mezapotamya’da Sümerler’in kullandığı bilinmesine rağmen, kemer elemanları en etkin şekilde Romalılar döneminde kullanmıştır [22]. Ülkemizde farklı medeniyetlerin yaptığı tarihi yapılarda çeşitli kemer formlarını görmek mümkündür. Kemerler su yolları, cami, hamam, kilise, su kemeri vb. tarihi yapılarda taşıyıcı sistem olarak sıklıkla kullanılmıştır. Şekil 3.1.’de bu yapılarda kullanılan farklı kemer biçimlerini görmek mümkündür.



a) Eyüp Sultan Cami (İstanbul)



b) Süleymaniye Hamamı (İstanbul)



c) Malabadi köprüsü (Diyarbakır)



d) Palu köprüsü (Elazığ)

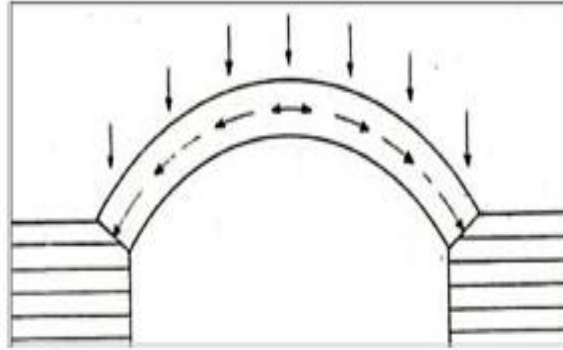
Şekil 3.1. Farklı tarihi yapılarda kullanılan kemer formları



e) Segovia Su Kemerı (İspanya)

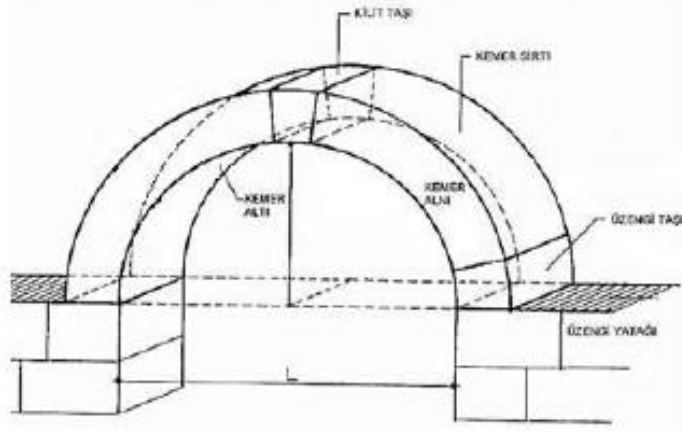
**Şekil 3.1. (Devamı)** Farklı tarihi yapılarda kullanılan kemer formları

Kemerler mimaride geniş açıklıkları geçebilmek için kullanılan taşıyıcı yapı elemanlarıdır. İki ayak veya duvar arasında bulunan açıklıkların üstünü örtmek için de kemerler kullanılabilir. Bir kemerin üzerinde oluşan yükü, ayaklara aktaran şema Şekil 3.2’de verilmiştir [23].



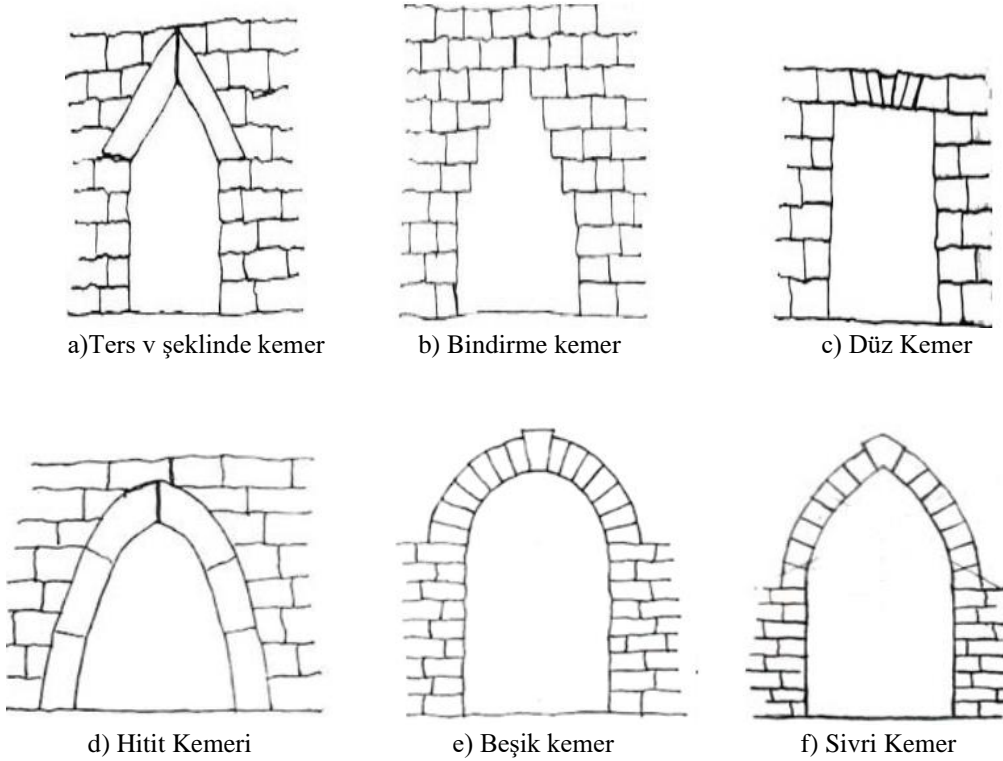
**Şekil 3.2.** Kemerlerin örnek yük aktarma şeması [23]

Kemerlerin taşıma kapasitesinin tespit edilmesinde kemerlerde oluşan çekme ve basınç gerilmeleri önemlidir. Kemerler üzengi, kemer ve kilit taşları olmak üzere 3 kısımdan oluşur. Üzengi taşı kemerin ayaklara oturan başlangıç taşıdır. Kilit taşı ise kemerin en üst merkezinde bulunup üzengi ile kendisi arasında bulunan taşları kilitlemeye çalışır. Üzengi ile kilit taşları arasında bulunan elemanlar ise kemer taşlarını oluşturur [24]. Şekil 3.3’de tipik bir kemerin bölümleri görülmektedir.



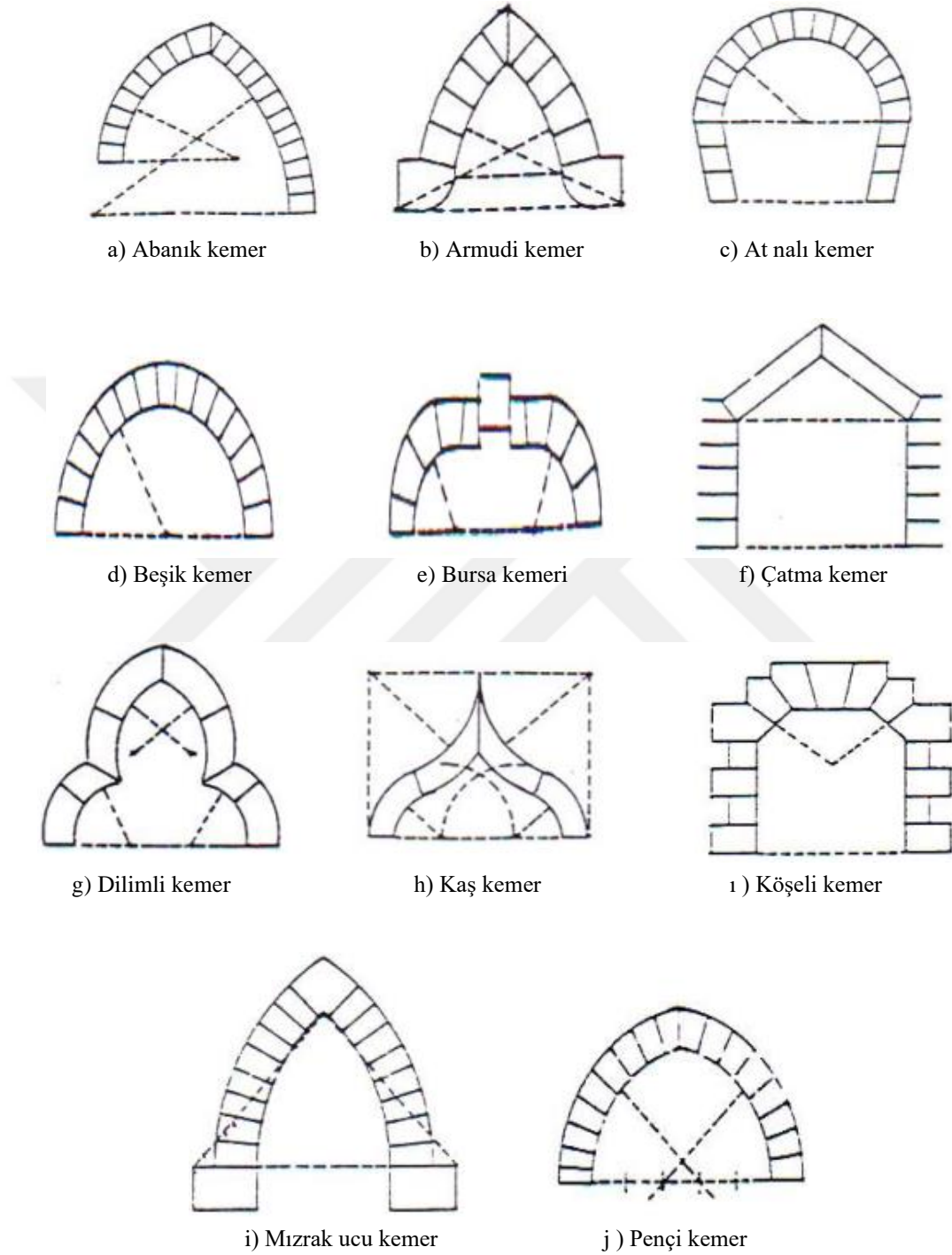
Şekil 3.3. Kemerin muhtelif kısımları [24]

İlk kemerler iki büyük taşın birbirine ters v şeklinde dayanması ile oluşturulmuştur. Günümüze kadar taş kemer, şişkin, ters eğmeçli, beşik, köşeli, dilimli üçgen, tudor, mızrak ucu, yıldız, abanık, düz, armudi, sepetkulpu, at nalı, basık gibi birçok kemer çeşidine ulaşılmıştır [25, 26]. Şekil 3.4’de kemer gelişim şeması verilmiştir.



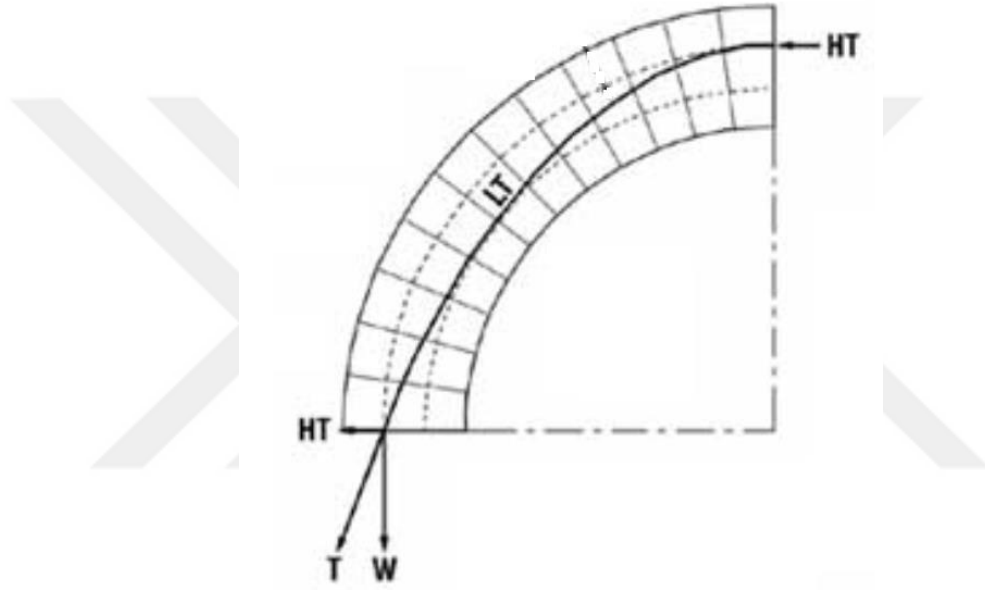
Şekil 3.4. Kemer gelişim şeması [25, 26]

Kemerleri görünümlerine göre de gruplara ayırmak mümkündür [25,27]. Şekil 3.5’de görünümlerine göre kemer çeşitleri verilmiştir.



Şekil 3.5. Görünümlerine göre kemer çeşitleri [26]

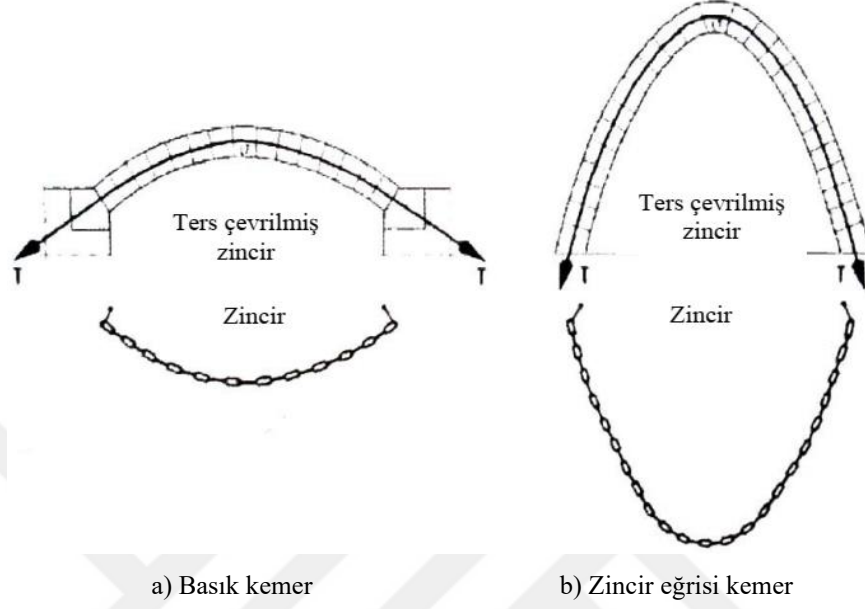
Kemerin itki çizgisinin açısı ve şiddeti stabiliteyi etkileyen en önemli ölçütlerdir. Kemerin ağırlığı ve yatay itkidenden kaynaklı düşünülen itki çizgisi kemer kesitinin ortalarında yer alan çizgidir. Kemerin ağırlığına ve şekline bağlı olan itki çizgisi her zaman belirli bir açıyla aşağı iner. Kemer taşının ağırlığı sayesinde yatay itkinin şiddeti oluşur ve yatay itki taşlar tarafından birbirine aktarılarak kemer eğrisinin başladığı yere iletilir [25]. Şekil 3.6'da kemere etki eden kuvvetler ve itki çizgisinin konumu verilmiştir. Bu şekilde, HT kemerdeki yatay itkiyi, LT kemer taşlarının davranışını temsil eden itki çizgisini, W strüktür üzerindeki sabit ve hareketli yüklerin (sabit ve hareketli) ağırlığını, son olarak T ise yatay itki ve düşey yükün bileşke kuvvetini temsil etmektedir.



Şekil 3.6. Kemerlere etki eden kuvvetler ve itki çizgisinin konumu [25]

Bir kemerin boyutu ve şekli fark etmeksizin oluşan itki çizgisi, basınç gerilmesi çizgisidir ve her zaman ters çevrilmiş zincir eğrisi şeklinde olur. Çünkü bu kargir yapılarda doğal yük aktarım eğrisidir. İki uçundan serbest şekilde asılı olan zincir yer çekimi etkisi altındadır ve bu biçimdeki şekle zincir eğrisi denir. Zincir eğrisi kemerde, itki çizgisi kemer taşlarını ortaladığında bu tür kemerler çok sağlamdır ve kalınlığı azaltılabilir. Bunun tam tersi olan kemer formunda ise bütün bölümlerinde eğilme momenti sıfırdır ve çekme kuvveti oluşmaz. Kemerin formu, zincir eğrisinden uzaklaşırsa kemerde çekme kuvvetleri ve eğilme momenti oluşur. Bunun sonucunda deformasyonlar ve çatlaklar meydana gelir. İtki çizgisi merkeze yakın olduğunda kemer yalnızca basınç gerilmesi altındadır. Bu sebeple kemer davranışının daha iyi olabilmesi için itki çizgisi merkeze yaklaştırılmalıdır. Bu nedenle kemer merkezine yakın itki çizgisine sahip olan basık kemerler daha sağlamdır.

