



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

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİMDALI**

TARİHİ YAPI TAŞ KEMERLERİNİN FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Derya KOÇ

TEZ DANIŞMANI

Yrd. Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

AKSARAY, 2015

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ONAY BELGESİ

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 102303419 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, “Derya KOÇ”, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TARİHİ YAPI TAŞ KEMERLERİNİN FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT**
Aksaray Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN**
Selçuk Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME**
Aksaray Üniversitesi

Teslim Tarihi: 1 Temmuz 2015

Savunma Tarihi:29 Temmuz 2015

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, bilimsel etik, ahlâk ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ve bu eserleri her kullanışımında alıntı yaparak yararlandığımı belirtir; bunu şerefimle doğrularım.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Derya KOÇ

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde bana her konuda destek olan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT'a;

Tez çalışmamda bana yol gösteren Doç. Dr. Ali URAL'a, Doç. Dr. Turan KARABÖRK'e ve Doç. Dr. Mehmet Emin KARA'ya, deneysel çalışmalarında yardımcı olan Uzman Yakup BÖLÜKBAŞ'a ve Tekniker Fatih ÇELİK'e, tez çalışmam boyunca bana yardımcı olan İnş. Müh. Mehtap KAYABAŞI'na ve İnş. Müh. Şükran TUĞRULELÇİ'ye, fotoğraflarda katkısı olan Görkem AKTAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca, bana maddi ve manevi her türlü desteği veren aileme ve bütün çalışmalarım boyunca yanımda olan canım kızım İzem Naz'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Derya KOÇ

Aksaray, Haziran 2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOĞRULUK BEYANI.....	i
TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1.GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	5
1.1.1 Tarihi yapıların güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar.....	5
1.1.2 Yığma yapıların davranışının incelendiği çalışmalar	9
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	10
2. TARİHİ YAPILARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRME	13
2.1 Tarihi Yapılar	13
2.2 Onarım ve Güçlendirme	15
2.3 Onarım ve Güçlendirme Metodları	17
2.4 FRP ile güçlendirme	20
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ	23
3.1 Taş Özellikleri	23
3.2 Harç Özellikleri	29
3.3 FRP Özellikleri.....	32
4. KEMER NUMUNE DENEYLERİ.....	34
4.1 Kemer Numunelerinin Hazırlanması.....	34
4.1.1 Yer değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi	37
4.1.2 Şekil değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi	38
4.2 Referans Numune	39
4.3. Model 1.....	42
4.4. Model 2.....	45
4.5. Model 3.....	47
4.6. Model 4.....	50

4.7. Model 5.....	53
4.8. Model 6.....	56
4.9 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	60
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
6. KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

TARİHİ YAPI TAŞ KEMERLERİNİN FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

Tarihi yapıların büyük çoğunluğunda bulunan kemerler zaman içerisinde yapısal hasara uğramış olup onarılması ve güçlendirilmesi gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada, hasara uğrayan taş kemerli sistemlerde kullanılabilecek farklı FRP güçlendirme tekniklerinin kemer davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Referans olarak imal edilen kemer numunesi göçme oluşana kadar yüklenmiştir. Referans numune dışında kalan 6 adet kemer numunesine de ilk olarak referans numune göçme yükünün % 75'i kadar yük uygulanarak hasar verilmiştir. Hasarlı dört kemer numunesine farklı ebatlarda FRP şeritler farklı kemer bölgelerine yapıştırılmış, bir hasarlı kemer numunesinde derzlere FRP ile ankraj uygulaması yapılmış ve diğer bir hasarlı kemer numunesinde ise derzler epoksi esaslı harç ile doldurulmuştur. Değişik tipte güçlendirme ve onarım tekniği uygulanan bu 6 adet taş kemer güçlendirme modelleri, düşey tekil yük altında test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda güçlendirilmemiş referans numunesine karşılık güçlendirilmiş kemer numunesi kapasitesinin en az %24,83 arttığı ve aynı zamanda kemer derzlerinin yalnızca epoksi reçinesi ile güçlendirilmesinin taş kemer kapasitesini önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir. Kemer derzlerine yapılan ankraj uygulamasının ise kemer taşıma kapasitesini çok fazla arttırmadığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yığma Kemerler, Tarihi Yapılar, Hasar, FRP

ABSTRACT

STRENGTHENING STONE ARCHES IN HISTORICAL BUILDINGS WITH FRP

The most of the historical arches are damaged in time and require repair and strengthening. The purpose of this study is to analyze the effects of FRP strengthening techniques for damaged masonry arch systems. Seven single span stone arches are constructed in the laboratory. One of the arches named as reference is loaded until the occurrence of collapse to identify load carrying capacity (ultimate load). The other six arches were loaded to 75% of reference specimen's failure load in order to achieve damage to some degree. Then, four damaged arch specimens are strengthened by using only FRP strips and one specimen by FRP strips with the anchorage system and last specimen by epoxy resin by filling the joints between stone units. After applying various strengthening techniques, six stone arches were tested under a vertical point load. As a result of the study, at least 24,83% increase in the capacity of the strengthened arch specimen was identified compared with the non-strengthened reference specimen. It was also identified that only joint strengthening with epoxy resin increases the masonry arch capacity to a significant extent. In addition, no significant increase in the capacity of the arch was observed for specimens having anchorage system on the arch joints.

Keywords: Masonry arches, Historical structures, Damage, FRP

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kemerin kısımları.....	1
Şekil 1.2: Elikesik Han' da FRP uygulamaları.....	2
Şekil 1.2 (devam): Elikesik Han' da FRP uygulamaları.....	3
Şekil 1.3: Kosova Prizren Emin Paşa Camii' nde FRP uygulamaları.....	4
Şekil 1.3 (devam): Kosova Prizren Emin Paşa Camii' nde FRP uygulamaları.....	5
Şekil 1.4: Kemerde oluşan yükün aktarımı.....	11
Şekil 2.1: Aksaray Ulu Camii sütunları.....	13
Şekil 2.2: Aksaray Ulu Camii duvarları.. ..	14
Şekil 2.3: Aksaray Ulu Camii kemerleri.....	15
Şekil 2.4: Elikesik Han' da enjeksiyon uygulaması	19
Şekil 2.5: Elikesik Han' da ankraj uygulaması.....	20
Şekil 2.6: Kosova Prizren Emin Paşa Camii'nde FRP çubuk uygulaması.....	21
Şekil 3.1: Taşın basınç dayanım testleri (YB1-YB6 numuneleri).....	25
Şekil 3.2: Taşın eğilmede çekme dayanımı testleri (YEÇA1-YEÇA6 numuneleri). ..	27
Şekil 2.3: Taşın eğilmede çekme dayanımı testleri (YEÇB1-YEÇB6 numuneleri). ..	28
Şekil 3.4: Harcın eğilmede çekme dayanımı testi.	30
Şekil 3.5: Harcın basınç dayanımı testleri.	31
Şekil. 4.1: Kemer modellerinin genel geometrisi.	34
Şekil. 4.2: Hasarlı modellerde çatlaklar.....	35
Şekil. 4.2 (devam): Hasarlı modellerde çatlaklar.....	36
Şekil 4.3: Değişik tipteki epoksi ve FRP güçlendirme uygulamaları.....	37
Şekil 4.4: Deney numunelerine LVDT'lerin yerleştirilmesi.	38
Şekil 4.5: Deney numunelerine strain-gaugelerin yerleştirilmesi.....	38
Şekil 4.6: Deney düzeneği.	39
Şekil 4.7: Referans numunenin göçme sonucundaki hali.	40
Şekil 4.7:Referans numuneye ait yük- yer değiştirme grafikleri.....	40
Şekil 4.8 (devam):Referans numuneye ait yük- yer değiştirme grafikleri.....	41
Şekil 4.9: Model 1'in sağ ve sol kolon boyunca ve kemer iç yüzeyine FRP uygulanmış hali.	42
Şekil 4.10: Model 1'de FRP'nin ayrılması ve yükleme sonrası hali.	43
Şekil 4.11: Model 1'e ait yük- yer değiştirme grafikleri	44
Şekil 4.12: Model 2' nin deney öncesindeki hali.	45

Şekil 4.13: Model 2 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.	46
Şekil 4.14: Model 2'ye ait yük- yer değiştirme grafiği.	46
Şekil 4.14 (devam): Model 2'ye ait yük- yer değiştirme grafiği.	47
Şekil 4.15: Model 3 üzerinde uygulanan FRP şeritler.	48
Şekil 4.16: Model 3 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.	48
Şekil 4.16 (devam): Model 3 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.	48
Şekil 4.17: Model 3'e ait yük- yer değiştirme grafiği.	49
Şekil 4.17 (devam): Model 3'e ait yük- yer değiştirme grafiği.	50
Şekil 4.18: Model 4'ün deney öncesindeki hali.....	51
Şekil 4.19: Model 4 yükleme sonrası hali.	52
Şekil 4.20: Model 4'e ait yük- yer değiştirme grafikleri.	53
Şekil 4.21: Model 5'in deney öncesi hali.	54
Şekil 4.22: Model 5' in yükleme sonrası hali.	54
Şekil 4.23: Model 5'e ait yük- yer değiştirme grafikleri.	55
Şekil 4.23 (devam): Model 5'e ait yük- yer değiştirme grafikleri.	56
Şekil 4.24: Model 6 yükleme öncesi hali.....	57
Şekil 4.25: Model 6 yükleme sonrası hali.	58
Şekil 4.26: Model 6'ya ait yük- yer değiştirme grafikleri.	59
Şekil 4.27: Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri.	60
Şekil 4.27 (devam): Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri.	61
Şekil 4.28: Düşey yük – şekil değiştirme grafikleri.	62
Şekil 4.23 (devam): Düşey yük – şekil değiştirme grafikleri.	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Tüf taşının fiziksel deney sonuçları.....	23
Çizelge 3.2: Taşın jeokimyasal analiz sonuçları – eser elementler.	24
Çizelge 3.3: Taşın jeokimyasal analiz sonuçları – temel elementler.....	24
Çizelge 3.4: Deneyde kullanılan taşlara ait basınç dayanımı sonuçları.....	26
Çizelge 3.5: Taşın eğilmede çekme deneyleri sonuçları.	29
Çizelge 3.6: Kullanılan harcın basınç ve eğilmede çekme deney sonuçları.....	30
Çizelge 3.7: CFRP malzeme özellikleri.....	33
Çizelge 3.8: Epoksi reçinesi özellikleri	33
Çizelge 4.1: Concrestone 1406'nın karışım oranları	50
Çizelge 4.2: Concrestone 1406'nın teknik özellikleri	51
Çizelge 4.3: Deney sonuçları.....	60