Şekil 3.7’de gerilmeler altında daha az deformasyona uğrayan zincir eğrisi ve basık kemerler verilmiştir. Ayrıca kemerin ağırlığı, kemer kesiti ve kalınlığı gibi faktörler kemerin stabil olma durumunu etkileyebilir [25, 28].



Şekil 3.7. Zincir eğrileri ve kemerler [25]

## 3.2. Kemerlerde Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme

### 3.2.1. Kemerlerde Oluşan Hasarlar

Yığma kemerlerde meydana gelen hasarları aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür. Kemerlerde büyük basınç gerilmelerinin meydana gelmesi, simetrik olmayan yükleden dolayı kesitlerde büyük çekme gerilmelerinin oluşması ve kemer taşlarında açılma, kullanılan çelik gergi çubuklarının paslanması, dayanımını yitirmesi ve kopması, ahşap gergi çubuklarının ise çürüme ve mantarlaşması sonucu işlevini yitirmesi, kullanılan gergi çubuklarının mesnetlerinde meydana gelen açılmalar ve yapıda meydana gelen farklı oturmalar sebebiyle kullanılan gergi çubuklarında burkulmaların oluşması gibi problemler görülebilir [24]. Şekil 3.8’de yığma kemerlerde meydana gelen çeşitli hasar örnekleri verilmiştir.



a) Yığma yapıda kilit taşında açılma



b) Gergi hasarı



c) Burkulma



d) Kopma

**Şekil 3.8.** Kemerlerde oluşan hasarlar [29,30]

Yapılar zamanla doğal etkiler veya dış müdahaleler sonucu hasar görebilir. Oluşan bu hasarlar tedbir alınmaz ise yapının kısmen veya tamamen göçmesine neden olabilir. Özellikle kemerlerde meydana gelen hasarlar taşıyıcı elemanlar oldukları için daha da önemlidir.

### 3.2.2. Kemerlerde Onarım ve Güçlendirme

Herhangi bir tarihi yapıda aşırı yüklenme, deprem vb. sebeplerle bir deformasyon, yapıda tamamıyla yada yerel stabilite bozukluğu yada göçme riski varsa müdahale yapılması kaçınılmazdır. Bu müdahale genellikle yapının askıya alınması şeklinde olur. Kemerlerin güçlendirilmesinde kemerde kullanılan özgün malzemeye ek olarak yüksek dayanımlı çelik, epoksi reçinesi, değişik özellikteki çimentolar ve FRP gibi malzemeler kullanılabilir. Onarım ve güçlendirmede kullanılacak her tür malzemenin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yapıdaki mevcut malzeme ile uyum sorunu oluşturmayacak şekilde kullanılması özellikle tarihi yapılarda önemlidir. Şekil 3.9’da kemerin askıya alınması ve gergi düzenlemesi görülmektedir.



a) Kemerin askıya alınması



b) Gergi düzenlemesi

Şekil 3.9. Kemerin askıya alınması ve gergi düzenlemesi [31,32]

## **4. FRP (FİBER TAKVİYELİ POLİMER) TÜRLERİ VE UYGULAMA ALANLARI**

FRP 'nin çok çeşitli tipleri mevcut olup inşaat mühendisliğinde güçlendirmede kullanılan kompozit bir malzemedir. Yüksek hızlı makineler, ekipman parçaları, otomotiv, oda izolasyonları, ofis kabinleri, havacılık, soğutucular ve inşaat mühendisliğinde onarım/güçlendirme alanlarında oldukça geniş alana sahiptir. Bu bölümde FRP malzeme tanıtıldıktan sonra türleri ve inşaat mühendisliği alanındaki kullanımından bahsedilecektir.

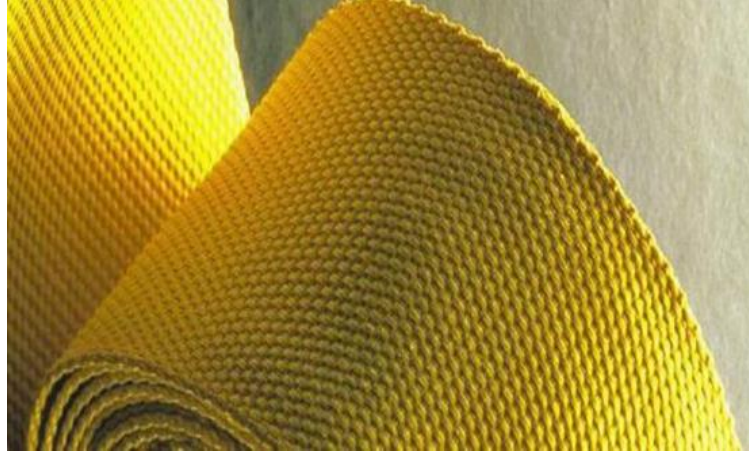
### **4.1. FRP Nedir?**

FRP Fiber Takviyeli Polimer ifadesinin kısaltmasıdır. FRP ürünleri, polimer matrisi içerisine gömülmüş, yüksek mukavemetli liflerden meydana gelen kompozit bir malzemedir. Bu lifler, meydana gelen kompozit malzemeye rijitlik ve dayanım sağlar. Yükün büyük bir bölümünü alır. Matris, liflerin kenetlenmesinde görev yapar. Kesme gerilmeleri boyunca liften life gerilme geçişini sağlar. FRP güçlendirme ve onarım yöntemiyle ahşap, beton, çelik, taş, tuğla, betonarme ve bütün yapı elemanlarına dıştan uygulanan bir yapısal güçlendirme malzemesidir. FRP lifleri; aramid, bazalt, cam, karbon ve hibrit olmak üzere yapıldığı malzemeye bağlı olarak çeşitli isimlerle adlandırılan kompozit bir malzemedir. Matrisler ise; fenolikler, vinyl ester, polyeşter ve epoksidir [11].

### **4.2. FRP türleri**

#### **4.2.1. Aramid lifi (AFRP)**

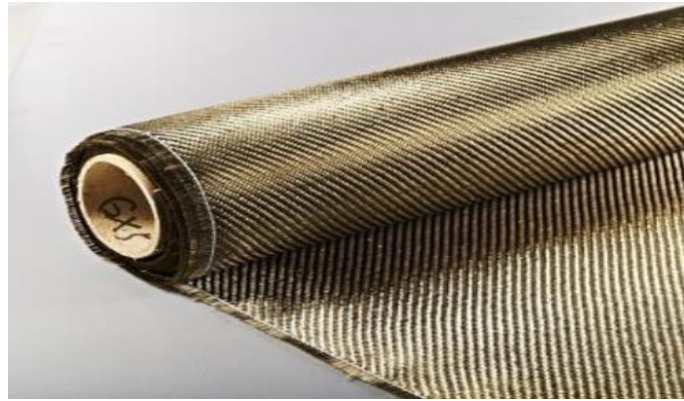
Yüksek performanslı, sert polimer zincirlerden üretilmiş ve ısıya dayanıklı güçlü elyaflardır [33]. Otomotiv ve savunma sanayisinde etkili şekilde kullanılan dayanıklı kumaşlardır [34]. Yüksek gerilme ve düşük basınç dayanımına sahip olduğundan hafif yapılarda güçlendirmede de kullanılır [35]. Aramid lifi termoplastik polimerden üretilen bir lif türüdür. Adını aromatic polyamide lifinden alır. Yüksek mukavemet istenilen kompozit malzemelerin üretiminde aramid lifi kullanılır. En çok keklar 49 ve 29 bilinir. Kevlar 29 zırh üretiminde kullanılmaktadır [11]. Şekil 4.1'de aramid lifli kumaşın genel görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.1. Aramid lifli kumaş [11]

#### 4.2.2. Bazalt Lifi (BFRP)

Bazalt magmatik kayaç olarak bilinmekte ve yer kabuğunda en çok bulunan kayaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Kökleri yeryüzünün derinliklerinde bulunur ve yüzeye ergimiş magma şeklinde ortaya çıkar. Aşınma ve kimyasal etkilere dayanıklı malzemeler olarak endüstride birçok yerde kullanılır. Son dönemlerde Bazalt Lif Destekli Plastik (BFRP) geliştirilmiştir [11]. Çapı yaklaşık olarak 10-20  $\mu\text{m}$  arasında olan bazalt lifleri ince liflerden oluşan kompozit malzemedir. İnşaat sektöründe tasarlanan yeni polimer kompozit malzemedir [36]. Korozyona, termal iletkenlik, ısıya, fiziksel ve kimyasal dirence karşı oldukça dayanıklıdır [37]. Şekil 4.2’de bazalt lifli kumaşın genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.2. Bazalt lifli kumaş [11]

#### 4.2.3. Cam Lifi (GFRP)

Cam elyaf yani GFRP ağırlıkça % 0.5 – 2.0 oranında fiberglass kullanan kompozit bir malzemedir [38]. Cam elyaf ana maddesi Silis-kum ( $\text{SiO}_2$ ) olmakla birlikte belli oranlarda sodyum,

demir, alüminyum, kalsiyum gibi elementlerin oksitlerinden yapılır. Maliyeti düşük olduğu ve en çok bilinen kompozit olduğundan en çok tercih edilen kompozitlerden biridir [11].

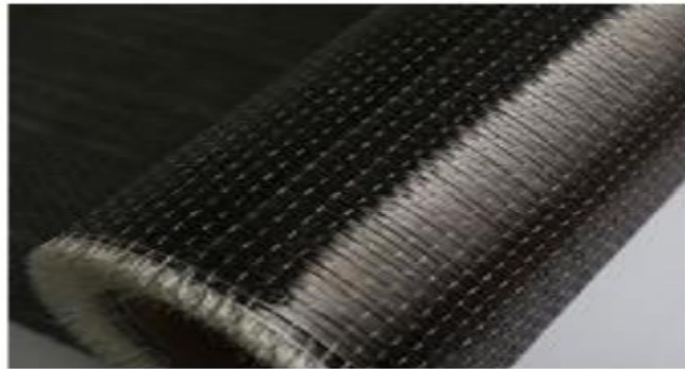
Düşük maliyet, yüksek mukavemet, yüksek ısı direnci ve iyi ısı yalıtımı olan GFRP tarihi yapılarda, betonarme yapı elemanlarında ve köprülerde güçlendirilme işleminde sıklıkla kullanılmaktadır [39]. Şekil 4.3'te cam lifli kumaşın genel görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.3. Cam lifli kumaş (cam elyaf) [20]

#### 4.2.4. Karbon Lifi (CFRP)

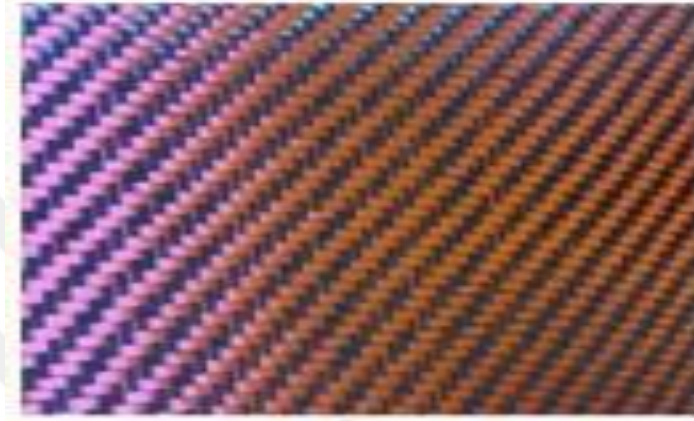
CFRP güçlü ve hafif kompozit bir malzemedir. Yüksek gerilme mukavemetine sahip olup oldukça iyi sünek davranış gösterir [39]. Karbon lifinin diğer takviye liflere göre farklı avantajları mevcuttur. Diğer liflere göre yüksek mukavemet, düşük lif yoğunluğu ve yüksek elastik özelliklere sahip olduğundan iyi bir birleşim sağlamaktadır. Yüksek ısılarda yorulma ve korumaya karşı daha iyi bir dayanım gösterebilir. Ancak lifler sınırlı uzamaya sahip olduğundan çarpma ve darbe kuvvetiyle karşılaştığında sorun olur. Ayrıca elektrik iletkenliği bazı problemlere yol açabilmektedir [11]. Güçlendirmede kullanım alanı geniş olan bu kompozit malzeme en yüksek çekme dayanımına sahiptir [40]. Şekil 4.4'te karbon lifli kumaşın genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.4. Karbon lifli kumaş [20]

#### 4.2.5. Hibrit Lifi (HFRP)

İki veya daha fazla polimer lif türünün tek matris içinde üretilebildiği polimer lif türüdür. Yük taşıma kapasitesi ve sertlik gibi kapasite özellikler yüksek modüllü lifli malzemelerde daha yüksek oranda iken düşük modüllü lifli polimer malzemelerde daha azdır. Ancak yüksek modüllü lifli kompozit malzemelerin maliyetleri düşük modüllülere göre daha fazladır [20]. Şekil 4.5'te hibrit lifli kumaşın genel görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.5. Hibrit lifli kumaş [20]

Farklı türdeki FRP'lerin tasarım özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı türde FRP'lerin tasarımın özellikler [20]

| FRP kriterleri    | CFRP     | GFRP     | AFRP     | BFRP     | HFRP     |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Çekme Dayanımı    | Çok iyi  | Çok iyi  | Çok iyi  | İyi      | Çok iyi  |
| Basınç Dayanımı   | Çok iyi  | Yetersiz | İyi      | İyi      | Çok iyi  |
| Elastisite Modülü | Çok iyi  | İyi      | Yeterli  | İyi      | Çok iyi  |
| Süneklilik        | Çok iyi  | İyi      | Yeterli  | İyi      | Çok iyi  |
| Kırılma           | Mükemmel | İyi      | Yeterli  | Yeterli  | Mükemmel |
| Yoğunluk          | İyi      | Mükemmel | Yeterli  | Yeterli  | İyi      |
| Alkali Direnci    | Çok iyi  | İyi      | Yetersiz | Mükemmel | Çok iyi  |
| Maliyet           | Pahalı   | Ucuz     | Pahalı   | Normal   | Pahalı   |

#### 4.3. FRP ile Güçlendirme Tekniğinin Uygulama Alanları

FRP ile güçlendirmenin farklı malzeme türleri ile inşa edilmiş çeşitli yapılarda kullanım alanları mevcuttur. Tarihi yapılarda FRP güçlendirme/onarım yöntemi kolay uygulanması, yapıya ek yük getirmemesi ve hafif olması gibi avantajlarından dolayı diğer güçlendirme yöntemlerine

göre daha fazla tercih edilebilir. Ayrıca, FRP kompozit malzemeyle yapılan güçlendirme yapı taşıyıcı elemanları olan kirişlerde, kolonlarda, ahşap yapı elemanlarının güçlendirilmesinde, donatısız betonun güçlendirilmesinde vb. kullanılabilir. FRP sadece kumaş, çubuk, şerit gibi kullanımının dışında donatı olarak da uygulanabilir

Beton kolonlarda kuşatma; dairesel çemberler, spiraller veya dikdörtgen bağlayıcı formundaki etriyeler ile sağlanabilir. Çelik etriyeler kuşatmayı sağlar. Fakat etriyeler korozyona uğrayabilir. Korozyona uğramış çelik etriyeler kolonu sarma ve kuşatmada etkisiz kalır. Sonuçta bu kuşatma mekanizmasını sağlamayan etriyeler bir şekilde kullanılamaz hale gelir. FRP malzemesi sarma ve kuşatma işlevini korozyona uğramadan yerine getirebilir ve bir etriye gibi çalışır [2].

Ahşap yapılar için çelik çubuklar veya çelik plakalar, basitçe ahşap yamalar ve alüminyum plakalar geleneksel güçlendirme yöntemlerindedir. Ancak çelik plakalar ve çubuklar korozyona karşı dayanımda hassas durum gösterebilir. Diğer bir güçlendirme malzemesi olan alüminyum plakalarda sıcaklık karşısında eğilebilir. Ahşap sistemleri güçlendirmede FRP kompozitleri artan yük taşıma sertliği veya kapasitesinin istendiği durumlarda, uygun çözümler sunmaktadır. FRP malzemelerinin ahşap yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanımı ahşap malzemesinin ömrünü uzatır ve diğer geleneksel güçlendirme yöntemlerine kıyasla çevreye daha duyarlı bir kullanım sağlar. Geleneksel güçlendirme yöntemlerine göre ağırlığı çok az olan FRP malzemeleri sertlik ve dayanıklılık sağladığı için ahşap yapı elemanı için oldukça önemli bir güçlendirme elemanıdır. Ayrıca FRP'ler bu ortamlarda yüksek dayanım da sağlar [4].

Betonarme kirişlerde her zaman donatı olarak çelik donatı kullanılır. Ancak betonarme kirişin gevrek bir davranış değil de sünek bir davranış sağlaması istenir. Bu sebeple betonarme kirişin sünekliliğini artıracak FRP donatıları (cam FRP) kullanılabilir. Betonarme kirişin çekme bölgesinde kullanılan bu FRP donatılar kirişe süneklilik sağlar. Ayrıca diğer çelik donatılı olarak imal edilen betonarme kirişlere kıyasla daha fazla enerji sönümler [5].

FRP malzemesiyle güçlendirilen betonarme kirişin güçlendirilmemiş bir betonarme kirişe oranla akma ve kopma yükünde artış meydana gelir. Ayrıca FRP miktarının artması donatı akma sınırını da artırır [6].

FRP malzemesi beton numuneleri güçlendirmek için de uygun bir yöntemdir. FRP malzemesiyle güçlendirme işlemi yaptığımız betonda kullanılan FRP sargı katman sayısı, FRP elyaf tipi ve farklı tür FRP'nin birlikte kullanımı diğer bir tabirle hibrit lif kullanımının beton numuneye etkisi farklılık gösterebilir. Örneğin, sargı katman sayısının artışı beton numunenin deformasyon kabiliyetini ve basınç dayanımını artırır. Ancak farklı tür FRP malzemelerin sargı katman sayısındaki dayanım artışında farklılık gösterebilir. Hibrit FRP türünün ise her zaman tekil

olarak yani tek çeşit FRP malzemesiyle güçlendirilmiş beton numunelere göre etkisi dayanım açısından fazladır [7].

Tarihi yapının doğal titreşim periyotları ve farklı yönlerdeki maksimum gerilme değerleri gibi dinamik davranışları inşaat mühendisleri için önemli olup bu değerlerin sınır gerilme değerine yakın yada eşit olması istenir. Bu yüzden doğal titreşim periyotları değerlerini ve farklı yönlerdeki maksimum gerilme değerlerini küçültmek için diğer bir tabirle sınır gerilmelere uygun hale getirmek için çeşitli güçlendirme teknikleri uygulanır. Bu güçlendirme tekniklerinden biri çelik diyagramdır. Fakat bu yöntem doğal titreşim periyotlarını ve farklı yönlerdeki maksimum gerilme değerlerini küçültmede yetersiz kaldığından FRP ile güçlendirme tekniği devreye girer. FRP kumaş, lamine (şerit) ve çubuk gibi farklı şekillerde yapının farklı bölgelerinde uygulanması sonucunda doğal titreşim periyotları ve maksimum gerilme değerlerini küçültür ve sınır gerilme değerlerine uygun hale getirir. Bu da FRP' nin diğer güçlendirme tekniklerine oranla daha verimli bir güçlendirme tekniği olduğunu gösterir [9].

## 5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Yığma kemerler genellikle taş, tuğla vb. yığma birimlerinin harç malzemesiyle bir araya getirilmesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. Bu taşıyıcı elemanların davranışları, yığma birimlerin ve harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine, derz kalınlığına ve işçiliğe bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Kemerlerin yapımında kullanılan harç ve tuğlanın malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yapılan deneyler çalışmanın bu kısmında özetlenmiştir. Deneyler Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

### 5.1. Harcın Özellikleri

Harcın yapımında kum, çimento ve kireç kullanılmış ve karışım oranı hacimce 2:1:1 olarak belirlenmiştir. Harcın basınç ve çekme dayanımını belirlemek için TS EN 12390-3'e göre basınç dayanımı ve TS EN 12390-6'ya göre ise çekme dayanımı testleri yapılmıştır [41,42]

#### 5.1.1 Basınç Dayanımı Deneyleri

Kemerlerin derz bölümünde harcın basınç mukavemetinin (dayanım) bulunması için 15x15x15 cm<sup>3</sup> lük kalıplarda harç numuneleri hazırlanmış ve bu harç numuneleri 28 gün boyunca küre bırakıldıktan sonra deneyleri yapılmıştır. TS EN 12390-3 (2010) standardı kırılma anına kadar gelen en büyük yükün (F) kesit alanına (A<sub>c</sub>) bölünmesiyle elde edilen sonucu harcın basınç mukavemeti (dayanım) olarak belirlemiştir [41]. Harç basınç deney düzeneği Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Tablo 5.1'de ise harç numunelerin basınç deneyi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.1. Harcın basınç dayanım testi

**Tablo 5.1.** Harcın basınç dayanımı deney sonuçları

| Numune No       | F(kN)      | $\sigma$ (MPa) |
|-----------------|------------|----------------|
| Numune-1        | 235        | 10.4           |
| Numune-2        | 237        | 10.5           |
| Numune-3        | 228        | 10.1           |
| <b>Ortalama</b> | <b>233</b> | <b>10.3</b>    |

### 5.1.2. Çekme Dayanımı Deneyleri

TS EN 12390-6 (2010) standardında belirlendiği gibi silindir yarma deneyleri harcın çekme mukavemetini (dayanım) belirlemek için yapılır [42]. Harcın çekme mukavemeti değerleri Denklem 5.1'e göre elde edilmiştir.

$$f_{\text{cst}'m} = 2P_s / \pi h_c l_c \quad (5.1)$$

Denklemden  $f_{\text{cst}'m}$ ; yarmada çekme deneyi sonucu harcın çekme dayanımını  $P_s$ : maksimum yükü,  $h_c$ : silindir numunenin yüksekliğini,  $l_c$ : silindir numunenin uzunluğunu (silindir numunenin çapı) göstermektedir. Şekil 5.2'de yarmada çekme deney düzeneği görülmektedir. Tablo 5.2'de ise harcın çekme dayanımı test sonuçları verilmiştir.



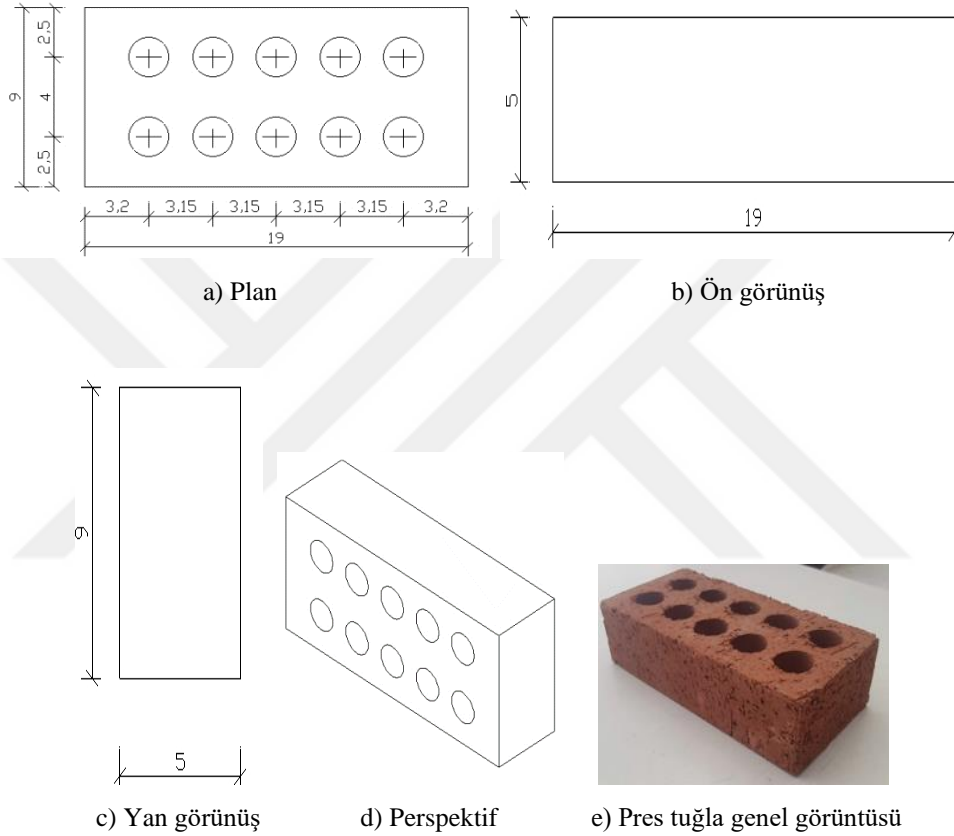
**Şekil 5.2.** Harcın çekme dayanım testi

**Tablo 5.2.** Harcın çekme dayanımı deney sonuçları

| Numune no       | $P_s$ (kN)  | $F_{\text{cst}'m}$ (MPa) |
|-----------------|-------------|--------------------------|
| Numune-1        | 42          | 0.59                     |
| Numune-2        | 49          | 0.69                     |
| Numune-3        | 52          | 0.74                     |
| <b>Ortalama</b> | <b>47.7</b> | <b>0.67</b>              |

## 5.2. Pres Tuğla Özellikleri

Deneylerde kullanılan pres tuğlalar düşey delikli olup  $19 \times 9 \times 5$  cm<sup>3</sup> boyutunda ve 1.360 kg ağırlığa sahiptir. Bu tuğlalar deneylerde yığma birim eleman olarak kullanılmıştır. Şekil 5.3.'te delikli pres tuğlaya ait ölçüler ve görünüşler gösterilmiştir. Delikli pres tuğlanın mekanik özelliklerini belirlemek için TS EN 772-6'ya göre eğilmede çekme dayanımı ve TS EN 772-1+A1'e göre basınç dayanımı testleri yapılmıştır. [43,44]



Şekil 5.3. Pres tuğlanın farklı açılardan görünüşü ve ölçüleri

### 5.2.1. Tuğla Basınç Dayanımı Deneyleri

Deneylerde kullanılan tuğlalar delik yönüne paralel ve dik yönde deneye tabi tutulmuştur. Bu sebeple pres tuğlaya yükleme yapıldığında yükleme yönü tuğlada farklı dayanımlar oluşturur. Deneyler için TS EN 772-1+A1 (2015) standardı kullanılmıştır. Basınç dayanımını bulmak için 6 adet pres tuğla deliğe paralel yönde ve 6 adet pres tuğa ise deliğe dik yönde yükleme yapılarak basınç deneyleri yapılmıştır. Şekil 5.4'te basınç dayanım deney testleri deliğe paralel ve dik yönde görülmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ise Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te verilmiştir.

Standarda göre basınç dayanımı maksimum yükün net yüzey alanına bölünmesiyle oluşan dayanımın TS EN 772-1+A1 (2015)'deki şekil katsayısıyla çarpılmasıyla elde edilir [43]. Uygulanan yük deliğe paralel yönde ise net alan yükün uygulandığı alanın delik yönündeki alanların çıkarılmasıyla elde edilen alandır ve bu yükün net alana bölünmesi pres tuğlanın deliğe paralel yöndeki dayanımı oluşturur. Uygulanan yük pres tuğlanın deliğine dik yönde ise net alanda hiç boşluk yoktur. Bu yükün net alana bölünmesi ise deliğe dik yöndeki dayanımı oluşturur.



a) Deliğe paralel yönde

b) Deliğe dik yönde

Şekil 5.4. Pres tuğlanın deliğe paralel yönde ve deliğe dik yönde basınç dayanım deneyleri

Tablo 5.3. Pres tuğlanın deliğe paralel yönde yapılan basınç deneyi sonuçları

| Numune No      | Numune-1 | Numune-2 | Numune-3 | Numune-4 | Numune-5 | Numune-6 | Ortalama |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\sigma$ (MPa) | 46.73    | 48.30    | 59.03    | 41.11    | 42.68    | 40.32    | 46.36    |

Tablo 5.4. Pres tuğlanın deliğe dik yönde yapılan basınç deneyi sonuçları

| Numune No      | Numune-1 | Numune-2 | Numune-3 | Numune-4 | Numune-5 | Numune-6 | Ortalama |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\sigma$ (MPa) | 19.45    | 19.36    | 16.08    | 16.83    | 15.52    | 16.90    | 17.36    |

Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre delikle paralel yönde yapılan yüklemelerde 6 adet numunenin ortalama basınç dayanımı 46.36 MPa olarak elde edilmiştir. Ancak delik doğrultusuna dik yönde yapılan 6 adet numunenin yüklemelerin ortalama basınç dayanımı ise 17.36 MPa'dır.

### 5.2.2. Tuğla Eğilmede Çekme Dayanım Deneyleri

Tuğlaların eğilmede çekme dayanım deneyleri TS EN 772-6 (2004) standardında belirtildiği gibi pres tuğlalardaki deliklere paralel yönde ve deliğe dik yönde yüklenmesi ile yapılmıştır [44].

3 adet deliğe paralel yönde ve 3 adet deliğe dik yönde yükün uygulanmasıyla toplamda 6 adet pres tuğla numunenin deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme dayanım değerleri Denklem (5.2)'de verilen formüle göre elde edilmiştir.

$$R_{tf} = PL/bd^2 \quad (5.2)$$

Denklemde, P: maksimum yük, L: tuğla boyu, b: tuğla genişliği, d: tuğla yüksekliğini ifade etmektedir. Denklemdeki b, d ve L ifadeleri mm cinsinden denklemde ifade edilir. P ise Newton (N) cinsinden ifade edilir.  $R_{tf}$  (Eğilmede çekme dayanımı) ise  $N/mm^2$  ile yani MPa olarak dikkate alınır. Şekil 5.5'te tuğlaların eğilmede çekme dayanım deney testleri gösterilmiştir. Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da tuğlaların deliğe paralel yönde ve deliğe dik yönde yüklenmesi sonucu elde edilen eğilmede çekme dayanım deneyi sonuçları verilmiştir. Deneylerde pres tuğlaya uygulanan yük sonucu oluşan maksimum yük ve dayanım; pres tuğla deliğine paralel yönde yüklemelerde ortalama 6.13 kN maksimum yük ve 5.18 MPa dayanım oluştuğu, pres tuğla deliğine dik yönde uygulanan yüklemelerde ise ortalama 9.67 kN maksimum yük ve 4.55 MPa dayanım oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.5. Pres tuğlanın deliğe paralel ve deliğe dik yönde eğilmede çekme dayanım deneyleri

Tablo 5.5. Pres tuğlanın deliğe paralel yönde eğilmede çekme dayanım sonuçları

| Numune No       | P (kN)      | b (mm) | d (mm) | L (mm) | $R_{tf}$ (MPa) |
|-----------------|-------------|--------|--------|--------|----------------|
| Numune-1        | 6.09        | 90     | 50     | 190    | 5.14           |
| Numune-2        | 6.17        | 90     | 50     | 190    | 5.21           |
| Numune-3        | 6.14        | 90     | 50     | 190    | 5.18           |
| <b>Ortalama</b> | <b>6.13</b> | 90     | 50     | 190    | <b>5.18</b>    |

**Tablo 5.6.** Pres tuğlanın deliğe dik yönde eğilmede çekme dayanım sonuçları

| Numune No       | P (kN)      | b (mm) | d (mm) | L (mm) | R <sub>tf</sub> (MPa) |
|-----------------|-------------|--------|--------|--------|-----------------------|
| Numune-1        | 11.02       | 50     | 90     | 190    | 5.17                  |
| Numune-2        | 8.88        | 50     | 90     | 190    | 4.17                  |
| Numune-3        | 9.16        | 50     | 90     | 190    | 4.30                  |
| <b>Ortalama</b> | <b>9.67</b> | 50     | 90     | 190    | <b>4.55</b>           |

### 5.3. MasterBrace SAT 4500 Epoksi Yapıştırıcı

Masterbrace SAT 4500 epoksi yapıştırıcısı çeşitli fiber kumaşların (FRP) güçlendirilecek olan yapı yüzeyine yapıştırılması amacı ile kullanılır. MasterBrace SAT 4500 epoksi yapıştırıcısının teknik özellikleri Tablo 5.7’de verilmiştir.