SİMGELER DİZİNİ

b	Numune genişliği
d	Numune yüksekliği
E	Elastisite modülü
$f_{cst'm}$	Yarmada çekme deneyi sonucu harcın çekme dayanımı
L	Taşın mesnet silindirleri arasındaki mesafe
P	Maksimum yükleme
R_{tf}	Eğilmede çekme dayanımı
ϵ	Şekil değiştirme
σ	Eğilme dayanımı

KISALTMALAR DİZİNİ

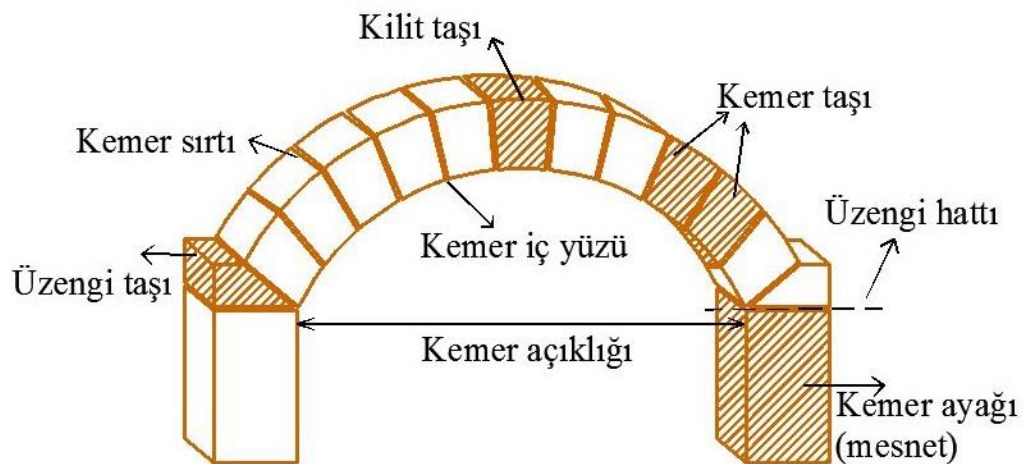
FRP	Lif Takviyeli Polimer
CFRP	Karbon Lif Takviyeli Polimer
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
mV	Milivolt
Strain-gauge	Şekil Değiştirme Ölçer
YB	Taşın Basınç Dayanımı
YEÇ	Taşın Eğilmede Çekme Dayanımı
HEÇ	Harcın Eğilmede Çekme Dayanımı
HB	Harcın Basınç Dayanımı
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik

1. GİRİŞ

Kültürel mirasımızı oluşturan tarihi yapılarımızın birçoğunda kemerli sistemler kullanılmıştır. Geçmişten günümüze ulaşmış birçok eserde uygulamasına rastlanılan kemerler sayesinde büyük açıklıkların geçilmesi sağlanmıştır. Bu kemerler daha çok köprülerde ve suyollarında kullanılsa da cami, han, hamam, kilise türü yapıların da taşıyıcı sistemini oluşturan önemli bir yapı elemanıdır.

Mezopotamya’da Sümerlere ait olduğu bilinen ve M.Ö. 3000’ li yıllarda yapılan yer altı mezarlarında kemerli sistemlere rastlanılmaktadır. Aynı zamanlara denk gelen ve Mısırlılara ait olan örneklerde de kemerli yapıların kullanıldığı görülmektedir. Kemerli yapıları kullanan ilk uygarlıklar Mısırlılar ve Sümerler olmasına karşın en görkemli şekilde uygulayanlar Romalılardır.

Anadolu’da kemerli yapıların birçoğunu oluşturan taş kemer köprülerden olan Karamağara Köprüsü, Cender Suyu Köprüsü ile Justinianus Köprüsü Roma döneminden kalan örneklerdendir (Toker ve Ünay, 2004). Şekil 1.1’de tarihi yapılarda bulunan taş kemeri oluşturan kısımlar görülmektedir.



Şekil 1.1: Kemerin kısımları.

Doğal afetler, savaşlar, yapıların inşasında kullanılan malzemelerin dayanım kaybına uğraması, insan kaynaklı hatalar gibi birçok nedenlerden dolayı tarihi yapılar kullanılamaz duruma gelmekte ya da yıkılmaktadır. Tarihi yapıların güçlendirilmesi hususu kültürel mirasımızın sonraki nesillere aktarılması bakımından üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. Bu yapıların güçlendirilmesi bilinçli bir şekilde yapılmalı, yapının üzerinde barındırdığı tarihi özellikleri bozmayacak nitelikte olmalıdır.

Güçlendirme seçeneklerinden biri olarak karşımıza çıkan çelik malzeme tarihi yapılarda kullanılabilmeyle birlikte yapının orijinalliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Günümüzde çelik dışında onarım ve güçlendirme çalışmaları için yeni nesil malzemelerden de faydalanılmaktadır. Tarihi yapıların güçlendirilmesinde bu yeni malzemelerden en çok tercih edilen FRP (Lif Takviyeli Polimer)' dir ve FRP yapının orijinalliğini kısmi olarak bozmaktadır. Kullanılan bu tür malzemelerin, onarım ve güçlendirmenin uygulandığı yapı elemanında istenilen performansı sağlamasının yanında mümkün olduğunca yapının orijinal yapısına uygun olması beklenmektedir. Ancak tarihi yapılarda FRP den sonra yapılan sıva üzerine kalem işi, hat sanatı ve çini gibi süsleme sanatları uygulanarak görsel bütünlük tamamlanabilmektedir. Bununla birlikte, tarihi yapıların güçlendirilmesinde bazen maddi ya da mevzuat açısından bir takım sorunlarla karşılaşmaktadır. Bu da tarihi yapıların güçlendirilmesi ile ilgili yapılacak çalışmaların daha ileri bir tarihe ertelenmesine sebep olabilmektedir. Böyle durumlarda FRP tekniği geçici çözüm olarak kullanılıp, restorasyon çalışmalarında daha sonra kaldırılabilir şekilde onarım ve güçlendirme yapılabilir.

Onarım ve güçlendirmede kullanılan FRP yapıya ilave yük getirmemekte ve nispeten diğer malzemelere oranla yapı elemanlarının birlikte çalışmasını sağlamaktadır. Bu malzemenin kullanımı oldukça kolay ve etkilidir. Farklı fiziksel durumlar için farklı kompozit malzeme kullanma imkânı sunar. Ayrıca FRP paslanmaz ve manyetik alan oluşturmaz. En önemli özelliklerinden biri de diğer klasik yöntemlere göre yapıya olan minimum etkisiyle çok daha fazla dayanım sağlamasıdır. Bu avantajlara sahip olan FRP'nin günümüzde farklı uygulama şekillerini görmek mümkündür. Şekil 1.2 'de Konya- Doğanhisar yolu üzerindeki tescilli yapı Elikesik Han ve taşıyıcı sisteminde FRP uygulamaları görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1.2: Elikesik Han' da FRP uygulamaları.



(c)

Şekil 1.2 (devam): Elikesik Han' da FRP uygulamaları.

Kosova Prizren Şehri' nde 1832 yılında yapılan Emin Paşa Camii kare planlı 9,15 x 9,15 m ölçülerindedir. Avlulu ve üç bölümlü son cemaat yerinden oluşan camii kubbeli bir yapıya sahiptir. Yeni yapılan restorasyon ve güçlendirme çalışması kapsamında caminin kubbesinde FRP plakalar uygulanmıştır. Şekil 1.3. 'de Emin Paşa Camii ve güçlendirme çalışmasına ait fotoğraflar yer almaktadır.



(a)

Şekil 1.3: Kosova Prizren Emin Paşa Camii' nde FRP uygulamaları.



(b)



(c)

Şekil 1.3 (devam): Kosova Prizren Emin Paşa Camii’ nde FRP uygulamaları.

1.1 Literatür Özeti

Kemerler, su yapılarında kullanıldığı gibi han, hamam, kilise gibi birçok tarihi binada da tercih edilmektedir. Bu çalışmada tarihi kemerli yapılarda uygulanan uygun onarım ve güçlendirme teknikleri incelenmiştir. Farklı malzemelerle farklı tasarımlarda inşa edilen kemerli yapıların taşıyıcı sistemlerinin onarım ve güçlendirmesini konu alan birçok çalışma mevcuttur. Tarihi yapıların zaman içinde kaybettikleri mekanik özelliklerinin geri kazandırılması için uygun onarım/güçlendirme yöntemlerini yapı üzerinde uygulamak gerekmektedir. Tarihi yapılarda taşıyıcı elemanlarının güçlendirilmesinde FRP son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.1.1 Tarihi yapıların güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar

Benedetti vd., (1998), 1/2 ölçekle imal edilmiş 24 adet yığma yapı elemanlarının modeli üzerinde 119 adet sarsma tablası deneyi uygulamışlardır. Deneyler sonucunda hasara uğrayan modeller üzerinde farklı onarım ve güçlendirme teknikleri uygulanmış ve tekrar sarsma tablası deneyine tabi tutulmuştur ve elde edilen verilere göre farklı güçlendirme tekniklerinin pratikte uygulanabileceğini vurgulamışlardır. Schultz vd., (1998), tekrarlı yükler altında test edilen, mesnet noktaları güçlendirilmiş ve bazı bölgelerine beton enjeksiyon yapılmış yığma kesme duvarının

gösterdiği rijitlik, kesme dayanımı, enerji yayılımı ve deformasyon kapasitesini belirlemeye çalışmışlardır.

Valuzzi vd., (2001), farklı FRP uygulamaları ile güçlendirilen tonozların deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Deney sonucu elde edilen veriler ve göçme mekanizmaları için modelleme yöntemleri önermişlerdir.

Basilio vd., (2004), yarım daire şeklindeki kemerlerin FRP ile güçlendirilmesiyle elde edilen dayanım farkını irdelemek için modeller yapmışlardır. Yığma kemerler için en uygun güçlendirme yöntemi ile ilgili deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Foraboschi (2004), iç ve dış kısımları FRP ile güçlendirilmiş kemer ve tonoz yapı elemanlarının mafsallı mekanizması göçme modu oluşturmayacak şekilde tasarlamış ve davranışını incelemiştir. Çalışmada ezilme, kayma, sıyrılma ve FRP kopması gibi değişik davranış biçimleri için matematiksel modeller sunulmuştur. Oluşturulan matematiksel modeller ile elde edilen göçme modlarının her biri için maksimum yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir.

Bastianini vd., (2005), kagir duvarlar ve tonozları FRP kullanarak güçlendirdikten sonra bir sismik güçlendirme tekniği ile ilgili gerçek ölçekli deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, 1600 yılında İtalya’da yapılmış Palazzo Elmi-Pandolfi isimli tarihi binanın 1997 yılında meydana gelen depremde tahrip olan ve sonradan karbon FRP ile güçlendirilen halinin işlevselliğini dinamik ve statik testler ile değerlendirmişlerdir.