**Tablo 5.7.** MasterBrace SAT 4500 epoksi yapıştırıcısının teknik özellikleri

| Malzemenin Yapısı                          |                             |
|--|-----------------------------|
| <b>Renk</b>                                | Mavi                        |
| <b>Karışım Yoğunluğu</b>                   | 1.02 kg/litre               |
| <b>Viskozite</b>                           | 1500-2500 mPa.s             |
| <b>Basınç Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)</b> | >60 N/mm <sup>2</sup>       |
| <b>Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)</b> | >50 N/mm <sup>2</sup>       |
| <b>Yapışma Dayanımı (7gün)</b>             | >3.0 N/mm <sup>2</sup>      |
| <b>Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı</b>       | +5°C + 30°C                 |
| <b>Kullanma Süresi (+20°C)</b>             | 30 dak.                     |
| <b>Yeniden Kaplanabilme Süresi (+20°C)</b> | Min. 48 saat<br>Maks. 7 gün |
| <b>Tam Kürlenme Süresi (+20°C)</b>         | 7 gün                       |

### 5.4. Kemerlerin Güçlendirilmesinde Kullanılacak FRP Türleri

Kemer numunelerin güçlendirilmesinde karbon, aramid ve cam olmak üzere 3 farklı lif türü kullanılmıştır. Kullanılan FRP’lerin birim ağırlıkları yaklaşık olarak aynıdır. Ayrıca seçilen FRP türlerinin hepsi çift yönlü dokuma olarak hazırlanmıştır.

#### 5.4.1. Karbon Fiber Kumaş (CFRP)

Karbon lifli kumaş çift yönlü dokumadır. Karbon lifinin teknik özellikleri Tablo 5.8’de verilmiştir.

**Tablo 5.8.** Karbon lifi (CFRP) teknik özellikleri

|  |                            |
|--|----------------------------|
| <b>Birim Ağırlık</b>                       | 245 gr/m <sup>2</sup> ± %5 |
| <b>Rulo Uzunluğu</b>                       | 5 m                        |
| <b>Rulo Genişliği</b>                      | 100 cm                     |
| <b>Dokuma Yapısı</b>                       | Twill 2/2                  |
| <b>Lif Yoğunluğu</b>                       | 1.79 g/cm <sup>3</sup>     |
| <b>Çekme Dayanımı</b>                      | 3800 MPa                   |
| <b>Çekme Elastisite Modülü</b>             | 240 GPa                    |
| <b>Kopma Uzaması</b>                       | %1.6                       |
| <b>Fiberdeki Karbon İçeriğinin Yüzdesi</b> | %95                        |
| <b>Elektriksel Direnç</b>                  | 1.55 ohms/cm               |
| <b>Kumaş Rengi</b>                         | Siyah                      |

#### 5.4.2. Aramid (Kevlar) Fiber Kumaş (AFRP)

Aramid lifli kumaş çift yönlü dokumadır. Aramid (Kevlar) lifinin teknik özellikleri Tablo 5.9’da verilmiştir.

**Tablo 5.9.** Aramid lifi (AFRP) teknik özellikleri

|                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| <b>Birim Ağırlık</b>           | 300 gr/m <sup>2</sup> ± %5 |
| <b>Rulo Uzunluğu</b>           | 5 m                        |
| <b>Rulo Genişliği</b>          | 100 cm                     |
| <b>Dokuma Yapısı</b>           | Twill 2/2                  |
| <b>Çekme Dayanımı</b>          | 2944 MPa                   |
| <b>Çekme Elastisite Modülü</b> | 102 GPa                    |
| <b>Kalınlık</b>                | 0.3 mm ± %2.5              |
| <b>Kumaş Rengi</b>             | Sarı                       |

#### 5.4.3. Cam Fiber Kumaş (GFRP)

Cam lifli kumaş çift yönlü dokumadır. Cam lifinin (cam elyaf) teknik özellikleri Tablo 5.10’da verilmiştir.

**Tablo 5.10.** Cam lifi (GFRP) teknik özellikleri

|                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| <b>Birim Ağırlık</b>  | 300 gr/m <sup>2</sup> ± %5 |
| <b>Rulo Uzunluğu</b>  | 5 m                        |
| <b>Rulo Genişliği</b> | 100 cm                     |
| <b>Dokuma Yapısı</b>  | Twill 2/2                  |
| <b>Kalınlık</b>       | 0.23 mm                    |
| <b>Kumaş Rengi</b>    | Beyaz                      |

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 6.1. Deneysel Kullanılacak Kemer Numunelerinin Yapımı

Deneysel çalışma Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel için 1 adet referans numunesi hazırlanmıştır. Ayrıca, 3 kemer numunesi karbon fiber kumaşla (Model-1), 3 kemer numunesi aramid (kevlar) fiber kumaşla (Model-2) ve 3 kemer numunesi ise cam fiber kumaşla (Model-3) güçlendirilmiş ve toplamda 10 adet kemer numunesi hazırlanmıştır. Kemerlerin örme işlemine başlamadan önce kemer numunelerin ölçülerine uygun kalıp sistemi tasarlanmıştır. Bu kalıp sistemi oluşturulan kemerleri yeterli dayanıma ulaşmaya kadar ayakta tutmaya yardımcı olmaktadır. Tuğla kemer numuneleri  $19 \times 9 \times 5 \text{ cm}^3$  düşey delikli pres tuğla ve harç yardımıyla oluşturulmuştur. Kemer numunelere ilk olarak kemerin ayakları 29 cm olacak şekilde başlanır daha sonra kemer eğrisi 23 adet pres tuğla ile oluşturulur. Bu işlemden sonra kemer örümünün tamamı yapılarak kemer tamamlanır. Kemer numunesinin net yüksekliği 76 cm, kemerin kilit taşından yüksekliği 61 cm ve kemer açıklığı ise 102 cm dir. Kemer ayakları  $19 \times 19 \text{ cm}^2$  kesitinde alana sahiptir. Yatay ve düşey derzler ise yaklaşık 1 cm olacak şekilde dikkate alınmıştır. Şekil 6.1’de kemer yapım aşamaları gösterilmiştir.



a) Kemer ayakları yapımı



b) Kemer eğriliklerinin oluşturulması



c) Kemerin tamamının oluşturulması

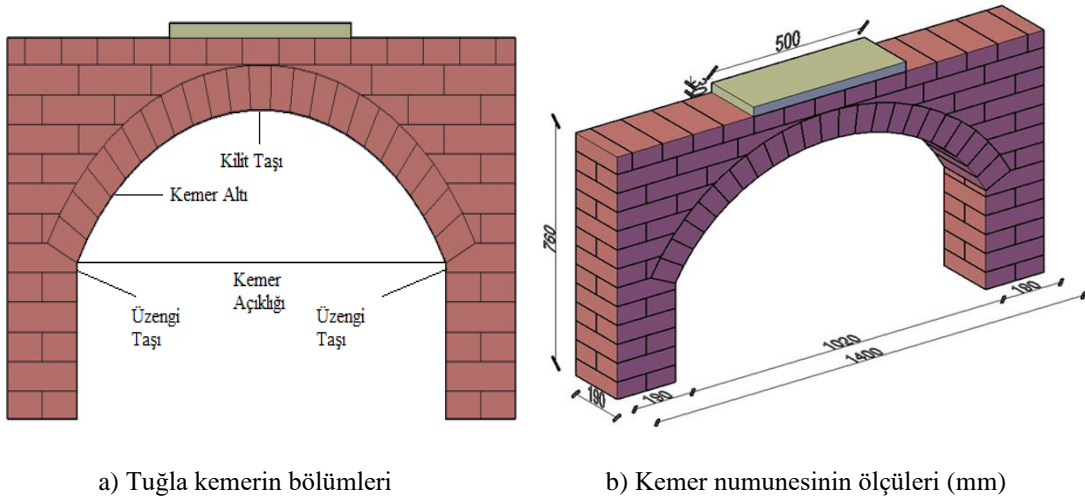
Şekil 6.1. Kemer yapımının aşamaları

Deney sırasında kemere gelen yükün düzgün yayılmasını sağlayabilmek ve uygulanan yük sonucunda pres tuğlanın zarar görmesini önleyebilmek için kemerin üst kısmına kilit taşında ortalayacak şekilde 19x50 cm<sup>2</sup> şerit genişliğinde ve 3 cm kalınlığında betondan lento kiriş imal edilmiştir. Şekil 6.2’de kemer üstündeki lento kiriş görülmektedir.



Şekil 6.2. Kemer üstü lento kiriş imalatı

Daha sonra kemer numunelerine 28 gün boyunca kür uygulanmıştır. Bu işlemden sonra referans numunesi hariç diğer kemer numunelerin üç farklı FRP (karbon, aramid ve cam) ile güçlendirilme işlemi yapılmıştır. Şekil 6.3’de kemer numunesinin bölümleri ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 6.3. Tuğla kemer numunesinin bölümleri ve ölçüleri

## 6.2. Kemer Numunelere Fiber Kumaşların Uygulanması

### 6.2.1. Model – 1 (Karbon Fiber Kumaşın Tuğla Kemere Uygulanması)

Tuğla kemer numuneler karbon fiber uygulamasının daha sağlıklı yapılabilmesi için öncelikle yabancı madde ve toz parçalarından temizlenmiştir. Daha sonra her iki üzengi taşının 12 cm altından başlayarak 19 cm genişliğinde ve tüm kemer eğrisini içine alacak şekilde epoksi uygulaması yapılmıştır. Bunun üzerine karbon fiber kumaşı (CFRP) tüm epoksi uygulamasını kapatacak şekilde kemer numunesine yapıştırılmıştır. Bu işlemden sonra kumaş üzerine tekrar epoksi uygulanarak numuneler bir hafta bekletilmiştir. Şekil 6.4’de deneylerde kullanılan karbon fiber kumaşı, CFRP’nin kemere uygulanışı, CFRP uygulanmış kemer numunesi ve Model-1’in AutoCAD çizimi görülmektedir.



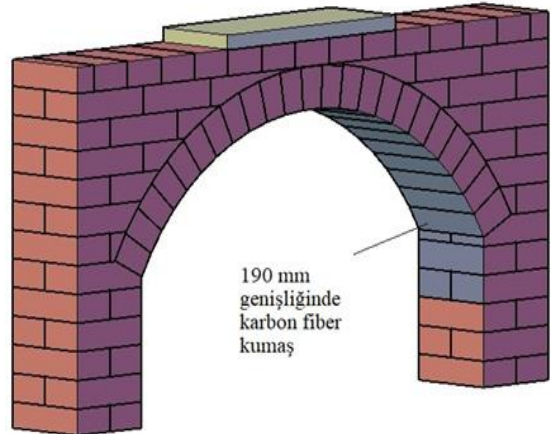
a) Karbon fiber kumaş (CFRP)



b) CFRP’nin kemere uygulanması



c) CFRP uygulanmış kemer numunesi



d) Model-1 kemerin AutoCAD çizimi

Şekil 6.4. Karbon Fiber kumaşın genel görüntüsü ve tuğla kemere uygulanmış hali

### 6.2.2. Model – 2 (Aramid Fiber Kumaşın Tuğla Kemere Uygulanması)

Tuğla kemer numuneler aramid fiber uygulamasının daha sağlıklı yapılabilmesi için öncelikle yabancı madde ve toz parçalarından temizlenmiştir. Daha sonra her iki üzengi taşının 12 cm altından başlayarak 19 cm genişliğinde ve tüm kemer eğrisini içine alacak şekilde epoksi uygulaması yapılmıştır. Bunun üzerine aramid fiber kumaşı (AFRP) tüm epoksi uygulamasını kapatacak şekilde kemer numunesine yapıştırılmıştır. Bu işlemden sonra kumaş üzerine tekrar epoksi uygulanarak güçlendirilmiş numuneler bir hafta bekletilmiştir. Şekil 6.5’de deneylerde kullanılan aramid fiber kumaşı, AFRP’nin kemere uygulanışı, AFRP uygulanmış kemer numunesi ve Model-2’nin AutoCAD çizimi verilmiştir.



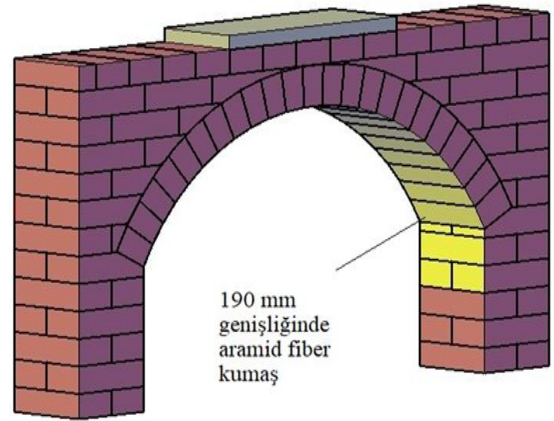
a) Aramid fiber kumaş (AFRP)



b) AFRP’nin kemere uygulanması



c) AFRP uygulanmış kemer numunesi



d) Model-2 kemerin AutoCAD çizimi

**Şekil 6.5.** Aramid Fiber kumaşın genel görüntüsü ve tuğla kemere uygulanmış hali

### 6.2.3. Model – 3 (Cam Fiber Kumaşın Tuğla Kemere Uygulanması)

Tuğla kemer numuneler cam fiber uygulamasının daha sağlıklı yapılabilmesi için öncelikle yabancı madde ve toz parçalarından temizlenmiştir. Daha sonra her iki üzengi taşının 12 cm altından başlayarak 19 cm genişliğinde ve tüm kemer eğrisini içine alacak şekilde epoksi uygulaması yapılmıştır. Bunun üzerine cam fiber kumaşı (GFRP) tüm epoksi uygulamasını kapatacak şekilde kemer numunesine yapıştırılmıştır. Bu işlemden sonra kumaş üzerine tekrar epoksi uygulanarak güçlendirilmiş numuneler bir hafta bekletilmiştir. Şekil 6.6'da deneylerde kullanılan cam fiber kumaşı, GFRP'nin kemere uygulanışı, GFRP uygulanmış kemer numunesi ve Model-3'ün AutoCAD çizimi görülmektedir.



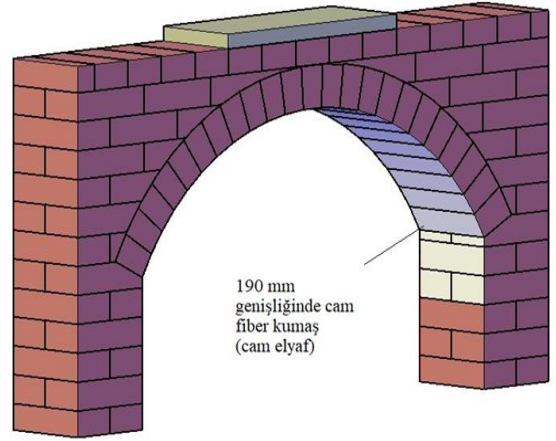
a) Cam fiber kumaş (GFRP)



b) GFRP'nin kemere uygulanması



c) GFRP uygulanmış kemer numunesi



d) Model-3 kemerin AutoCAD çizimi

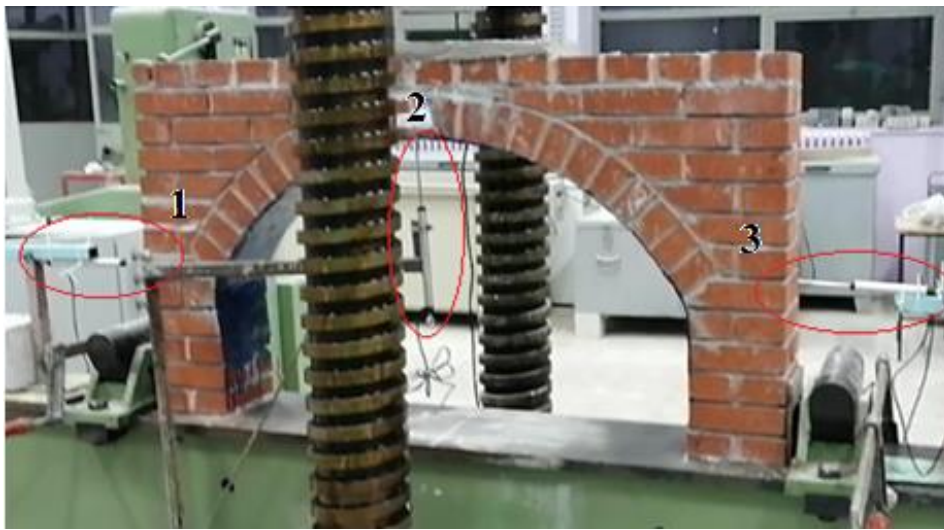
**Şekil 6.6.** Cam Fiber kumaşın genel görüntüsü ve tuğla kemere uygulanmış hali

Tüm kemer numuneler hazırlandıktan sonra deneyler esnasında düşey ve yatay yöndeki deplasmanların okunabilmesi için kemer numunelerinde aynı yere sabitlenmiş 3 adet Linear Variable Differential Transformer (LVDT) kullanılmıştır (Şekil 6.7). Kullanılan deplasman ölçerlerin direnci 5 k-ohm ölçüm boyu ise 30 cm'dir.



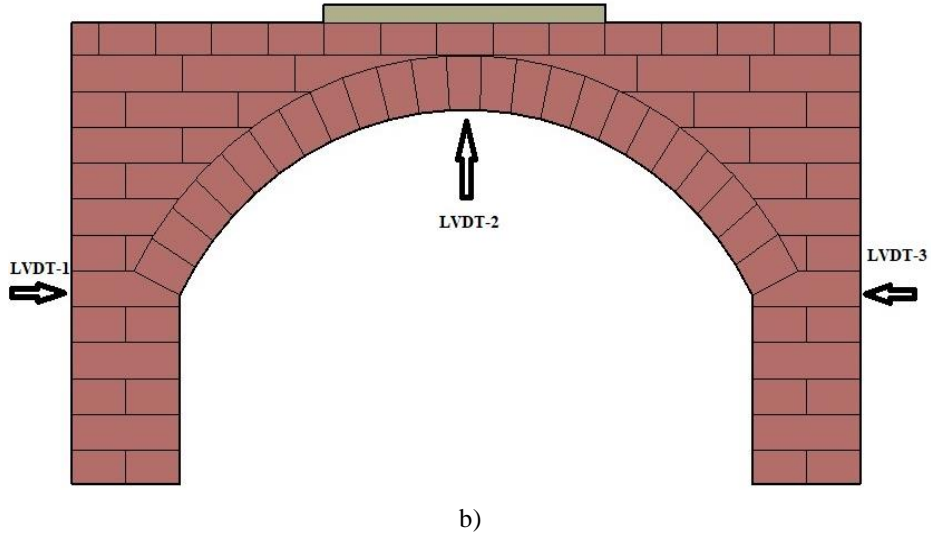
Şekil 6.7. Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

Bu LVDT'lerin ikisi yatay yönde biri ise düşey yönde kemer numunelere yerleştirilmiştir. Üzengi taşı hizasına yerleştirilen LVDT -1 ve LVDT -3 yatay yöndeki deplasmanlar için, kilit taşı hizasına yerleştirilen LVDT-2 ise düşey yöndeki deplasmanlar için kullanılmıştır. Deneyler esnasında kemer numuneye düşey ve yatay yönde yerleştirilen deplasman ölçerlerin elde ettikleri okuma değerleri veri toplama ünitesine (TESTBOX-1001) aktarılmıştır. Şekil 6.8'de kullanılan LVDT'lerin kemer numune üzerindeki yerleşimi ve AutoCAD çizimi verilmiştir.



a)

Şekil 6.8. LVDT lerin kemer numune üzerindeki yerleşimi



Şekil 6.8. (Devamı) LVDT lerin kemer numune üzerindeki yerleşimi

### 6.3. Deney Düzenegi ve Yapılan Deneyler

Tuğla kemer numuneleri hazırlanıp deplasman ölçerler kemer numunelere yerleştirdikten sonra ilgili deneyler Fırat Üniversitesi Yapı Laboratuvarında bulunan hidrolik basınç test presi yardımıyla yapılmıştır. Hazırlanan kemer numuneler hidrolik basınç presi yardımıyla düzgün artan düşey tekil bir yüke maruz bırakılmış numunelerin taşıdığı yük değerleri yük hücresi (300 kN kapasiteli) ile meydana gelen yatay ve düşey deplasmanlar ise deplasman ölçerler ile veri toplama ünitesine aktarılmıştır. Şekil 6.9'da kemer numuneler için kullanılan deney düzenegi görülmektedir.



Şekil 6.9. Deney düzenegi yerleşimi

Deneyler için toplam 10 adet kemer numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin 1 adeti referans numunesi olarak dikkate alınmıştır. Diğer numuneler ise 3'er adet olarak karbon, aramid (kevlar) ve cam fiber kumaşlarla güçlendirilmiştir. Yapılan deneylerde kemer numuneler referans numune, karbon fiber kumaşla güçlendirilmiş numuneler Model-1, aramid fiber kumaşla güçlendirilmiş numuneler Model-2 ve cam fiber kumaşla güçlendirilmiş numuneler ise Model-3 olarak adlandırılmıştır.

### 6.3.1. Referans Kemer Numune

Referans kemer numunesi hazırlandıktan sonra 28 gün beklenmiş daha sonra yüklemeye alınmıştır. Yükleme kemerin tam ortasından kilit taşı hizasından tekil yük etkisi altında yapılmıştır. Şekil 6.10'da referans numunesinin yüklemeden önceki hali verilmiştir.



Şekil 6.10. Referans numunesinin yükleme önceki durumu

Yükleme sonucunda referans numunesinin göçme durumu Şekil 6.11'de verilmiştir. Şekil 6.11 incelendiğinde referans numunesinin yerleştirilen LVDT-1 seviyesinde üzengi taşının alt kısmından tamamen ayrıldığı (yatay derzlerden) ayrıca LVDT-2'nin bulunduğu kilit taşı seviyesinde de tuğlanın düşey derzden ayrıldığı görülmüştür.



a) Kemerin göçme durumu



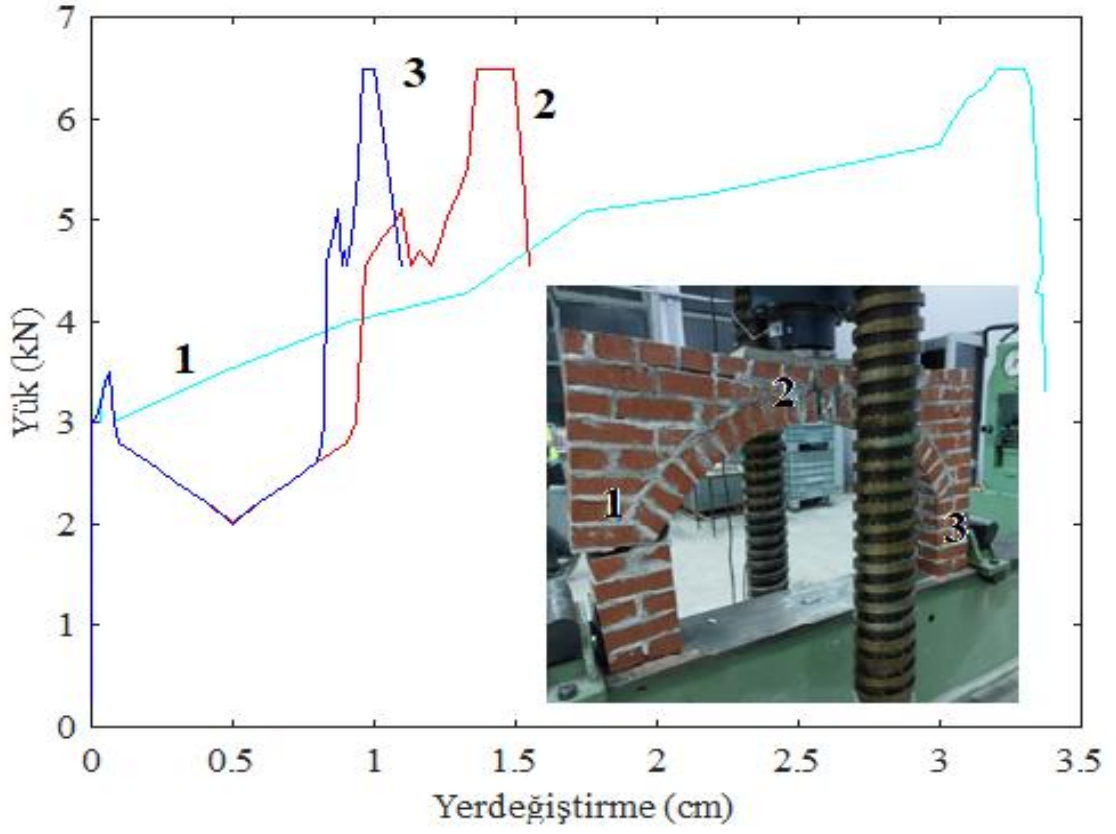
b) Göçme durumunda üzengi taşı seviyesinde ayrılma



c) Göçme durumunda kilit taşı seviyesinde ayrılma

**Şekil 6.11.** Referans numunesi göçme durumu ayrıntıları

Şekil 6.12’de referans numunenin yük–yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Referans numunenin göçme anına ulaştığı anda taşıdığı maksimum yük 6.49 kN’dur. Maksimum yük anında okunan yer değiştirme değerleri ise LVDT-1’de 3.3 cm, LVDT-2’ de 1.49 cm ve LVDT-3’te ise yaklaşık 1 cm olarak okunmuştur. Referans numune için en fazla deplasman LVDT-1’ de kaydedilmiştir. Referans numunesinde görülen göçme durumu dikkate alınarak fiber kumaşlar güçlendirilmiş kemerlerde kemer karın bölgesini ve üzengi taşından sonraki iki tuğlayı da (her iki üzengi taşınının 120 mm altından başlayıp 190 mm genişliğinde olacak şekilde) içine alacak şekilde uygulanmıştır.



Şekil 6.12. Referans numunesi LVDT grafikleri

### 6.3.2. Karbon Fiber Kumaş (CFRP) Uygulanmış Numuneler (Model-1)

#### 1. Numune

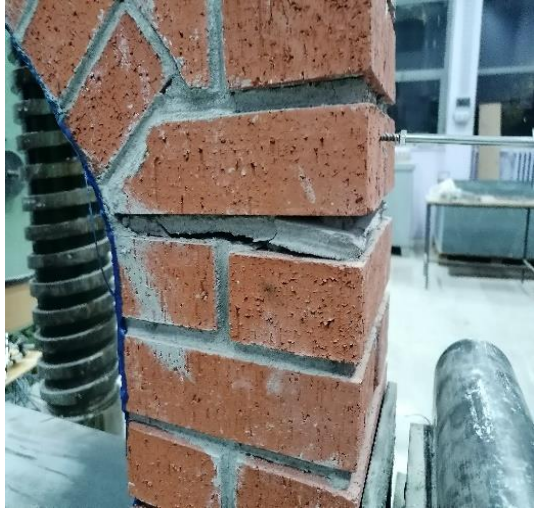
Yükleme sonucunda CFRP uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu Şekil 6.13'de verilmiştir. Şekil 6.13 incelendiğinde yüklemeye sonucunda 1. Numunenin LVDT-1'i yerleştirdiğimiz üzenği taşının hemen üstündeki yatay derzden ayrıldığı görülmektedir. Ancak yatay derzde referans numuneden farklı olarak tam bir ayrılma görülmemiştir. Ayrıca kemer diğer ayağında (sağ) üzenği taşı seviyesinde yerleştirdiğimiz LVDT-3'ün hemen altındaki yatay derzde de ayrılma meydana gelmiştir. LVDT-2'nin bulunduğu kilit taşı seviyesinde de tuğlanın düşey derzden ayrıldığı görülmüştür. Ayrıca karbon fiber kumaş da yer yer kemer numuneden ayrılmıştır.



a) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sol ayak)



b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma



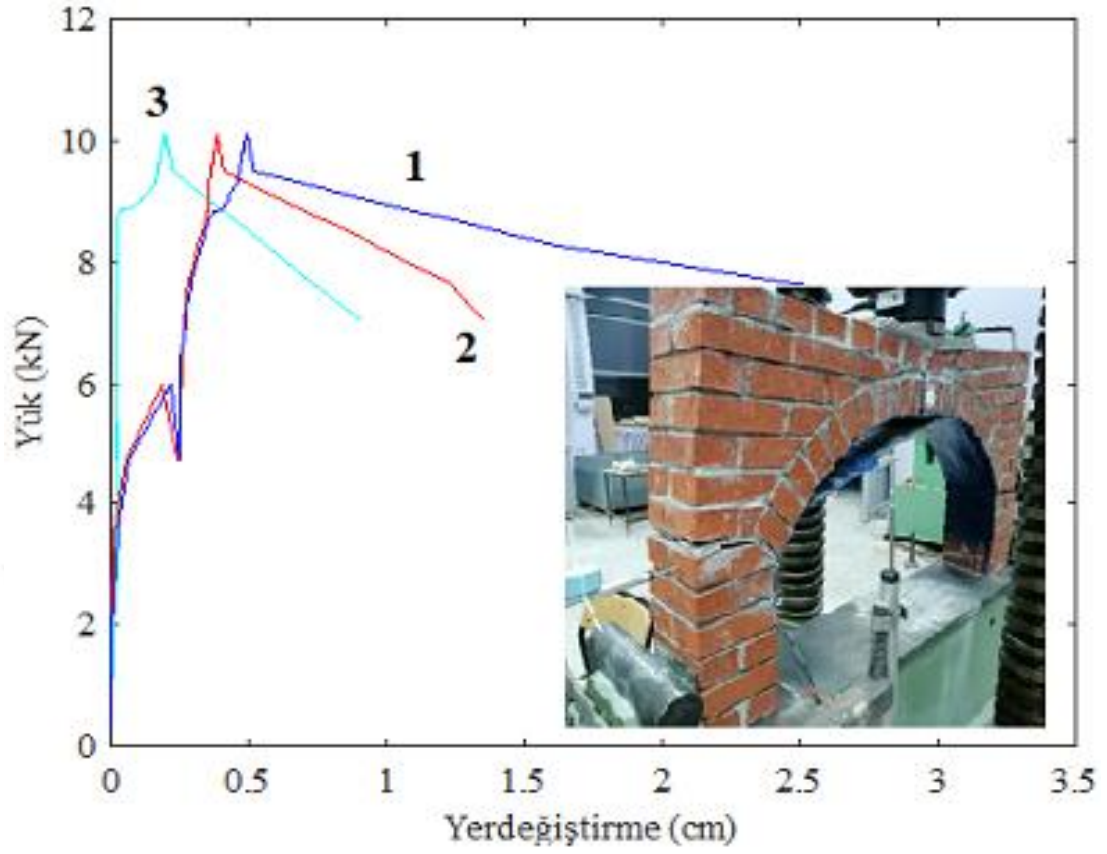
c) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sağ ayak)



d) Kemerin göçme durumu

**Şekil 6.13.** Karbon fiber uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu

Karbon fiber uygulanmış 1. Numunenin yük–yer değıştirme grafikleri Şekil 6.14’de verilmiştir. Şekil 6.14 incelendiğinde 1. Numunenin göçme anında taşıdığı maksimum yük 10.11 kN’dur. Maksimum yük anında okunan yer değıştirme değeri ise LVDT-1, LVDT-2 ve LVDT-3 için sırasıyla 0.492 cm, 0.385 cm ve 0.196 cm dir. Karbon fiber uygulanmış 1. Numune için en büyük yer değıştirme LVDT-2’de kaydedilmiştir. Ayrıca karbon lifle güçlendirilmiş 1. Numunenin taşıdığı maksimum yük miktarı referans numuneye göre 1.56 kat daha fazladır.