Cavicchi ve Gambarotta, (2005), tam ve model ölçekli kemerler üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlar ve kemer üzerindeki parapet ve dolgu duvarların kemerin taşıma gücü dayanımını ve davranışını önemli ölçüde etkilediğini tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, kemer köprülerin iki boyutlu modellemesini yapmışlar kemer ve kemer dolgusu etkileşimini incelemişlerdir.

Shrive (2006), çalışmasında yapılarıdaki kemer formlarının olası deprem karşısındaki dayanımını arttırmak için FRP’nin nasıl kullanılması gerektiğini incelemiştir.

Altunışık (2011), çalışmasında taş minarelerin FRP ile güçlendirilmeden önceki ve sonraki halinin deney sonucuna göre dinamik tepkilerini karşılaştırmıştır. XVI. yüzyılda Trabzon’da yapılan 21 m yüksekliğindeki İskender Paşa Camii’nin tarihi yığma minaresi model olarak seçilmiştir. Deney sonucuna göre FRP ile yapılan

güçlendirmenin minarenin dinamik yanıtları üzerinde önemli oranda etkisinin olduğu görülmüştür.

Baratta ve Corbi, (2007), çalışmalarında yığma kemerlerin FRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş hali arasındaki farkı test edip statik davranışlarını karşılaştırmışlardır.

Çöğürçü (2007), çalışmasında düzlem dışı yük altında deneye tabi tutulan yığma duvarlarda oluşan çatlamları önleyeceği düşünülen epoksi reçineli FRP ile yatay derz takviyesi uygulaması yapmış, sonuçları sayısal ve deneysel olarak karşılaştırmıştır.

Lorenzis vd., (2007), çalışmalarında FRP ile güçlendirilen tuğla tonozları yanal itme ile üniform yüklemeye maruz bırakarak deneysel bir araştırma yapmışlardır. Deney sonucunda elde edilen veriler ve teorik kabuller karşılaştırılmıştır.

Döndüren (2008), çalışmasında bağlayıcılığı sikalatex adlı katkı malzemesiyle arttırılmış harçla örülmüş yığma duvarın eğik düzlemde kırılmasını araştırmış ve normal bir harçla örülmüş bir yığma duvarla sonuçlarını karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda %25 oranında referans numuneye göre model numunenin daha fazla dayanım gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte yine model numunede oluşan sünekliliğin referans numunedeki sünekliliğe oranla %41 arttığı hesaplanmıştır.

Elmalich ve Rabinovitch , (2009), çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kompozit malzemelerle güçlendirilmiş kemerlerin analizini yapmışlardır.

Felice (2009), çalışmasında çok açıklıklı taş kemer köprülerin yük taşıma kapasitesini etkileyen sebepleri incelemiş, lifli elemanlar ile yapılan güçlendirme ile de yük kapasitesindeki değişimlerini ortaya koymuştur.

Milani vd., (2010), çalışmalarında yapı elemanlarından kemer, tonoz ve kubbenin FRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirme yapılmamış modellemeleri üzerinde 3 boyutlu limit analiz yapmış ve sonuçlarını değerlendirmişlerdir.

Oliveira vd., (2010), çalışmalarında tuğla kemerleri GFRP (glass fiber reinforced polymer) ile güçlendirmiş ve deneysel davranışlarını incelemişlerdir. On iki adet $\frac{1}{2}$ oranında küçültülen numuneler kemer genişliğinin $\frac{1}{4}$ 'ü oranında yüklenmiştir. Çalışmada deney sonucunda elde edilen verilere dayanarak ilgili standart ve yönetmeliklerin geliştirilmesinin, ileri sayısal modellerin ve analitik çözümlerin doğrulanması için önemli faydalar sağlayacağını ifade etmektedirler.

Milani ve Bucchi, (2010), çalışmalarında kemer, kubbe gibi eğrisel tuğla yapı elemanlarını FRP şeritler ile güçlendirmişler, göçme mekanizması ve göçme yükünü belirlemek için kinematik sonlu elemanlar modeli sunmuşlardır. Deney sonuçlarına göre sunulan sonlu elemanlar modelinin göçme yükü ve göçme mekanizmasını güvenli sınırlar içerisinde tuttuğu ve uygulamada kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Borri vd., (2011), çalışmalarında karbon plaka kullanarak kemerleri güçlendirme yöntemini seçmişler ve uygulamadaki etkinliğini araştırmışlardır. On beş adet prototip tuğla kemeri çeşitli şekillerdeki kompozit malzemeler ile güçlendirerek düşey yük altında deneye tabi tutmuşlardır.

Garmendia vd., (2011), çalışmalarında onarımda kullanılan malzemelere alternatif olarak BTRM (Bazalt tekstil takviyeli harç) ile taş kemerleri onarmışlar ve deneysel çalışmasını yapmışlardır.

Tao vd., (2011), çalışmalarında lif takviyeli polimer (FRP) ile güçlendirilen iki açıklıklı dairesel yığma kemer köprünün davranışını incelemişlerdir. Deney sonucuna göre de FRP'nin taş kemer köprünün yapısal performansını artırmak için etkili bir güçlendirme tekniği olduğunu ifade etmişlerdir.

Caporale vd., (2012), çalışmalarında FRP ile güçlendirilen farklı özellikteki kemerlerin göçme yükünü belirlemişlerdir. Analizlerde lineer ve nonlineer olmak üzere iki farklı yöntem kullanmış ve sayısal örneklerle kullanılan yöntemlerin avantajlarını araştırmışlardır. Ayrıca FRP ile güçlendirilmiş farklı özellikteki kemerlerin işlevselliğini de incelemişlerdir.

Dagher vd., (2012), çalışmalarında FRP ile güçlendirilmiş kemer formundaki beton yapı elemanının üç giriş ve dört kemer üzerinde yapılan deneylerle eğilme davranışını incelemişlerdir. Analitik bir model ile deney sonuçlarını karşılaştırmış, eğilme yükü-deformasyon ilişkisi ve moment eğrilik ilişkisi incelenmiş ve FRP'nin uygulamada kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

1.1.2 Yığma yapıların davranışının incelendiği çalışmalar

Hradil vd., (2001), çalışmalarında 1737 de Çek Cumhuriyeti'nde inşa edilmiş tarihi bir yığma köprüyü modellemişlerdir. Bu modelde ANSYS bilgisayar programı yardımıyla yapının hem deterministik hem de stokastik analizlerini incelemişlerdir. Stokastik analizde farklı davranışlar göstermesi beklenen iki nokta incelenmiştir. Bu

iki nokta arasındaki sıcaklık farkları (yaklaşık 60°C) dikkate alınarak sonuç elde edilmiştir. Bu çalışmadan çıkardıkları en önemli sonuç, betonarme döşeme örtüsü ile yığma yapı arasında özellikle sıcaklık farklılıklarında farklı davranışların olmasıdır.

Kanıt ve Işık, (2007), çalışmalarında tuğla kemerler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları ile analiz sonuçlarındaki sayısal değerleri karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada kemerlerin eşdeğer sürekli ortam parametreleri, deneylerden elde edilen şekil değiştirmeler ile sonlu elemanlar yöntemi sonuçları birleştirilerek hesaplamışlardır. Sonlu elemanlar yöntemine göre ayırık elemanlar yönteminin daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bayraktar vd., (2007), çalışmalarında Trabzon'un Akçaabat ilçesindeki Şinik Köprüsü'nü modellemişlerdir. Köprünün deneysel ölçümleri, analiz sonucu ve dinamik karakteristiklerine göre sonlu eleman modeli iyileştirilmiş, deprem davranışının tarihi köprünün üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney sonucunda elde edilen dinamik karakteristiğin teorik karakteristikten daha büyük olduğu ve bu farklılığın sonlu elemanlar model iyileştirilmesi ile giderileceğini vurgulamışlardır.

Diamanti vd., (2008), tahribatsız deney tekniği olan yeraltı radarı uygulaması (GPR) tekniği ile tuğla kemer köprüleri incelemişlerdir. Yer altı radarı uygulaması yapılan sayısal modeller değerlendirilerek laboratuvar çalışmaları ile kalibre edilmiştir.

Ocak (2009), çalışmasında Batı Anadolu'da sık rastlanan kemer ve su yollarının yapılışını ele almış, daha çok şehirlere su getirmek amacıyla yapılan kemerlerin sanatsal önemi üzerinde durmuştur.

Birinci (2010), çalışmasında taş kemer köprülerdeki sorunları gidermek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar modellerinde veri eksikliklerinden kaynaklı oluşan bazı kabullerin deneysel yöntemlerle doğruluğunu araştırmıştır. Yapının gerçek davranışına en uygun sonlu eleman modeli belirlenmiştir.

Orhan (2010), çalışmasında kemer köprülerin yük taşıma kapasitesini hesaplamak için kullanılan yöntemleri incelemiştir. Limit analiz yöntemine göre algoritma geliştirerek kemerin göçme yükünün hesaplanmış ve bu yöntemle elde ettiği sonuç literatürdeki sonuçlara yakın çıkmıştır.

Ural ve Fırat, (2014), Aksaray'da meydana gelen şiddetli rüzgâr sonucu yıkılan iki yığma minarenin göçme mekanizması hakkında detaylı bilgi vermişler ve sonlu elemanlar analizi ile çöken minareyi modellemişlerdir. Minareleri etkileyen rüzgâr

yükü ile ilgili istatistiksel yöntemleri incelemişlerdir. Aksaray ili için Türk Devlet Meteoroloji İşleri'nden rüzgâr hızı verileri alınmış bu verilere ek olarak uluslararası literatürde yayınlanan verilere göre diğer rüzgâr yükü parametrelerini de değerlendirmişlerdir. Ölü yük ve rüzgâr yüküne göre minarenin analizini yapmışlar, bu analizlere dayanarak inşaat aşamasında yapılan hatalar hakkında bilgi vermişlerdir.

Tuğrulelçi (2014), çalışmasında düşey yük uygulanan kemer numunelerinde kullanılan gergilerin, kemer davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Deneye tabi tutulan 1'i gergisiz, 5 tanesi farklı şekillerde gergiye sahip toplam 6 adet tuğla kemer numunelerinin sayısal olarak da hesaplaması yapılmıştır. Deney sonuçları sayısal sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tarihi binaların inşasında yığma yapı malzemeleri kullanılmıştır. Duvarların taşıyıcı sistem olarak kullanıldığı yığma yapılar tuğla, taş, briket ve kerpiç gibi yığma malzemeler ile harçtan meydana gelen yapı sistemleridir. Yığma yapılarda taşıyıcı sistemi oluşturan duvarlarda kullanılan taş veya tuğla gibi malzemelerin arasında bağlayıcı olarak bulunan harç, sistemin en zayıf kısmını oluşturur. Tarihi yapılarda deprem ve benzeri dış etkiler altında yığma malzemeler ile harcın arasındaki kenetlenme oranının düşük olmasından dolayı ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir.