Şekil 6.14. Karbon fiber uygulanmış 1. Numunenin LVDT grafikleri

## 2. Numune

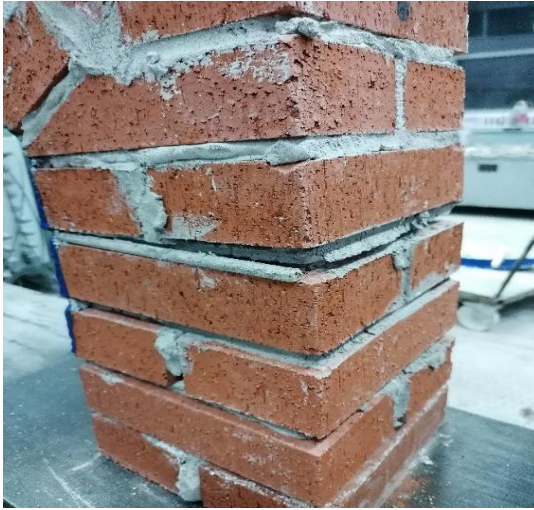
Yükleme sonucunda karbon fiber kumaş uygulanmış 2. Numunenin göçme durumu Şekil 6.15’de verilmiştir. Sol ve sağ kemer ayaklarında ve kilit taşı hizasında elde edilen göçme durumları 1. Numuneye benzerdir. LVDT-1 ve LVDT-3 ün yerleştirildiği üzenği taşı seviyesinde tuğla malzemeler yatay derzden ayrılmıştır. Ayrıca LVDT-2 nin yerleştirildiği kemer kilit taşı seviyesinde tuğla malzemeler düşey derzden ayrılmıştır. Karbon fiber kumaşta meydana gelen ayrılma 1. Numune ile karşılaştırıldığında sınırlı düzeydedir.



a) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sol ayak)



b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma



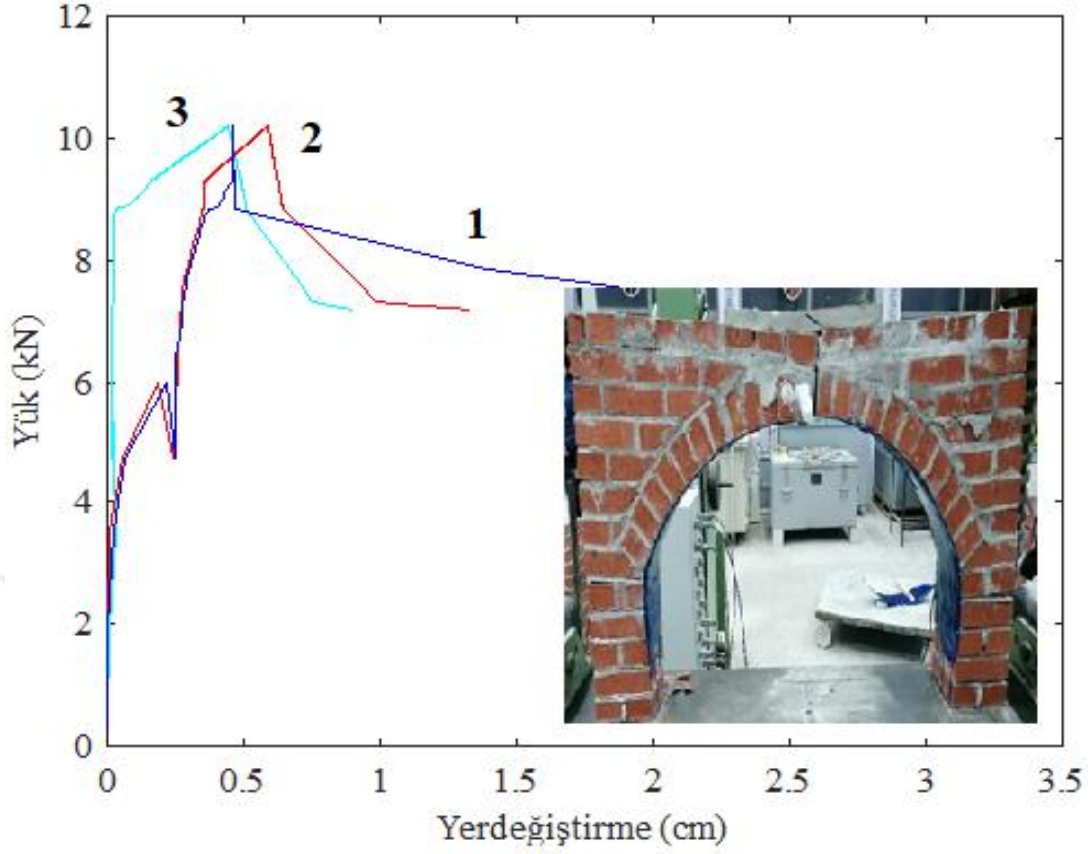
c) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sağ ayak)



d) Kemerin göçme durumu

**Şekil 6.15.** Karbon fiber uygulanmış 2. Numunenin göçme durumu

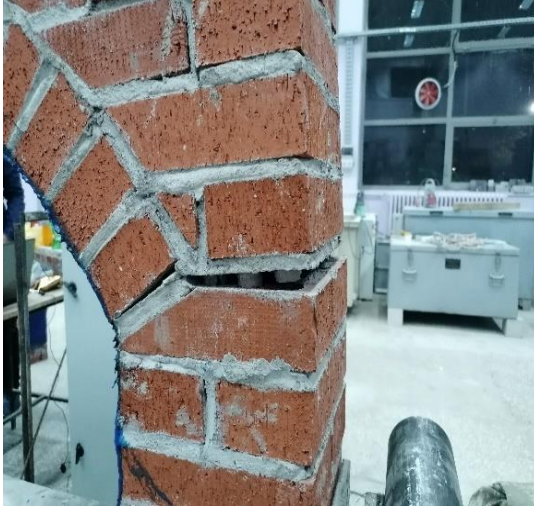
Karbon fiber uygulanmış 2. Numunenin yük–yer değiştirme grafikleri Şekil 6.16’da verilmiştir. İkinci numunenin göçme anında taşıdığı maksimum yük 10.20 kN’a ulaşmıştır. Maksimum yük anında okunan yer değiştirme değerleri ise LVDT-1 için 0.458 cm, LVDT-2 için 0.588 cm ve LVDT-3 için 0.444 cm dir. Karbon lifi uygulanmış 2. Numune için en büyük yer değiştirme LVDT-2’de ölçülmüştür. Ayrıca karbon fiber ile güçlendirilmiş 2. Numune referans numuneye göre 1.57 kat daha fazla yük taşımıştır.



Şekil 6.16. Karbon fiber uygulanmış 2. Numunenin LVDT grafikleri

### 3. Numune

Karbon fiber kumaş uygulanmış 3. Numunenin yükleme sonucunda göçme hali Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekil 6.17 incelendiğinde yükleme sonucunda 3. Numunenin LVDT-3’ü yerleştirdiğimiz üzengi taşının hemen üstündeki yatay derzden ayrıldığı görülmektedir. Kemer diğer ayağında (sol) üzengi taşı seviyesinde ise belirgin bir ayrılma gözlenmemiştir. LVDT-2’nin bulunduğu kilit taşı seviyesinde de tuğlanın düşey derzden ayrıldığı görülmüştür. Ayrıca karbon fiber kumaş da kemer numuneden ayrılmıştır.



a) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sağ ayak)



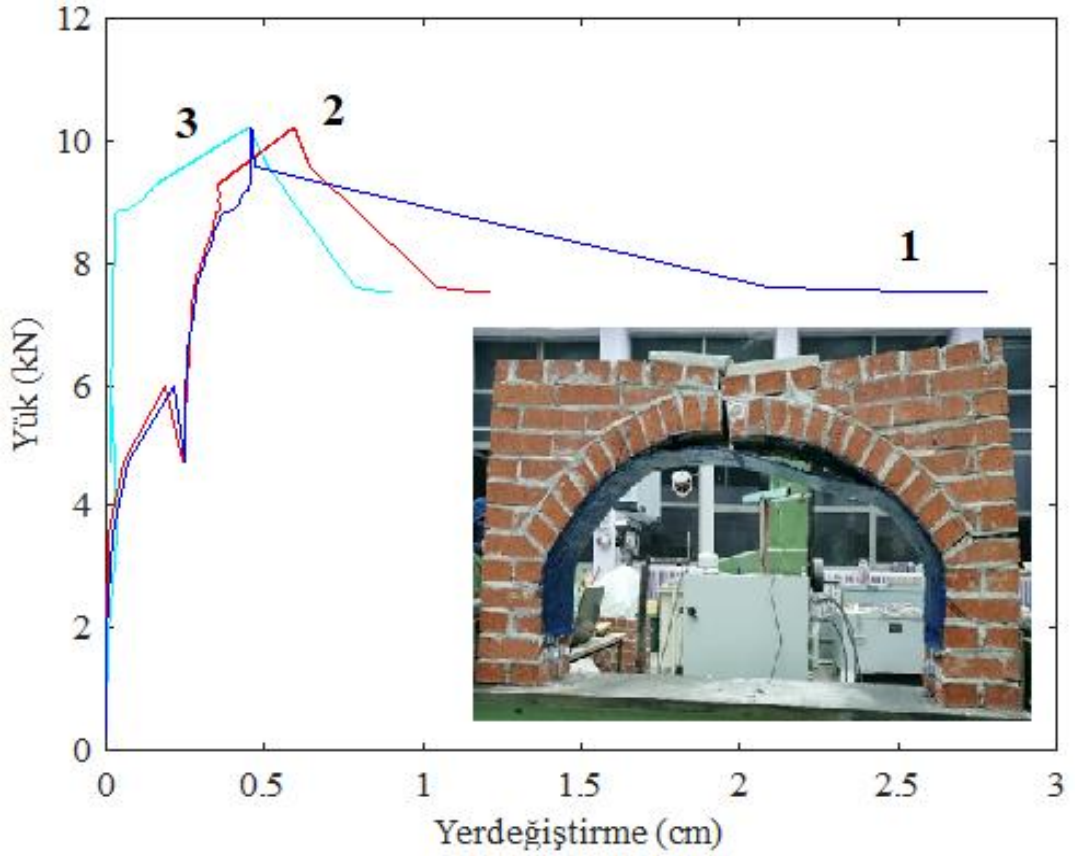
b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma



c) Yükleme sonunda göçme durumu

**Şekil 6.17.** Karbon fiber uygulanmış 3. Numunenin göçme durumu

Karbon fiber uygulanmış 3. Numunenin yük–yer değiştirme grafikleri Şekil 6.18’de verilmiştir. Üçüncü numunenin göçme anında taşıdığı maksimum yük 10.22 kN’dur. Maksimum yük anında okunan yer değiştirme değerleri ise LVDT-1, LVDT-2 ve LVDT-3 için sırasıyla 0.459 cm, 0.593 cm ve 0.450 cm dir. Karbon fiber uygulanmış 3. Numune için en büyük yer değiştirme değeri LVDT-2’de kaydedilmiştir. Ayrıca karbon fiber ile güçlendirilmiş 3. Numunenin taşıdığı maksimum yük miktarı referans numuneye göre 1.57 kat daha fazladır.



Şekil 6.18. Karbon fiber uygulanmış 3. Numunenin LVDT grafikleri

### 6.3.3. Aramid Fiber Kumaş (AFRP) Uygulanmış Numuneler (Model-2)

#### 1. Numune

Yüklemeye sonunda AFRP uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekil 6.19'dan görüldüğü üzere 1. Numunenin LVDT-1'i yerleştirdiğimiz üzengi taşının hemen üstündeki yatay derzden ayrıldığı görülmektedir. Ancak kemer diğer ayağında (sol) üzengi taşı seviyesinde bir ayrılma görülmemiştir. LVDT-2 nin bulunduğu kilit taşı seviyesinde de tuğla düşey derzden ayrılmıştır. Ayrıca aramid fiber kumaş da yer yer kemer numuneden ayrılma gözlenmiştir.



a) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sol ayak)



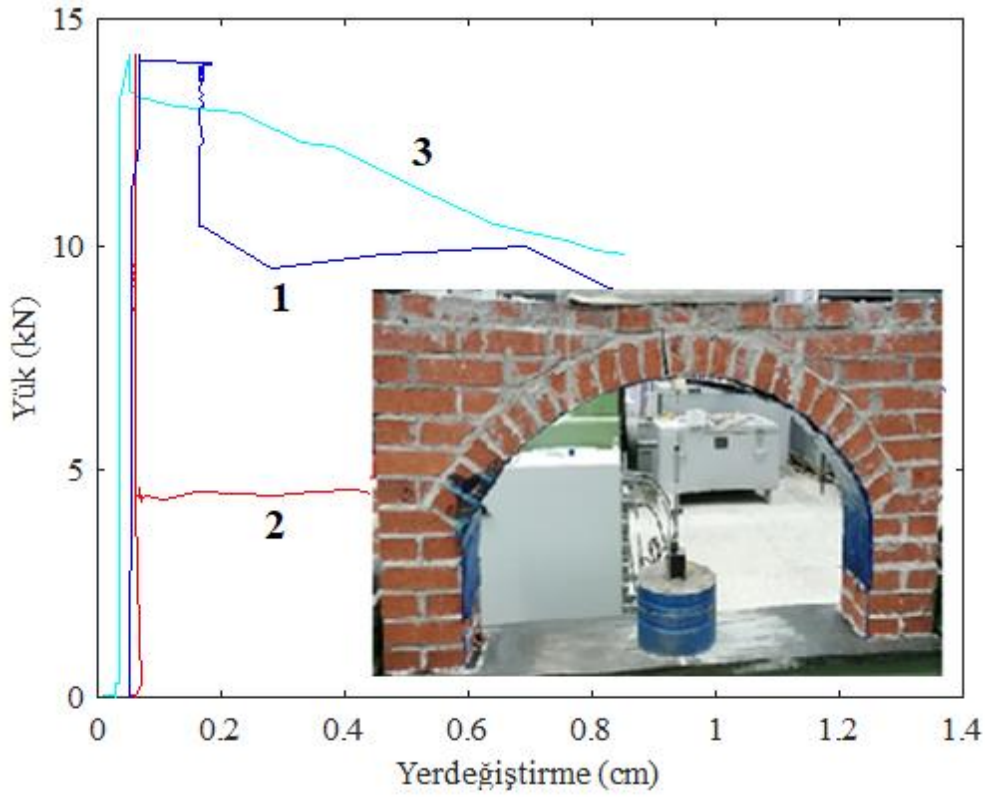
b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma



c) Yükleme sonunda göçme durumu

**Şekil 6.19.** Aramid fiber uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu

Aramid fiber kumaş uygulanmış 1. Numunenin yük – yer değiştirme grafiği Şekil 6.20’de verilmiştir. Numunenin göçme anına ulaştığı andaki taşıdığı maksimum yük 14.21 kN’dur. Yükleme sonucunda LVDT-1, LVDT-2 ve LVDT-3’te sırasıyla 0.0665 cm, 0.0610 cm ve 0.0515 cm deplasman okunmuştur. Aramid fiber kumaş uygulanmış 1. Numune de en fazla deplasman LVDT-1’de okunmuştur. Aramid fiber kumaşla güçlendirilmesi yapılmış 1. kemer numunesinin maksimum taşıdığı yük referans numunesinin maksimum taşıdığı yüke oranla 2.19 kat daha fazladır.