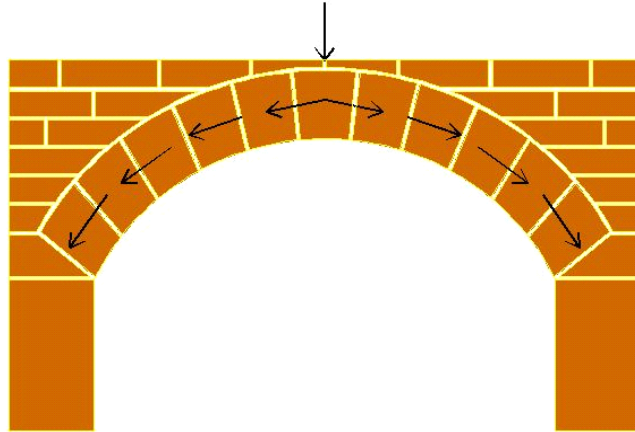
Günümüzde DBYBHY (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) (2007) gereği yığma binalarda yatay ve düşey hatıllar yapılması gerekmektedir. Ancak tarihi yapıların onarım ve güçlendirmesinde hatıl türü bir müdahalenin yapılması genellikle söz konusu olamaz. Bunun nedeni tarihi yapılarda restorasyon çalışmalarında temel kuralın aslının korunması ya da aslına uygun olan güçlendirmenin yapılmasıdır.

Ülkemizde çelik, betonarme ve ahşap türü yapıların yanı sıra kırsal kesimlerin büyük çoğunluğunda yığma yapılar tercih edilmektedir. Yığma yapıların inşası sırasında genelde uzmanlığa ihtiyaç duyulmaması, taş, tuğla, briket gibi ekonomik yapı malzemelerinin kullanılması gibi sebeplerden dolayı özellikle kırsal alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Oldukça sık kullanılmasına karşın bu yapıların birçoğu

herhangi bir mühendislik bilgisi olmadan, gerekli yönetmeliklerdeki kriterler göz önüne alınmadan inşa edilmektedir. Yığma yapılar denildiğinde sadece yeni yapılan yapıları değil geçmişten günümüze inşa edilen bütün yapıları düşünmek gerekir. Çok büyük çoğunluğu yığma olan tarihi yapıların geleceğe sağlam bir şekilde aktarılması için iyi korunması ve yapısal davranışının iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Zemin koşullarının yetersiz oluşu, savaşlar, yapı malzemelerinin zaman içerisinde bozulmasına sonucu dayanımını kaybetmesi, projelendirme ve uygulamadaki hatalar, şiddetli deprem ve rüzgâr yükleri ve dinamik yüklere dayanıklı yapı inşası esaslarına uyulmaması gibi sebepler tarihi yapılarda hasara neden olmaktadır. Özellikle deprem yükleri yapının ağır hasarına ve göçmesine neden olabilir. Bu sebepten dolayı taşıyıcı sistem dayanımı düşük olan ve önceki depremlerde hasar görmüş yapıların olabilecek büyük bir depremlerden önce güçlendirilmesi gerekmektedir.

Kemer sistemine sahip yapılar geometrisinden dolayı büyük oranda basınca çalışır. Kemerli yapılar çoğunlukla düşey yüke maruz kalsa da, bazen yatay yük etkisinde de bulunabilirler. Bu durumda oluşabilecek çekme kuvvetine karşılık yapıyı oluşturan taş veya tuğla gibi elemanlarda çatlamlar meydana gelebilmektedir. Kemerde yükün uygulanmasından sonra oluşabilecek en önemli sorun kemer açıklığı doğrultusunda mesnetlerde meydana gelen kuvvettir. Kemer üzerine etkiyen yükün kemer taşları üzerinden geçerek üzengi taşından kemer ayağına kadar iletiildiği Şekil 1.4'te görülmektedir.



Şekil 1.4: Kemerde oluşan yükün aktarımı.

Bu çalışmanın amacı, zamanla hasar gören tarihi yapılardaki kemerlerin farklı FRP uygulamaları ile güçlendirilmesi sonucunda düşey yük altında en iyi sistem

dayanımının elde edilmesinin araştırılmasıdır. Düşey yük altında basınca maruz kalan kemer numunelerine yeni nesil güçlendirme malzemesi olan FRP ve epoksi harcı uygulanmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerde 1'i referans, 6'sı hasar görmüş toplamda 7 adet kemer numunesi düşey tekil yük altında incelenmiştir. Hasara uğramış deney numunelerine farklı şekillerde uygulanan güçlendirme tekniklerinin etkisi araştırılmıştır. Deney sonucunda elde edilen verilere göre düşey yük altında test edilen hasara uğramış kemer numuneleri üzerinde yapılan güçlendirme çalışmalarının dayanımı büyük oranda arttırdığı görülmüştür. Yapılan bu çalışma, FRP'nin onarım ve güçlendirme çalışmalarında nasıl uygulanması gerektiği konusunda örnek teşkil edecektir.

2. TARİHİ YAPILARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRME

2.1 Tarihi Yapılar

Tarihi yapılar tuğla, taş, briket ve kerpiç gibi yığma malzemeler ile harçtan meydana gelen sistemlerdir. Tarihi yapılarda bulunan sütunlar tek ya da çok parçalı mermer, granit ya da herhangi bir taştan meydana gelebilir. Şekil 2.1’ de Aksaray Ulu Camii’ ndeki sütunlar görülmektedir.



Şekil 2.1: Aksaray Ulu Camii sütunları.

Tarihi yapılardaki duvarlar kesme taş, kaba yontu taş, moloz taş ya da tuğladan oluşan ve gelen yükleri temele aktaran elemanlardır. Tarihi yığma yapılarda duvar kalınlıkları ve düzlem dışı yükler duvarlar tarafından karşılandığından, mümkün olduğunca büyük tercih edilmiştir. Duvarların yükleri karşılayabilmesi için, yekpare şekilde çalışması gerekir. Yapının tümünde duvarlarda oluşan gerilmeler birbirlerine eşit ya da yakın değerde tutulmalı ve düzgün yayılı olmalıdır. Tarihi yapılarda bütünlüğün sağlanması için taş ve tuğlalar birbirlerine harç, kenet ve değişik şekillerde ahşap ya da demir hatıllarla bağlanırlar. Çatıdan gelen eğik yüklerin

karşılanabilmesi amacıyla bazı durumlarda duvarların payandalarla desteklendiği görülmüştür.

Taşıyıcı duvarlar, yüklerin temele aktarılmasını sağlar. Kayma ve basınç gerilmeleri etkisindeki duvarlar düşey düzlemsel yapı kısımlarıdır. Taşıyıcı duvarların düşey eksenlerinin aynı olması gerekmektedir. Duvarların kalınlığının değiştiği yerlerde eksenlerin aynı düşey düzlem içinde olması, mümkün değilse dış duvarlarda duvarın dış yüzeylerinin, taşıyıcı iç duvarlarda duvarların herhangi bir yüzünün aynı düşey düzlem içine alınması gerekir (Mazılıgüney, 2006). Aksaray Ulu Camii' nde bulunan duvarlar Şekil 2.2' de görülmektedir.



Şekil 2.2: Aksaray Ulu Camii duvarları.

Şekil 2.3' de Aksaray Ulu Camii' ndeki kemerler görülmektedir. Tarihi yapıları oluşturan elemanlardan biri olan tonozlar ise bir kemerin kendi düzlemine dik doğrultuda ötelenmesi şeklinde meydana gelen yüzeysel yapı elemanlarıdır. Dikdörtgen alanların kapalı hale gelmesi için kullanılmıştır.



Şekil 2.3: Aksaray Ulu Camii kemerleri.

Bir kemerin kendi eksenini etrafında dönmesiyle kubbeler oluşur. Genellikle tuğla, taş veya ahşap örnekleri mevcuttur. Kemerler mesnetlerinde taşıyıcı bir yüzey elemanına ihtiyaç duyar. Bu sebepten kubbenin, dairesel olan mesnet üzerinde bulunması gerekir. Kubbeden yüklerin doğrudan duvarlara iletilmesi dairesel planlı yapılarda mümkündür ancak kare planlı mekânlarda sürekliliğin olması için geçiş elemanları olarak tromp ve pandantif gereklidir.

2.2 Onarım ve Güçlendirme

Tarihi yapılarda genelde malzemenin zamanla bozulması, kullanım amacıyla zaman içerisinde meydana gelen değişiklikler nedeni ile oluşan hasarlar ya da revizyonlar ve büyük depremler sonrasında meydana gelen hasarlar tarihi yapıların ortak sorunudur (Peker, 2003). Bununla birlikte tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesi zorlu bir süreç gerektirir. Bu çalışmalar sırasında teknik, ekonomik ve hukuki sorunlar ile karşılaşılabilir. Bunlar; teknik problemler, tecrübeli teknik eleman yetersizliği ve kalitesiz malzeme kullanımı şeklinde olabilir. Yapılan güçlendirme yöntemi ve miktarı, maliyeti doğrudan etkilemektedir. Gereğinden fazla yapılan güçlendirme de ekonomik olarak fayda sağlamayacaktır. Tarihi binanın konumu, kullanım amacı ve yapıdaki hak sahipleri ile yürürlükteki mevzuatlar güçlendirmede hukuki durumlar açısından sınırlayıcı olabilecektir.

Ülkemiz tarihi eser bakımından oldukça zengindir. Geçmişten günümüze gelen tarihin yaşatılması için, tarihi yapıların korunması gerekmektedir. Onarım ve güçlendirme yaparken temel amaç tarihi dokuların orijinal şekliyle korunarak geleceğe ulaştırılmasıdır. Bunun için güçlendirme tekniği doğru seçilmelidir.

Tarihi yapılarda yapılacak olan uygulamaların 1964 yılında tarihi yapılarla ilgili olarak yapılan toplantıda alınan kararların bulunduğu Venedik Tüzüğü'ne uygun olması gerekir. Restorasyon ile ilgili işlerde detaylı araştırma yapmak, yapının eksik kalmış bölümlerini, özgünlüğü bozulmayacak şekilde eklemek ve mevcut yapıya eklentiler yapmamak tüzüğün ana hatlarını oluşturur (Sesigür vd., 2005). Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde ana düşünce müdahalenin en az seviyede yapılması olacaktır. Tarihi yapı üzerinde yapılan tüm işlemlerden sonra özgünlüğünü kaybetmemelidir. Restorasyon işlemi gerektiğinde yeniden eski haline getirilebilecek şekilde uygulanmalı, yapıya özgün yapım teknikleri ve malzemeler tercih edilmelidir.

Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda, tarihi yapıların güçlendirilmesinde mühendislik esaslarına göre sorunun tespiti, analizi, teşhisi ve tedavisinin dışında kompleks bir süreçten bahsetmek mümkündür. Güçlendirme yapılırken tarihi yapının kütle ya da mekân algısına belirli ölçülerde müdahalenin sorumluluğunu da üzerine alan bir karar verilmelidir. Yapının durumuna göre bu müdahalelerden birinin diğerine tercih edilmesi durumu söz konusu olabilir. Mimar Sinan 1573'de Ayasofya' da güçlendirme yaparken böyle bir durum yaşanmıştır. Daha önce üç kez yıkılan kubbesinin güçlendirilmesi için Ayasofya'nın zayıf olan uzun kenarlardan desteklenmesi gerektiğini düşünen Mimar Sinan, özgün iç mekânı korumak için yapının kütleini değiştirmiştir. İç mekânın bugüne kadar gelmesini sağlayan dış destekleri yapmıştır. Bu destekler ağırlıklarıyla kubbenin açılmasını önlemiştir. Mimar Sinan, Ayasofya için kullandığı tekniği diğer projeleri için uygulamamıştır. Yapımı aynı döneme rastgelen Bayezid Camii onarımı aşamasında farklı bir metot kullanmış ve iç mekâna büyük bir kemer ekleyerek taşıyıcı sistemi güçlendirmiştir (Örmecioğlu, 2010). Mimar Sinan'ın her sorun ve yapıya özgü çözümler üretme yönündeki çalışmaları bugün bile dikkate değerdir.

Tarihi yapıların ayakta kalmasında deprem, zemin problemleri, çevre şartları ve insanların oluşturduğu hasarlar gibi faktörler etkilidir. Taşıyıcı sistemdeki düzensizliklerden dolayı yapıda çatlaklar ve bununla beraber kısmen veya tamamen yıkılmalar meydana gelebilir. Tarihi bir yapıyı güçlendirmeden evvel, yapının zemin özellikleri, kullanılan malzemeler, taşıyıcı sistemi, yapının tarihi detaylı olarak araştırılmalıdır. Bu araştırmalar neticesinde yapılacak güçlendirme ve müdahaleye karar verilmelidir (Yaldız vd., 2011).

Tarihi bir yapıda herhangi bir nedenle bozulma ve göçme riski varsa geçici acil müdahale yapılması gerekir. Dikkat edilmesi gereken nokta, geçici müdahalenin devamlı müdahaleye dönüşümünü engellemek için müdahalenin en az seviyede kalmasıdır. Yapının korunması, askıya alınması ve kısmi yıkım geçici acil müdahale yöntemlerinden bazılarıdır. Kısmi yıkım, yapının ayakta durmasını sağlamak için başka hiç bir tekniğin uygulanamadığı durumlarda yapılmalıdır.

2.3 Onarım ve Güçlendirme Metotları

Tarihi yapılarda onarım ve güçlendirmede, genellikle temel güçlendirmesi, bölgesel onarım ve bölgesel güçlendirme ile karşılaşılır. Taşıyıcı elemanlardan olan temeller, yapının üzerine etkiyen yükleri zemine iletirler. Temelde oluşan zemin kaynaklı hasarları: ayrışmalar, oturmalar, kabarma ve şişme, çatlaklar, kaymalar ve parça kopması şeklinde sıralayabiliriz. Tarihi yapılarda zeminden kaynaklanan bir takım hasarların ortaya çıkması durumunda temel güçlendirmesinin yapılması gerekir.

Tarihi yapıların temelinde meydana gelen sorunların giderilebilmesi amacıyla yapılan temel güçlendirmesi, temelin veya temel zemininin iyileştirilmesi olarak ikiye ayrılır. Temel güçlendirmesi yapılırken, zeminde farklı oturmalar ve dolayısıyla yeni oturma çatlaklarının oluşmasına izin verilmemelidir. Yapıdaki temel boyutlarının artırılarak yeterli hale getirilmesi ile taşıyıcı olan temelin güçlendirilmesi sağlanmalı veya yapıdan oluşan yüklerin sağlam zemine çeşitli tekniklerle iletilmesi yöntemleri uygulanmalıdır.

Temel güçlendirmesinde kullanılan yöntemlerden yaygın olanı mevcut binanın taşıyıcı sisteminin altına yapılacak olan kazıklardır. Kazıklar tarihi yapıda meydana gelen yüklerin daha derinlerdeki zemin tabakalarına iletilmesinde ve oluşabilecek temel oturmasının engellenmesinde kullanılmaktadır. Burada kazıklar beton veya

betonarme kesitlerden meydana gelebilmektedir ve belirli aralıklarla taşıyıcı sistemin altına uygulanmaktadır.

Onarım ve güçlendirmede ikinci metot olan bölgesel onarım, yerel bozulmaların ve çatlakların onarımı anlamına gelmektedir. Bu yöntem, yığma duvarlardaki çatlakların onarımı ile tonoz ve kubbelerdeki radyal çatlakların onarımında uygulanır. Yapıda oluşan çatlaklar, yapıda meydana gelen hareketlerin yapı malzemesi üzerinde, beklenen şekil değiştirme sınırını aşması sonucunda oluşan gerilmelerin, malzemenin mukavemet sınırını aşmasıyla meydana gelir. Yapının çekme gerilmesinin maksimum olduğu bölgelerde oluşur Çatlak çeşidi küçük ve geniş olmak üzere ikiye ayrılır. 0,2 mm den küçük çatlakların onarımına gerek yoktur çünkü bunlar küçük çatlaklardır. 0,3 mm den büyük ve 3 mm den küçük çatlakların onarımında epoksi harcı tercih edilebilir. Çatlak eğer 3 mm den büyük ise geniş çatlaktır ve grout enjeksiyonu uygulanabilir. Mevcut çatlaklar 10 mm den büyükse veya duvarı oluşturan taş ya da tuğlalar düşmüşse, bu durumda daha geniş bir yöntem gerekir. Uygulanacak yöntem duvarın bir çeşit güçlendirmesi olarak tarif edilebilir (Mahrebel, 2006). Bu da bölgesel onarımdan çok bölgesel güçlendirme yöntemini gerektirir.

Tarihi eserlerde oluşan çatlaklara bakarken, çatlağın zaman içerisindeki değişimi dikkate alınarak ta çeşitli tespitler yapılabilir. Keskin kenarlı olanlar yeni çatlaklar, yuvarlak kenarlı olanlar ise eski çatlaklardır. Yapıda oluşan çatlaklar tespit edilebiliyorsa çatlak rölövesinin çıkarılması uygun olur. Yığma duvarlardaki dönmeler de yapının taşıyıcı sisteminin hareketi ile ilgili bilgiler içerir. Oturmanın ne yönde olduğu çatlağın doğrultusunun belirlenmesi ile ortaya çıkar.

Çatlak nedeniyle yük taşıma kapasitesi azalmış tarihi yapılarda boşlukların doldurulmasında, çatlakların ve duvarların içine enjeksiyon yöntemi uygulanabilir. Bozulmuş ya da parçalanmış taş vb. kütlelerin sağlamlaştırılması için en doğru yöntem ankraj sistemleri ve kimyasal enjeksiyondur (Kasapgil, 2007). Bu gibi durumlarda çatlağın iki yanına taş veya tuğlalar yerleştirildikten sonra boşluk uygun bir harç enjeksiyonu ile doldurulur. Kalın duvarlardaki çatlakların ve ince çatlakların onarımında en uygun yöntem boşluğa duvardaki özgün malzemeye benzeyen bir harç enjekte edilmesidir (Sesigür vd., 2007). Şekil 2.4 ‘de Konya Elikesik Han’ da hidrolik kireç katkılı enjeksiyon uygulamasına ait fotoğraf yer almaktadır.



Şekil 2.4: Elikesik Han' da enjeksiyon uygulaması.

Tarihi binaların onarım ve güçlendirmesinde diğer bir metot olan bölgesel güçlendirmede, güçlendirilen eleman yapıda bir bileşen olarak yerini alır. Duvarda çekme gerilmelerini karşılayacak elemanların kullanılması yönteminde, çatlak genişliğinin 10 mm'den büyük ya da duvarı oluşturan taş veya tuğlaların düşmüş olduğu durumlarda, çatlakların onarımı için enjeksiyon yöntemiyle beraber çekme gerilmelerini alacak elemanlar kullanılır. Bu amaçla, çatlak kenarındaki taş ya da tuğlalar çıkarılıp, çelik bağlantı elemanları veya dikiş elemanları yerleştirilerek, uygun bir karışımla düşük basınç altında taş ya da tuğla duvarın boşlukları doldurulur. Bu yöntem duvarın diğer yüzünde de yapılmalıdır. Ciddi hasarlı duvarların yüzeyine hasır donatı yerleştirildikten sonra püskürtme beton uygulaması ile elde edilmek istenilen dayanım sağlanabilir. Taşlarda meydana gelmiş çatlaklara bu yöntemin dışında galvanizli tijlerle dikiş atılmaktadır. Bunun için önce çatlaklar basınçlı hava ile temizlenmeli ve yük aktarımını yapacak kimyasal malzeme ile doldurulması sağlanmalıdır. Çatlak taşlar yanındaki taşlara ankraj edilecek şekilde delinip oluşan boşluklara kartuşlar yerleştirilir. Uygulama başlangıcında çatlaklara doldurulan harç çıkarılmalı ve delme işlemi esnasında oluşan taş tozu ve kimyasal bağlayıcı çatlaklara ve derzlere doldurulmalıdır. Bu durumda taşların birbirine bağlanması ile yük aktarımı sağlanmış olur. Şekil 2.5' de Konya Elikesik Han' da yapılan ankraj uygulamasına ait fotoğraflar yer almaktadır.



Şekil 2.5: Elikesik Han’ da ankraj uygulaması.

2.4 FRP ile Güçlendirme

Bölgesel güçlendirmelerden olan lif takviyeli polimerler (FRP şerit ya da çubuklar) genellikle tarihi yapılarda, hasar görmüş taşıyıcı duvarlara kullanılmaktadır. Yığma yapıların duvarları taşıyıcı özellikte olduğundan bu duvarların kesme kapasitesi de FRP sistemlerle arttırılabilir. Duvarlardaki hasarı onarmak için, çatlaklar epoksi esaslı yüksek dayanımlı tamir harçlarıyla doldurulup, kesmeye karşı enine doğrultuda eğilmeye karşı boyuna doğrultuda FRP şerit uygulanabilir.

FRP düşük yoğunluklu bir malzeme olmakla birlikte çevre şartlarına, kimyasal maddelere ve paslanmaya karşı dayanıklıdır ve hızlı uygulanabilir. FRP uygulamalarında yapıların çekme bölgelerine FRP şeritler veya çubuklar sayesinde bu bölgelerde deprem sırasında oluşabilecek yatay kuvvetlere karşı direnç meydana gelmektedir.