Şekil 6.20. Aramid fiber uygulanmış 1. Numunenin LVDT grafikleri

## 2. Numune

Yüklemeye sonucunda AFRP uygulanmış 2. Numunedeki göçme durumu Şekil 6.21'de verilmiştir. Şekil 6.21'de görüldüğü üzere kemer numunesi LVDT-1'i yerleştirdiğimiz üzengi taşı seviyesinin altından yatay derzden ayrılmıştır. Kemer diğer ayağı (sol) üzengi seviyesinde de yatay derzde çatlak meydana gelmiş ancak harç ve tuğla arasında tam bir ayrışma meydana gelmemiştir. LVDT-2 nin bulunduğu kilit taşı seviyesinde de tuğla düşey derzden ayrılmıştır. Ayrıca aramid fiber kumaşta kemer numuneden bazı yerlerde ayrılma gözlemlenmiştir.



a) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sol ayak)



b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma



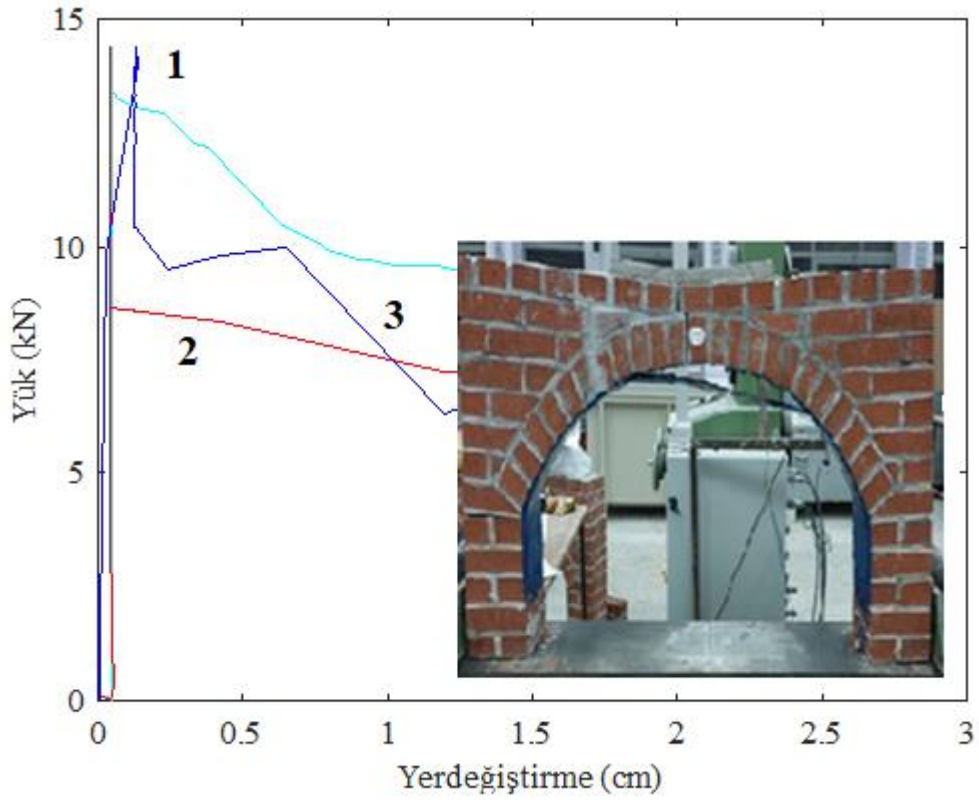
c) Üzengi taşı seviyesinde çatlama (sağ ayak)



d) Yüklemeye sonunda göçme durumu

**Şekil 6.21.** Aramid fiber uygulanmış 2. Numunenin göçme durumu

Aramid fiber kumaş uygulanmış 2. numunenin yük – yer değiştirme grafiği Şekil 6.22’de verilmiştir. Numunenin göçme anına ulaştığı andaki taşıdığı maksimum yük 14.41 kN’dur. Yükleme sonucunda LVDT-1’de 0.130 cm, LVDT-2’ de 0.044 cm ve LVDT-3’de ise 0.050 cm yer değiştirme ölçülmüştür. İkinci numunede en fazla yer değiştirme LVDT-1’de meydana gelmiştir. Aramid fiber kumaşla güçlendirilmesi yapılmış 2. numunenin maksimum taşıdığı yük referans numuneye göre 2.22 kat daha fazladır.



Şekil 6.22. Aramid fiber uygulanmış 2. Numunenin LVDT grafikleri

### 3. Numune

Şekil 6.23'de yükleme sonucunda AFRP uygulanmış 3. numunedeki göçme durumu verilmiştir. Şekil 6.23'de görüldüğü üzere üzengi seviyesindeki tuğlalar yatay derzden ayrılmıştır. Sağ kemer ayağında üzengi seviyesinde meydana gelen açılma daha fazladır. Ayrıca LVDT-2 nin yerleştirildiği kilit taşı seviyesinde de tuğla düşey derzden ayrılmış ve bu seviyedeki tuğla kırılmıştır. Kullanılan aramid lifli kumaşta yer yer kemer numuneden ayrılmıştır.



a) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sol ayak)



b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma ve tuğlada kırılma



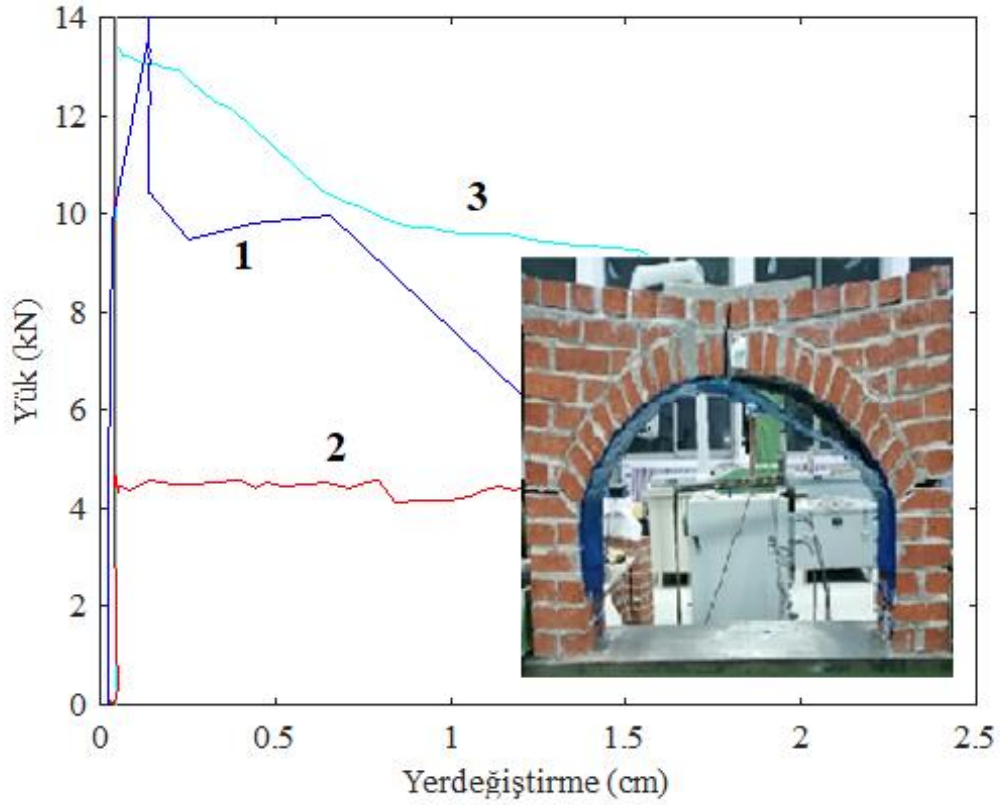
c) Üzengi taşı seviyesinde çatlama (sağ ayak)



d) Yükleme sonunda göçme durumu

**Şekil 6.23.** Aramid fiber uygulanmış 3. Numunenin göçme durumu

Aramid fiber kumaş uygulanmış 3. numunenin yük – yer değiştirme grafiği Şekil 6.24’de verilmiştir. Numunenin göçme anına ulaştığı andaki taşıdığı maksimum yük 13.98 kN’dur. Maksimum yük anında LVDT-1, LVDT-2 ve LVDT-3’de elde edilen yer değiştirmeler sırasıyla 0.141 cm, 0.041 cm ve 0.0465 cm olarak bulunmuştur. Üçüncü numunede en fazla yer değiştirme LVDT-1’de meydana gelmiştir. Aramid fiber kumaşla güçlendirilmesi yapılmış 3. numunenin maksimum taşıdığı yük referans numuneye oranla 2.15 kat daha fazladır.



Şekil 6.24. Aramid fiber uygulanmış 3. Numunenin LVDT grafikleri

#### 6.3.4. Cam Fiber Kumaş (GFRP) uygulanmış numuneler (Model-3)

##### 1. Numune

Yükleme sonunda GFRP uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu Şekil 6.25'te verilmiştir. Şekil 6.25 incelendiğinde 1. Numunenin LVDT-3'ü yerleştirdiğimiz üzengi taşının hemen altındaki yatay derzden ayrıldığı görülmektedir. Ancak kemer diğer ayağında (sol) üzengi taşı seviyesinde bir ayrılma yoktur. LVDT-2 nin bulunduğu kilit taşı seviyesinde de tuğla düşey derzden ayrılmıştır. Ayrıca cam fiber kumaş da yer yer kemer numuneden ayrılma görülmüştür.



a) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sağ ayak)



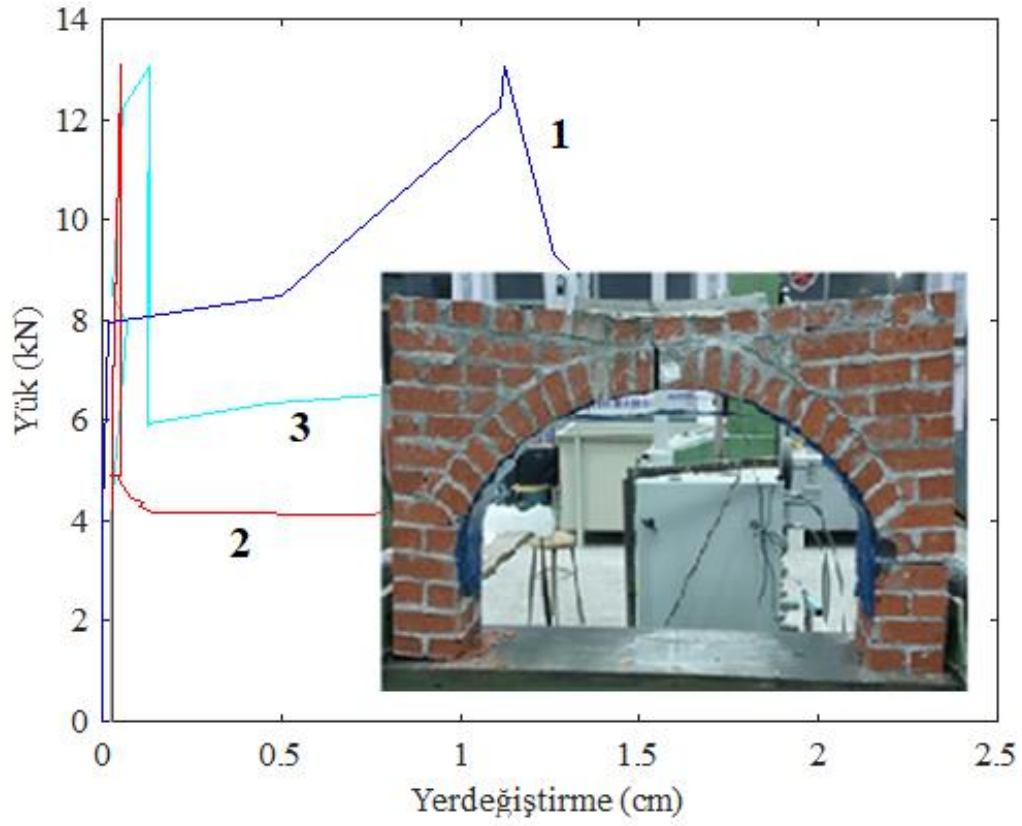
b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma



c)Yüklemeye sonunda göçme durumu

**Şekil 6.25.** Cam fiber uygulanmış 1. Numunenin göçme durumu

Cam fiber kumaş uygulanmış 1. numunenin yük – yer değiştirme grafiği Şekil 6.26’da verilmiştir. Numunenin göçme anına ulaştığı andaki taşıdığı maksimum yük 13.10 kN’dur. Maksimum yük anında LVDT-1 de 1.123 cm, LVDT-2 de 0.052 cm ve LVDT-3’de ise 0.130 cm yer değiştirmeler bulunmuştur. Birinci numunede en fazla yer değiştirme LVDT-1’de meydana gelmiştir. Cam fiber kumaşla güçlendirilmiş 1. numunenin taşıdığı maksimum yük referans numuneye oranla 2.02 kat daha fazladır.



Şekil 6.26. Cam fiber uygulanmış 1. Numunenin LVDT grafikleri

## 2. Numune

Yükleme sonucunda GFRP uygulanmış 2. Numunenin göçme durumu Şekil 6.27'de verilmiştir. Şekil 6.27'de 2. Numunenin LVDT-1'i yerleştirdiğimiz üzengi taşının hemen altındaki yatay derzden basamaklı şekilde ayrıldığı görülmektedir. Ancak kemer diğer ayağında üzengi taşı seviyesinde bir ayrılma görülmemiştir. LVDT-2 nin bulunduğu kilit taşı seviyesinde de tuğla düşey derzden ayrılmıştır. Ayrıca cam fiber kumaş da yer yer kemer numuneden ayrılma görülmüştür.



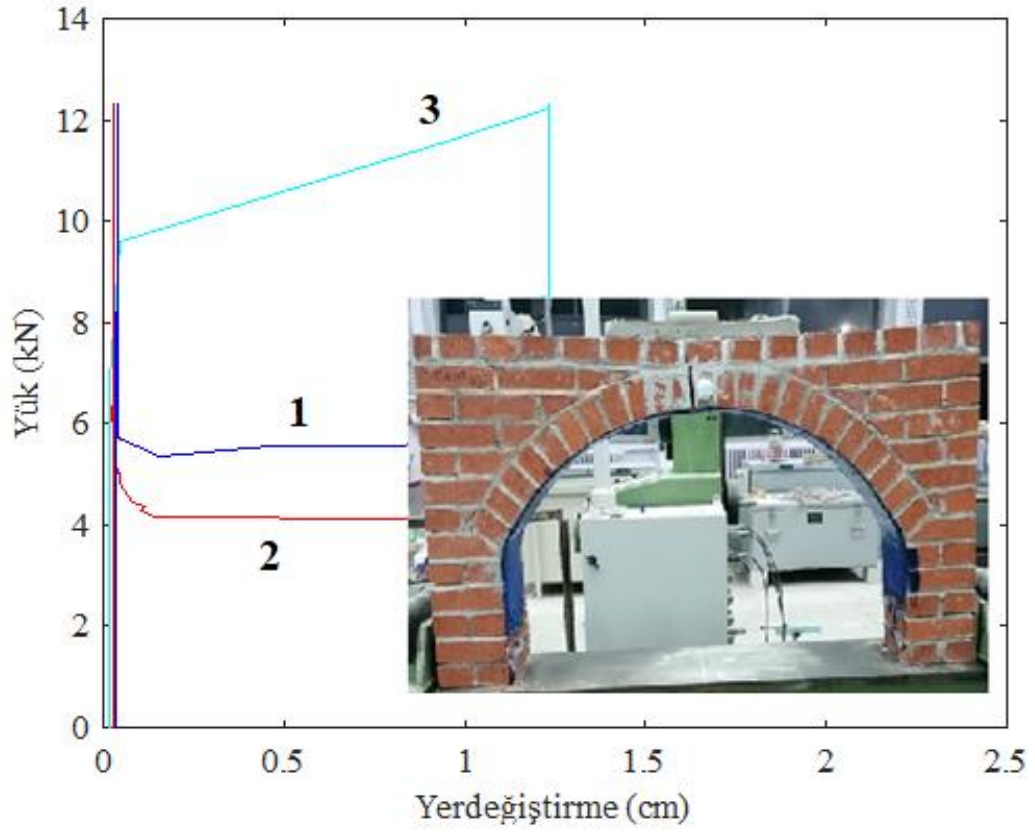
a) Üzengi taşı seviyesinde basamaklı şekilde ayrılma (sol ayak) b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma



c)Yüklemeye sonunda göçme durumu

**Şekil 6.27.** Cam fiber uygulanmış 2. Numunenin göçme durumu

Cam fiber kumaş uygulanmış 2. numunenin yük – yer değıştirme grafiği Şekil 6.28’de verilmiştir. Numunenin göçme anına ulaştığı andaki taşıdığı maksimum yük 12.31 kN’dur. Maksimum yük anında LVDT-1, LVDT-2 ve LVDT-3’de elde edilen yer değıştirme değeri sırasıyla 0.041 cm, 0.032 cm ve 1.230 cm dir. İkinci numunede en fazla yer değıştirme LVDT-3’de görülmüştür. Cam fiber kumaşla güçlendirilmiş 2. numunenin taşıdığı maksimum yük referans numuneye oranla 1.90 kat daha fazladır.