Betonarme yapılarda ortaya çıkan problemlerden dolayı korozyona karşı dirençli bir malzeme olan FRP donatıların yapılarda kullanılması alternatif bir çözüm yöntemi olarak karşımıza çıkmıştır. FRP donatılar günümüzde hafif, dayanım, mukavemet ve manyetik geçirgenliğinin olmaması gibi avantajlarından dolayı kullanılmaktadır. FRP’nin detaylı özellikleri 3. Bölümde verilmektedir.

Gevrek bir kırılma davranışına sahip olan FRP donatılı kirişlerin büyük deplasmana sebep olmasından dolayı son yıllarda FRP ve çelik donatının birlikte kullanıldıkları hibrit FRP-Çelik donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu kirişlerin tasarımında en uygun yöntem FRP donatının uygun beton örtü tabakası sağlanacak şekilde çekme yüzüne yakın, çelik donatının da kesit içerisinde daha içte kalacak şekilde olmasıdır. Bu şekilde yapılan bir uygulamada çelik, dayanıma daha az katkıda bulunmasına karşın elemanın rijitliği ve sünekliğine katkı sağlayacaktır (Aiello ve Ombres 2002).

06.03.2007 tarih ve 26454 sayılı resmi gazetede yayımlanan ‘Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik FRP ile yapı elemanlarının güçlendirilmesine ortam oluşturmaktadır.

Tarihi yapıların deprem analizlerine göre, hasar görmesi ihtimali olan taşıyıcı duvarlarında FRP çubuk ile güçlendirme yaygın olarak uygulanmaktadır. Duvar, tonoz, kemer, kubbe ve minarelerin bu yöntemle çeşitli şekillerde güçlendirilmesi sağlanmaktadır. FRP çubuklar ile güçlendirilen yapılar arasında Abide Hatun Camii, Laleli II.Beyazıt Hamamı yer alır (Bayraktar, 2006). Şekil 2.6’ da Kosova Prizren’ de bulunan Emin Paşa Camii’ nin saçak ve kubbesinde uygulanan FRP çubukları görülmektedir.



Şekil 2.6: Kosova Prizren Emin Paşa Camii’nde FRP çubuk uygulaması.

Geçmişte genellikle yapı sektöründe ana taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında tercih edilen yeni nesil kompozitler, günümüzde esas yapı elemanlarında kullanılmaktadır. Özellikle FRP kompozitlerin üretiminin artmasıyla beraber yapılarda farklı amaçlarla da verimli kullanılmış, yüksek dayanıma sahip ve hafif olan FRP kompozit malzemelerin betonarme yapılarda da güçlendirme ve iyileştirmede kullanıldığı görülmektedir.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada Aksaray iline bağlı Sevinçli kasabasından çıkarılan ve yörede yaygın olarak kullanılan volkanik kökenli tuf taşı kullanılmıştır. İçeriğinde ince kum, kireç, taş tozu ve albaria bulunan ve horasan harcının mekanik özelliklerine yakın sonuçlar veren bir tür harç kullanılmıştır. Kemer numunelerinde kullanılan taşın ve harcın mekanik özelliklerini belirlemek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler, ilgili standartlara göre Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tuf taşının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için basınç dayanımı ve üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Kemer inşasında kullanılan harcın özelliklerini belirlemek için ise basınç testleri ile yarmada çekme testleri yapılmıştır.

3.1 Taş Özellikleri

Deneyde kullanılan taşın analizi Ankara Üniversitesi Başkent Meslek Yüksek Okulu Malzeme Araştırma ve Koruma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analize göre kullanılacak taşın jeokimyasal ve fiziksel sonuçları Çizelge 3.1, Çizelge 3.2, ve Çizelge 3.3’de gösterilmektedir (Uslu, 2013).

Çizelge 3.1: Tuf taşının fiziksel deney sonuçları.

Test Türü / Birimi	Sonuç
Mohs Sertlik	3
Dijital Schmidt Çekici Sertliği	35 (33-37)
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	1,97
Doygun Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	1,52
Porozite (%)	22,78
Ağırlıkça Su Emme (%)	15,00
Nemlilik (%)	1,15
Renk	Gri
Doluluk Oranı (%)	76
Ultrasonik Hız (µs)	60,0
Ultrasonik Hız (km/s)	5,40
pH (100 mL suda)	8,87
Suda Çözünen Toplam Tuz (µS -25 mL suda)	590
Suda Çözünen Toplam Tuz (%-25 mL suda)	0,58
Darbe Direnci (kgcm/cm ³)	23

Çizelge 3.2: Taşın jeokimyasal analiz sonuçları – eser elementler.

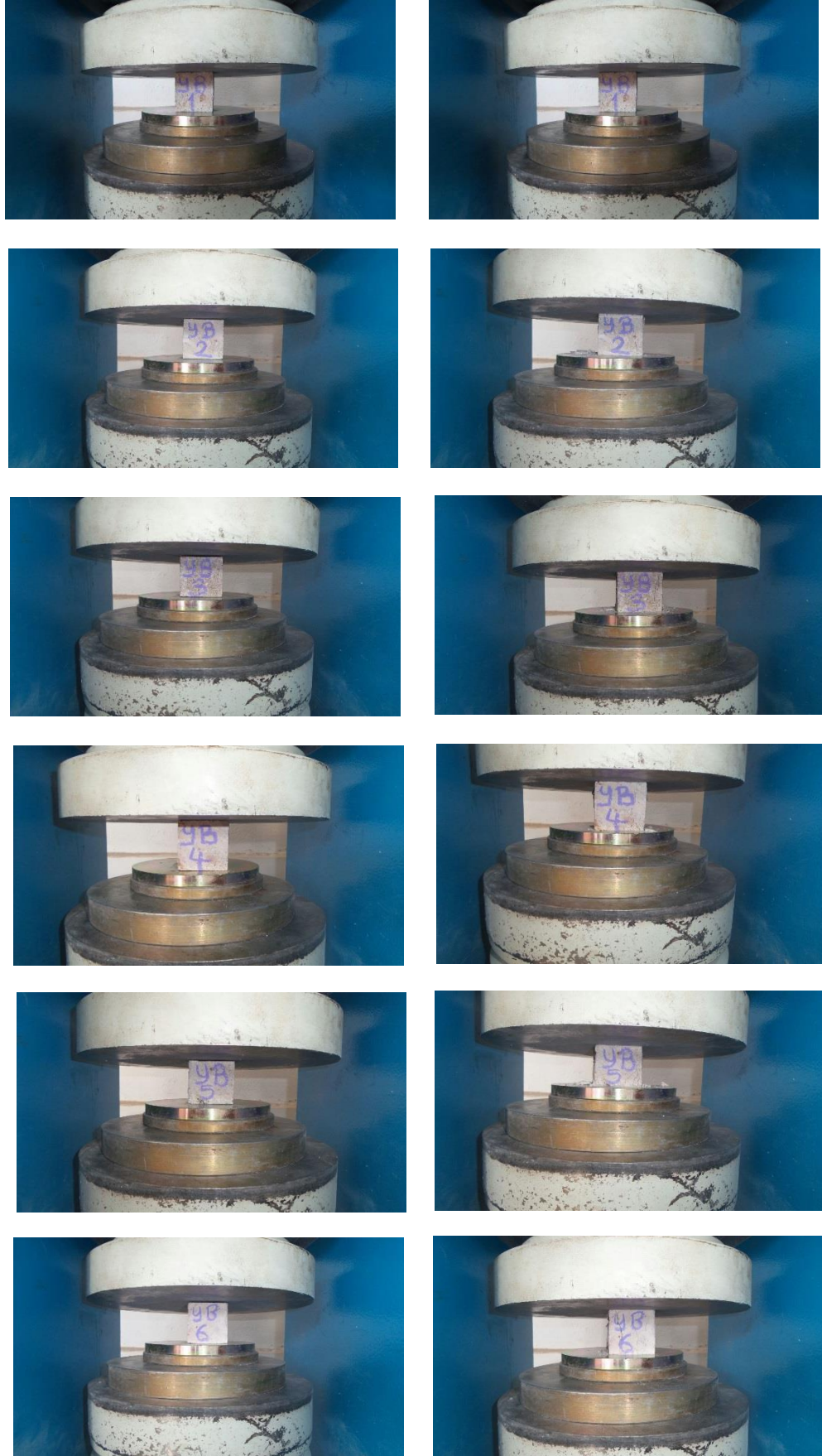
Element	Konsantrasyon Miktarı (ppm)	Element	Konsantrasyon Miktarı (ppm)
Co Kobalt	11	Sn Kalay	1,5
Ni Nikel	3,8	Sb Antimon	1,4
Cu Bakır	3,9	Te Tellür	1,3
Zn Çinko	14	I İyot	2,3
Ga Galyum	11,3	Cs Seryum	12
Ge Germanyum	1	Ba Baryum	656,7
As Arsenik	9,8	La Lantan	37,8
Se Selenyum	0,4	Ce Seryum	46,4
Br Brom	2,9	Hf Hafniyum	7,5
Rb Rubidyum	163,9	Ta Tantal	2,8
Sr Stronsiyum	124	W Tungsten	4
Y İtiryum	9,5	Hg Civa	1
Zr Zirkonyum	133,2	Tl Talyum	1,5
Nb Niyobyum	16,7	Pb Kurşun	22
Mo Molibden	8,4	Bi Bizmut	0,8
Cd Kadmiyum	0,8	Th Toryum	32,8
In İndiyum	0,8	U Uranyum	7,4

Çizelge 3.3: Taşın jeokimyasal analiz sonuçları – temel elementler.

Element	Konsantrasyon Yüzdesi (%)	Element	Konsantrasyon Yüzdesi (%)
Na ₂ O Sodyum oksit	2,32	CaO Kalsiyum oksit	1,21
MgO Magnezyum oksit	0,544	TiO ₂ Titanyum dioksit	0,163
Al ₂ O ₃ Alüminyum oksit	10,05	V ₂ O ₅ Vanadyum pentoksit	0,002
SiO ₂ Silisyum dioksit	69,30	Cr ₂ O ₃ Krom III oksit	0,002
P ₂ O ₅ Fosfor pentaoksit	0,038	MnO Mangan oksit	0,043
SO ₃ Kükürt trioksit	0,001	Fe ₂ O ₃ Demir III oksit	1,15
Cl Klorür	0,036	LOI*	10,34
K ₂ O Potasyum oksit	4,29	Toplam	99,49

(*) LOI: Loss on Ignition / Fırında 950°C’de Kızdırma Kaybı (Karbonat)

TS EN 771-6 (2007) (Doğal taş kâgir birimler)’ ye uygun olarak, 50 x 50 x 50 mm³ boyutlarında kesilen taşlar oda sıcaklığında kurutularak TS EN 772-1 (2012) (Basınç dayanımının tayini)’ ye göre basınç dayanımının belirlenmesi için deneye tabi tutulmuştur. 6 adet numune üzerinde basınç dayanım testleri aşağıda Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1: Taşın basınç dayanım testleri (YB1-YB6 numuneleri).

Numunelerin basınç dayanımı gösterildiği gibi maksimum yükün uygulanan alana bölünmesiyle elde edilmiştir. Tek numune dayanımlarının aritmetik ortalaması hesaplanarak yığma birimlerin basınç dayanımı elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan taşın basınç dayanımı sonuçları Çizelge 3.4’de toplu olarak gösterilmektedir.

Çizelge 3.4: Deneyde kullanılan taşlara ait basınç dayanımı sonuçları.

Numune No	Enkesit Boyutları (mm)		Maksimum Yük (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
	a	b		
YB1	48	50	14600	6,08
YB2	52	48	22000	8,81
YB3	51	50	19400	7,60
YB4	52	48	18500	7,41
YB5	51	48	19900	8,12
YB6	50	51	13800	5,41
Ortalama				7,24
Standart Sapma				1,27

40 x 40 x 160 mm³ (YEÇA1-YEÇA6 numuneleri) ve 50 x 100 x 150 mm³ (YEÇB1-YEÇB6 numuneleri) boyutlarındaki toplam 12 adet numune TS EN 772-6 (2004) (Beton kâgir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini)’ e uygun olarak hazırlanan deney düzeneğinde taşın eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi için denenmiştir. Eğilmede çekme dayanımları aşağıdaki Denklem (3.1)’e göre hesaplanmıştır.

$$R_{tf} = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.1)$$

R_{tf} eğilmede çekme dayanımı (N/mm²), P maksimum yük (kN), b taşın genişliği (mm), d taşın yüksekliği (mm), L taşın mesnet silindirleri arasındaki mesafe (mm)
12 adet numune üzerinde eğilmede çekme dayanımı testleri aşağıda Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’ de görülmektedir.



Şekil 3.2: Taşın eğilmede çekme dayanımı testleri (YEÇA1- YEÇA6 numuneleri).



Şekil 3.3: Taşın eğilmede çekme dayanımı testleri (YEÇB1- YEÇB6 numuneleri).

Eğilmede çekme dayanımı hesaplanan numunelerin deney sonuçları Çizelge 3.5’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5: Taşın eğilmede çekme deneyleri sonuçları.

Numune No	P (N)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	R _{tf} (MPa)
YEÇA1	450	100	41	38	0,76
YEÇB2	600	100	42	44	0,74
YEÇA3	390	100	42	42	0,53
YEÇA4	440	100	41	41	0,64
YEÇA5	420	100	38	43	0,60
YEÇA6	380	100	38	40	0,63
YEÇB1	3000	100	48	99	0,64
YEÇB2	3380	100	48	100	0,70
YEÇB3	2480	100	49	99	0,52
YEÇB4	3240	100	53	100	0,61
YEÇB5	2700	100	49	100	0,55
YEÇB6	2100	100	48	99	0,45
Ortalama					0,61
Standart Sapma					0,09

3.2 Harç Özellikleri

Bu çalışmada harç numunesinde hacimsel olarak; 4/11 oranında ince kum, 4/11 oranında kireç, 2/11 oranında taş tozu, 1/11 oranında albaria kullanılmıştır. Albaria'nın içerisinde inorganik lifler ve doğal silis agrega bulunur. Doğal hidrolik kireç esaslı yapıya sahip olan albaria çimento içermez ve tarihi yapılarda sıva malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Çalışmada taşların arasına kullanılacak harç numunesi üzerinde eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. TS EN 1015-11 (2000) (Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini)' e uygun olarak 40x40x160 mm³ boyutlarındaki kalıplara yerleştirilen harç numunesine 28 günlük kür süresinin sonunda eğilmede çekme testi yapılmıştır. Kür süresini tamamlayan numunelere üç noktadan kırılma gerçekleşene kadar yükleme yapılmıştır. Harç numunesi 100 mm aralıklı iki silindir üzerine yerleştirilir ve 5 kg/sn hızla orta noktasının üzerine de bir silindir konularak yüklenir. TS EN 1015-11 (2000) (Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini)' de görüldüğü gibi Denklem (3.2)'de numunelerin eğilmede çekme dayanımları hesaplanmaktadır.

$$\sigma = 1,5 \frac{PL}{bd^2} \quad (3.2)$$

Burada; σ eğilme dayanımı (N/mm²), P prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N), b numune genişliği (mm), d numune yüksekliği (mm), L mesnet silindirlerinin eksenleri arasındaki mesafedir (mm).

Kullanılan harcın eğilmede çekme dayanımı testi Şekil 3.4' te gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Harcın eğilmede çekme dayanımı testi.

40 x 40 x 40 mm³ boyutlarında hazırlanan 6 adet harç numunesi TS EN 1015-11 (2000) 'de belirtildiği gibi kalıplara dökülerek 28 gün boyunca kür uygulanmıştır. Bu düzenekte hazırlanan numuneler basınç dayanımını hesaplamak üzere normal koşullarda oda sıcaklığında bekletilmiştir. 240 kg/sn sabit hızla kırılma meydana gelinceye kadar harç numunesine yük uygulanmıştır.

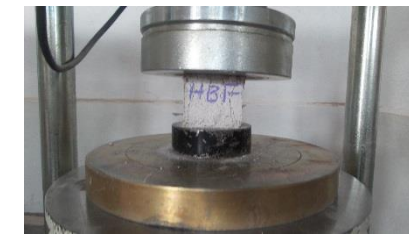
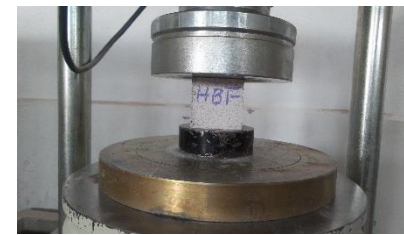
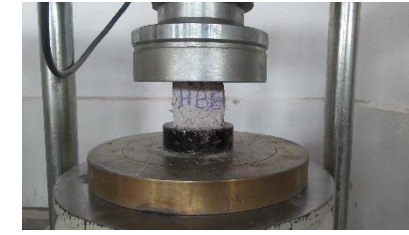
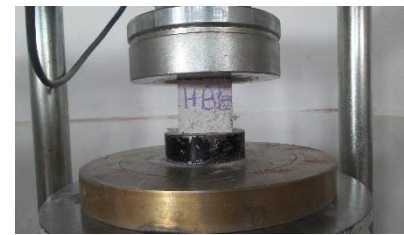
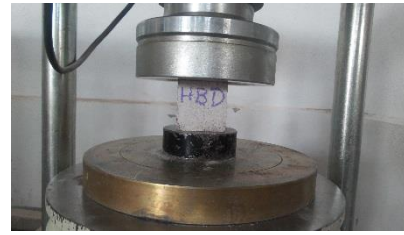
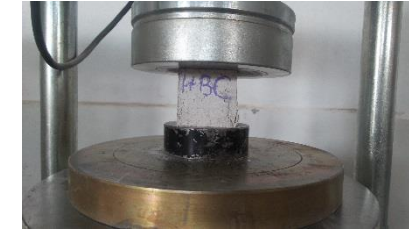
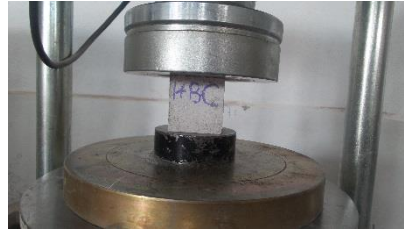
TS EN 1015-11 (2000) 'de belirtilen şekilde numunelerin basınç dayanımları Denklem (3.3)'e göre hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{1600} \quad (3.3)$$

Burada; σ basınç dayanımını (MPa) , P uygulanan kuvveti (N) göstermektedir. Harç numunelerinden elde edilen eğilme ve basınç deneylerine ait sayısal sonuçlar Çizelge 3.6' da verilmektedir. Harcın basınç dayanımı testleri Şekil 3.5' dedir.

Çizelge 3.6: Kullanılan harcın basınç ve eğilmede çekme deney sonuçları.

Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Numune No	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)
HB A	3,45	HEÇ A	0,39
HB B	3,20	HEÇ B	0,44
HB C	3,05	HEÇ C	0,57
HB D	3,68	HEÇ D	0,46
HB E	3,65	HEÇ E	0,37
HB F	3,19	HEÇ F	0,52
Ortalama	3,37		0,46
Standart Sapma	0,26		0,08



Şekil 3.5: Harcın basınç dayanımı testleri.

3.3 FRP Özellikleri

Tarihi binaların deprem vb. sebeplerden dolayı tamamen göçmemesi, orijinalliğinin bozulmaması ve tarihi görüntüsünü koruması istenir. Bu durumda klasik olan çeşitli güçlendirme tekniklerinin yapının görünümünü değiştirmesi, yükünü arttırması, betonarme, çelik vb. elemanların mevcut tuğla, taş elemanlarla beraber çalışmasının verimli olarak sağlanamaması gibi çözülmesi çok zor olan sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Tarihi yapıların gerekli yerlerindeki güçlendirme yöntemlerinin seçilmesi ve uygulanması yönündeki bu dezavantajları FRP çoğu zaman ortadan kaldırmaktadır.

İngilizce Fiber Reinforced Polimer kelimelerinin kısaltılması ile dilimize lif takviyeli polimer olarak geçen FRP, son yıllarda oldukça kullanılan güçlendirme malzemesidir. FRP karbon, aramid, cam ve bazalt gibi malzemelerden üretilen kompozit bir sistemdir. Hafiftir, iyi fiziksel özelliklere ve yüksek mekanik dayanımlara sahiptir.

FRP yapıda çok çeşitli şekillerde uygulanabilir. Örneğin dış cephede görüntünün bozulmasının istenmediği durumlarda içeriden yapılan karbon lif polimer uygulaması ile lifli ankrajlar kullanılarak malzemenin duvarla birlikte çalışması sağlanabilir.

Karbon lif takviyeli polimerden oluşan CFRP plakalar günümüzde yaygın olarak kullanılmakta ve çelik plakaların fiziksel özelliklerini yakalamaktadır. Özellikle karmaşık yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılır. Epoksi reçinesi ile yapıştırılır. Böylece yükler epoksi reçine yapıştırıcısı sayesinde kompozite aktarılır, böylelikle üniform bir yük dağılımı sağlanır.

Karbon lif takviyeli polimer yapıştırılmasından önce yüzey hazırlığının doğru yapılması gerekir. Plakalar uygulanmadan önce yüzey önce toz ve kirden temizlenmelidir. Deneylerde güçlendirme için hasarlı modellerde kullanılan karbon lif takviyeli polimerin özellikleri Çizelge 3.7' de görülmektedir.