Şekil 6.28. Cam fiber uygulanmış 2. Numunenin LVDT grafikleri

### 3. Numune

Yüklemeye sonunda GFRP uygulanmış 3. Numunenin göçme durumu Şekil 6.29'da verilmiştir. Şekil 6.29 incelendiğinde 3. Numunenin LVDT-3'ü yerleştirdiğimiz üzengi taşının hemen üstündeki yatay derzden ayrıldığı görülmektedir. Ancak kemer diğer ayağında üzengi taşı seviyesinde bir ayrılma yoktur. Ancak sol kemer ayağının alt kısmında tuğla malzemede bir ezilme gözlemlenmiştir. LVDT-2 nin bulunduğu kilit taşı seviyesinde ise tuğla düşey derzden ayrılmıştır. Ayrıca cam fiber kumaş kilit taşı seviyesinden kopmuştur.



a) Üzengi taşı seviyesinde ayrılma (sağ ayak)



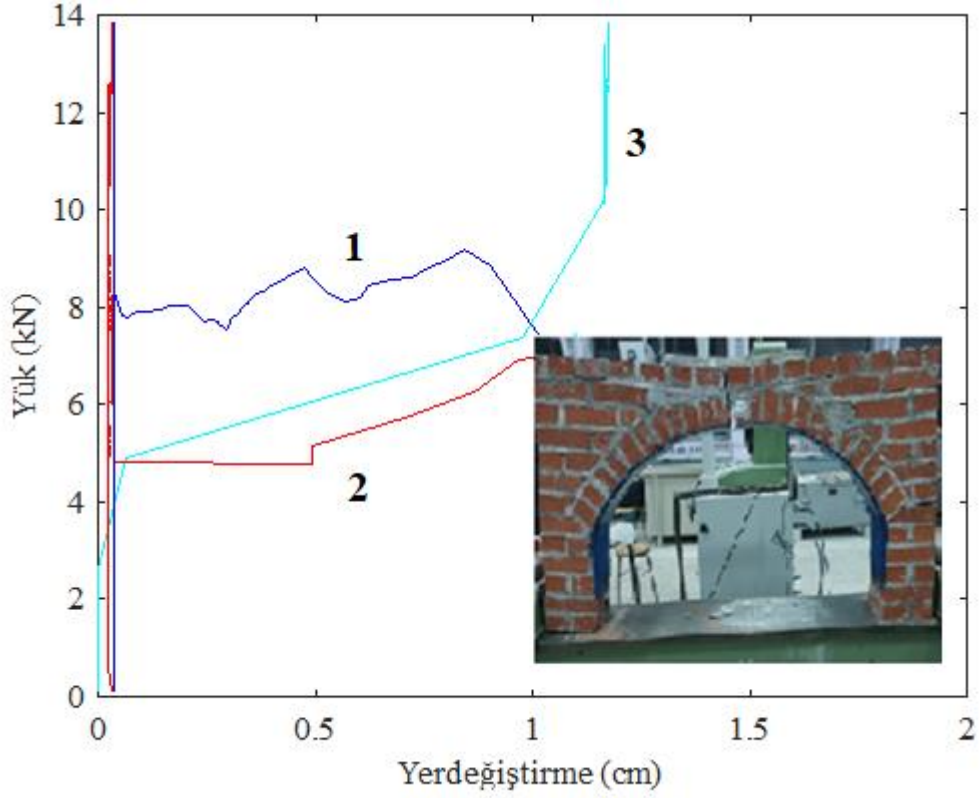
b) Kilit taşı seviyesinde ayrılma



c)Yüklemeye sonunda göçme durumu

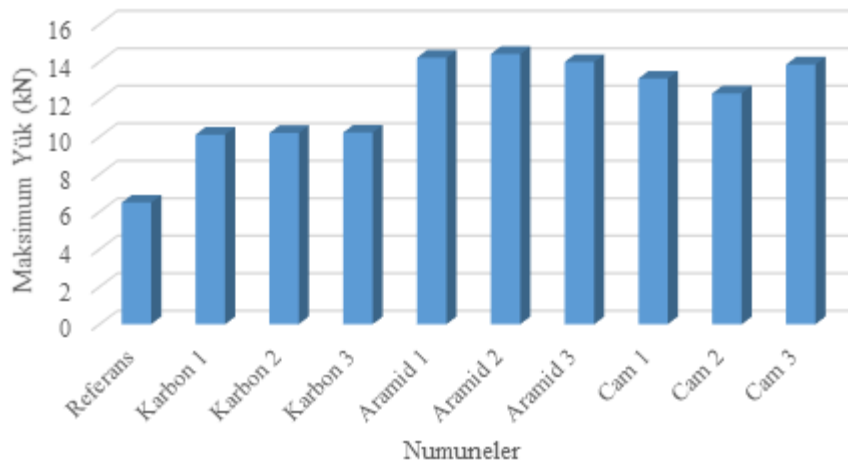
Şekil 6.29. Cam fiber uygulanmış 3. Numunenin göçme durumu

Camfiber kumaş uygulanmış 3. numunenin yük – yer değiştirme grafiği Şekil 6.30’da verilmiştir. Üçüncü numunenin göçme anına ulaştığı andaki taşıdığı maksimum yük 13.85 kN’dur. Maksimum yük anında LVDT-1’de 0.041 cm, LVDT-2’de 0.0305 cm ve LVDT-3’de ise 1.173 cm yer değiştirme okunmuştur. Üçüncü numunede en fazla yer değiştirme LVDT-3’de görülmüştür. Cam fiber kumaşla güçlendirilmiş 3. numunenin taşıdığı maksimum yük referans numuneye oranla 2.13 kat daha fazladır.



Şekil 6.30. Cam fiber uygulanmış 3. Numunenin LVDT grafikleri

Yapılan deneyler sonucunda kemerlerin taşıdığı maksimum yük açısından en yüksek değerler aramid fiber kumaş ile güçlendirilmiş kenmer numunelerde elde edilmiştir. Aramid fiber kumaşı sırasıyla cam fiber kumaş ve karbon fiber kumaş izlemiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri toplu halde Şekil 6.31’de verilmiştir. Ayrıca kullanılan her üç kumaş türü referans numuneye göre yer değıştirme değerlerini azaltmıştır.



Şekil 6.31. Numunelerin maksimum taşıma yük değerleri

## 5. SONUÇLAR

Geniş açıklıkları geçmede kullanılan taşıyıcı yapı elemanı olan kemerler geçmişten günümüze kadar çeşitli yapılarda kullanılmaktadır. İlk örnekleri Sümerler döneminde görülmesine rağmen daha sonra gelen çoğu medeniyetlerde bu taşıyıcı yapı elemanlarını kullanmışlardır. Ayrıca geçmişten günümüze ülkemizde farklı medeniyetlerin yaptığı tarihi yapılarda bir çok kemer çeşidini görmek mümkündür. Bu tez çalışmasında 1 adet referans ve 9 adet güçlendirilmiş kemer numunesi olmak üzere 10 adet kemer numunesi hazırlanmıştır. Daha sonra tüm numuneler 28 gün bekletilmiş, güçlendirilecek numuneler ise epoksi (yapıştırıcı malzemesi) sürülerek üçü karbon, üçü aramid (kevlar) ve üçü cam fiber kumaş ile kemer karın bölgesi ve üzengi taşı iki alt tuğlasını kapsayacak şekilde kaplanmıştır. Bu işlemden sonra güçlendirilmiş kemer numuneler 7 gün daha bekletilerek deney tabii tutulmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda referans numunenin maksimum taşıma yük değeri 6.49 kN, karbon fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri 10.18 kN, aramid fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri 14.20 kN ve cam fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri ise 13.09 kN değerine ulaşmıştır. Deneyler sonucunda karbon fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri referans numunenin maksimum taşıma yük değerine göre 1.57 kat daha fazla olarak elde edilmiştir. Aramid fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri referans numunenin maksimum taşıma yük değerine göre 2.19 kat daha fazla elde edilmiştir. Cam fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri ise referans numunenin maksimum taşıma yük değerine göre 2.02 kat daha fazla elde edilmiştir. Ayrıca güçlendirilmiş kemer numuneleri kendi aralarında kıyasladığımızda aramid fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri cam fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değerine göre 1.08 kat daha fazla elde edilmiştir Aramid fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri karbon fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değerine göre 1.39 kat daha fazla elde edilmiştir. Cam fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değeri karbon fiber kumaş ile güçlendirilmiş numunelerden elde ettiğimiz ortalama maksimum taşıma yük değerine göre ise 1.29 kat daha fazla elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Eren, A. (2018). Tarihi yapılardaki kemerlerin FRP kullanılarak onarılması, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [2] Toy, A.T. (2008). Lifli polimerle kuşatılmış kare ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonların davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] Çetinkaya, N., Kaplan, H. ve Şenel Ş.M. (2004). Betonarme kirişlerin lifli polimer (FRP) malzemeler kullanılarak onarım ve güçlendirilmesi. Pamukkale University Journal of Engineering Science C.10, Sayı 3, 291-298.
- [4] Kılınçarslan, Ş. ve Türker, Y.Ş. (2020). Ahşap malzemelerin FRP ile güçlendirilmesinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi, Süleyman Demirel University Journal of Technical Sciences C.10, Sayı 1, 23-30.
- [5] Gemi, L., Madenci, E., ve Özkılıç, Y.O. (2020). Çelik, cam FRP ve hibrit donatılı betonarme kirişlerin eğilme performansının incelenmesi, Düzce University Journal of Science and Technology C.8, Sayı 2 , 1470-1483
- [6] Özcan, Z. (2005). Betonarme kirişlerin kompozit malzemeler ile güçlendirilmesi, Deprem Sempozyumunda Sunuldu, Kocaeli.
- [7] Sarıbiyık, A. (2018). Betonların güçlendirilmesinde FRP kompozitlerinhibrit olarak kullanımının etkisi, Sakarya University Journal of Science, C.22, Sayı 2 , 383-391.
- [8] Koç, D. (2015). Tarihi yapı taş kemerlerinin FRP ile güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [9] Bal, A., ve Şimşek, S.S. (2019). Tarihi yığma bir yapının lifli polimer (FRP) ile güçlendirme alternatiflerinin araştırılması ve proje uygulaması, Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, C.4, Sayı 3 , 112-119.
- [10] Aydın, F. (2017). GFRP profil aşınma performansının klasik beton aşınma özellikleri ile karşılaştırılması, Sakarya University Journal of Science, C.21, Sayı 5 , 893-898.
- [11] Durmaz, N. (2018). FRP donatılı beton döşemelerin eğilme davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] Borri, A., Castori, G. ve Corradi, M., 2011. Intrados strengthening of brick masonry arches with composite materials, Composites: Part B, 42, 1164-1172.
- [13] Felice, G.D., 2009, Assessment of the load-carrying capacity of multi-span masonry arch bridges using fibre beam elements, Engineering Structures, C.31, Sayı 8, 1634- 1647.
- [14] Shrive, N.G. (2006). The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of Masonry, Construction and Building Materials, C.20, Sayı 4, 269–277.
- [15] Baratta, A. ve Corbi, O. (2007). Stress analysis of masonry vaults and static efficacy of FRP repairs, International Journal of Solids and Structures, C.44, Sayı 24, 8028– 8056.
- [16] Caporale, A., Feo, L. ve Luciano, R., (2012). Limit analysis of FRP strengthened masonry arches via nonlinear and linear programming, Composites Part B: Engineering, C.43, Sayı 2, 439-446
- [17] Tao, Y., Stratford, T.J. ve Chen, J.F. (2011). Behavior of a masonry arch bridge repair using fibre-reinforced polymer composites, Engineering Structures, Sayı 33, 1594-1606.
- [18] Aykaç, B., Acar, D. (2014). Betonarme kirişlerin dıştan yapıştırılmış karbon kumaş ve çelik levhalardan oluşan kompozit malzemeyle güçlendirilmesi, Gazi University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture C.29, Sayı 1, 175-183
- [19] Köksal, H.O., Altınsoy F., Aktan, S., Karahan, Ş. ve Çankaya, R. (2017). Üç noktalı eğilme altındaki betonarme kirişlerde karbon lifli polimerin etkin ve ekonomik kullanımı, Çanakkale Onsekiz Mart University, Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences, C.3, Sayı 2, 1-16

- [20] Maraş M.M. (2021). Betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan FRP kompozitin yapısal performansa etkisi, *European Journal of Science and Technology*, Sayı 23, 108-119
- [21] Sayın, B., Yıldızlar B., ve Özyazgan C., (2010). Fiber Takviyeli Polimer (FRP) Uygulanan Betonarme Kirişlerde Moment-Eğrilik İlişkisi, *C.6*, Sayı 2, 42-56
- [22] Toker, S. ve Ünay, A.İ., (2004). Kemerli taş köprülerin matematiksel modellemesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, C.17, Sayı 2, 129-139.
- [23] McAfee, P., (1998). *Stone Building*, The O'Brien Press Ltd., Dublin, Ireland; 85-90.
- [24] Tetik, T., (2015). Tarihi Yiğma Yapıların Deprem Performansı Ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği Ve Afet Yönetimi Enstitüsü.
- [25] Özer, S.S., 2006. Geleneksel yiğma yapılarda strüktürel elemanların analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [26] Özkaya, S.G., (2013). Tek açıklıklı yiğma kemer köprülerin (Ordu, Sarpdere Köprüsü) göçme yüklerinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [27] Hasol, D., (2016). *Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü*, Yem Yayın, 14. Baskı, İstanbul.
- [28] Aköz, A.H., 2008. Deprem etkisi altındaki tarihi yiğma yapıların onarım ve güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] Bayraktar, A., Kocasinan, Y., Büyükgökmen, D., Kökçü, E. (2005). Tarihi Yiğma Yapıların Depreme Karşı Güçlendirilmesi, Yiğma Yapıların Deprem Güvenliğinin Artırılması Çalıştay Sunumu, Ankara
- [30] Sesigür, H., Çelik, O. C. ve Çılı, F., (2007). İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Bülten, 89, 10-21.
- [31] <https://www.karacangrupinsaat.com/askiya-alma>
- [32] <https://cdn.vgm.gov.tr/yayin/dergi/restorasyon/restorasyon03.pdf>
- [33] Ammar M.A, (2014). Bond durability of basalt fibre-reinforced polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions Ph.D thesis Dept. of Civil Engineering, Université Laval; p. 125.
- [34] Palmieri A., Matthys S., Taerwe L, (2012). Experimental investigation on fire endurance of insulated concrete beams strengthened with near surface mounted FRP bar reinforcement, *Composite Part B Engineering*, 43(3), 885-95.
- [35] Nakayama Y.H.N, Kanakubo T, (2008). Bond behavior between deformed aramid fiber-reinforced plastic reinforcement and concrete. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- [36] Sarasini F., Tirillò J., Ferrante L., Valente M., Valente T., Lampani L, (2014). Dropweight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites, *Composite Part B Engineering*, 59, 204-20.
- [37] Banibayat P., Patnaik A, (2013). Creep rupture performance of basalt fiber-reinforced polymer bars, *Journal of Aerospace Engineering*, 28(3), 04014074
- [38] Lubin G, (1975). *Handbook of fiberglass and advanced plastics composites*. RE Krieger Publishing Company.
- [39] Dindar B, (2020). Metal-Cam fiber/Epoksi/ÇDKNT Sandviç Panellerin Eğilme Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 249-253
- [40] Zhou J., Bi F., Wang Z., Zhang J, (2016). Experimental investigation of size effect on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) confined concrete circular specimens, *Construction and Building Materials*, 127, 643-52.
- [41] TS EN 12390-3, 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [42] TS EN 12390-6, 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- [43] TS EN 772-1+A1, 2015. Kagir birimler-deney yöntemleri-bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [44] TS EN 772-6, 2004. Kagir birimler-deney metodları-bölüm 6: Beton kagir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