Çizelge 3.7: CFRP malzeme özellikleri (URL-1).

Lif Tipi	Orta dayanımlı karbon fiber						
Dokuma Yapısı	Lif doğrultusu: 0° (tek doğrultulu). Çözümlü dokuması: Siyah karbon fiberler (toplam ağırlığın %99'u). Atkı dokuması: Beyaz termoplastik ısıtılma işlemine tabi tutulmuş fiberler (toplam ağırlığın %1'i).						
Boyutları	<table><tr><td></td><td><u>Uzunluk</u></td><td><u>Genişlik</u></td></tr><tr><td>1 Rulo</td><td>≥50 m</td><td>300 mm</td></tr></table>		<u>Uzunluk</u>	<u>Genişlik</u>	1 Rulo	≥50 m	300 mm
	<u>Uzunluk</u>	<u>Genişlik</u>					
1 Rulo	≥50 m	300 mm					
Birim Ağırlık	230 g/m² ± 10 g/m²						
Dokuma Tasarım Kalınlığı	0.131 mm (karbon fiberlerin toplam alanına göre).						
Lif Yoğunluğu	1.76 g/cm³						
Kuru Lif Özellikleri	Çekme Dayanımı : 4300 N/mm² Çekme Elastisite Modülü : 234000 N/mm² Kopma Uzaması : % 1.8						
Laminat Özellikleri	Sikadur-330 ile uygulamada; Laminat kalınlığı: 1 mm kat başına. Nihai Yük Taşıma: 350 kN/m kat başına. E-modülü: 25 kN/mm² (1 mm tipik laminat kalınlığı için).						

Karbon lif takviyeli polimeri yapıştırmak için iki bileşenli epoksi reçinesi Sikadur-330 kullanılmıştır. Epoksi reçinesine ait özellikler Çizelge 3.8' de verilmektedir.

Çizelge 3.8: Epoksi reçinesi özellikleri (URL-2).

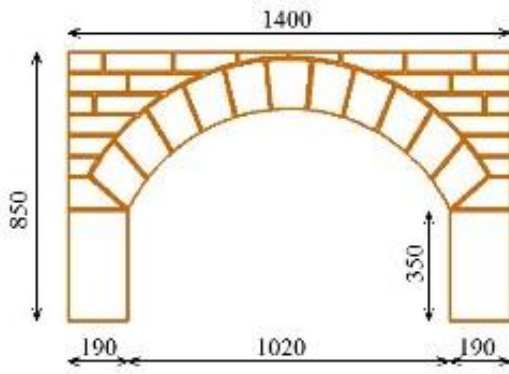
Görünüm/ renk	Reçine A Bileşeni : macun kıvamlı Sertleştirici B Bileşeni: macun kıvamlı A Bileşeni : beyaz renkli B Bileşeni : gri renkli A+B bileşenleri: açık gri renkli
Karışım	A Bileşeni : B Bileşeni = 4 : 1 ağırlıkça
Birim Ağırlık	Reçine karışımı: 1.31 kg/l (+23 °C'de)
Viskozite	6000 mPas (+23 °C'de)
Termal Genleşme Katsayısı	45 x 10 ⁶ / °C (-10 °C ile +40 °C arasında)
Çekme Dayanımı	30 N/mm ² (+23 °C'de 7 günlük)
Elastisite Modülü	Eğilme: 3800 N/mm ² (+23 °C'de 7 günlük) Çekme: 4500 N/mm ² (+23 °C'de 7 günlük)
Kopma Uzaması	%0.9 (+23 °C'de 7 günlük)
Sarfiyat	Genel olarak: 0.7 – 1.5 kg/m ²
Tam kürünü alma	5 gün (+23 °C'de)

4. KEMER NUMUNE DENEYLERİ

4.1 Kemer Numunelerinin Hazırlanması

Deneyssel çalışma Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. 500 kN' luk hidrolik krik o ile yapılan yükleme 500 kN kapasiteye sahip yük hücresiyle ölçülmüştür. Deney numuneleri, kemer üst yüzeyinin orta noktasından uygulanmak üzere düşey yüke tabi tutulmuştur. Düşey yer değıştirme değeri kerinin orta noktasında bulunan 7 numaralı LVDT yardımıyla bulunurken, yatay yer değıştirme değeri ise kolonların kemer ile birleştiğı düzlemdeki iki adet yatay LVDT'lerden (LVDT 1 ve LVDT 6) elde edilen değeriin toplamı hesaplanarak bulunmuştur.

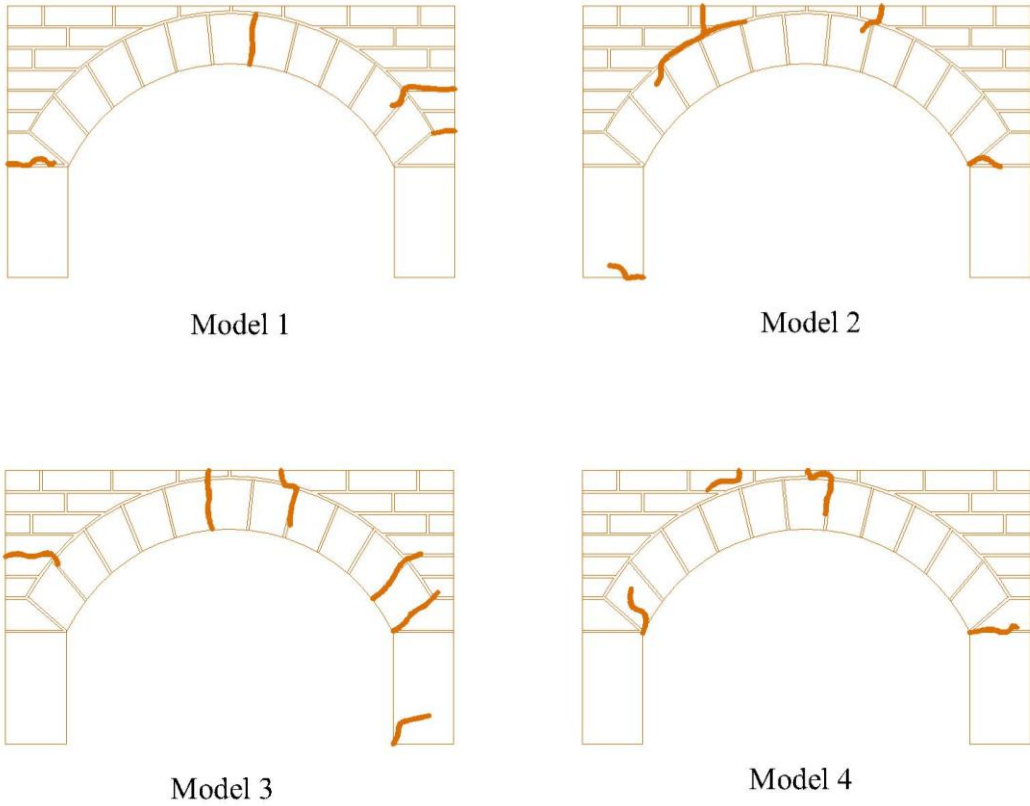
Bu çalışmada 1'i referans, 6'sı hasar görmüş toplamda 7 adet kemer numunesi düşey tekil yük altında incelenmiştir. Taş kemer sistemi 350 mm yüksekliğinde 190x190 mm² kesitinde ayaklar üzerinde, toplam yüksekliği 850 mm ve iki kolonu arasında 1020 mm açıklığı olan modellerden oluşmaktadır. Çalışmadaki deney düzeneğinde taşlar arasındaki derzlerin mesafesi 10 mm olacak şekilde örülmüştür. Kemer numunelerinin genel geometrisi Şekil 4.1'de görülmektedir.



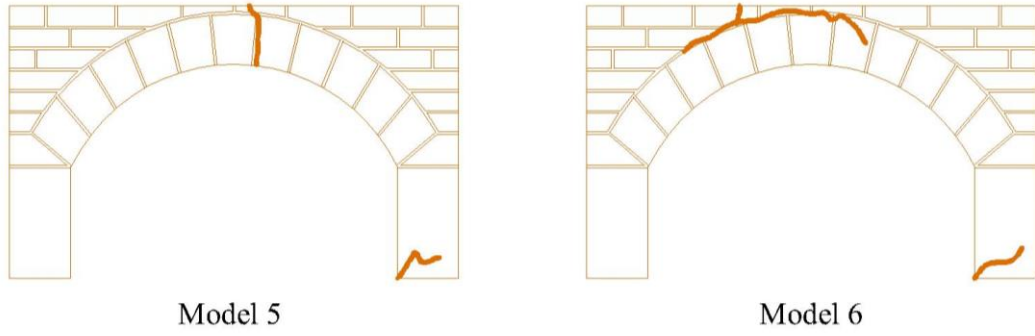
Şekil 4.1: Kemer modellerinin genel geometrisi.

Referans numune dışındaki diğer modellere, referans numuneye ait kırılma yükünün % 75'ine karşılık gelen yük (3,26 kN) altında belirli oranda hasar verilmiştir. Hasar verilen modellerde meydana gelen çatlaklar aynı yük altında aynı yerlerde meydana gelmemelerine rağmen birbirlerine benzer formlarda oluşmuşlardır. Yük uygulanırken meydana gelen çatlaklar Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Yığma yapılarda sünekliği arttıran herhangi bir takviye yapılmadığında çoğunlukla çekme gerilmelerinin yoğunlaştığı bölgelerde hasarlar meydana gelmektedir. Çalışmadaki kemer modellerinde de bu durum görülmektedir. Modellerde hasar verme esnasında uygulanan yük sonucunda kemerin ortasında bulunan kilit taşına yakın yerlerde çekme gerilmeleri sınır değerlere ulaşmış ve bu kısımlarda çatlaklar oluşmuştur. Çatlama sonrasında taş kemer formunu kaybetmiştir. Kemerdeki üzengi taşı hizasında dışa doğru hareketlenme meydana gelmiştir, bu hareketlenme sonucunda kemer ayaklarının altındaki mesnetlerin iç kısmında gerilmeler artmış ve çekme çatlakları oluşmuştur. Hasar verilmiş modellerde oluşan çatlaklar bu şekilde meydana gelmiştir.

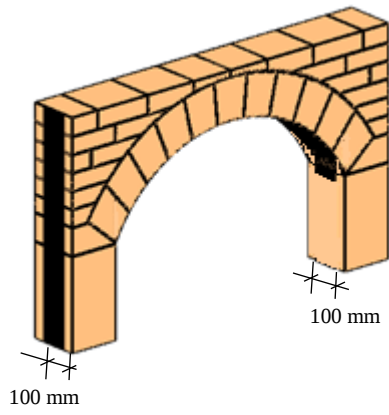


Şekil. 4.2: Hasarlı modellerde çatlaklar.

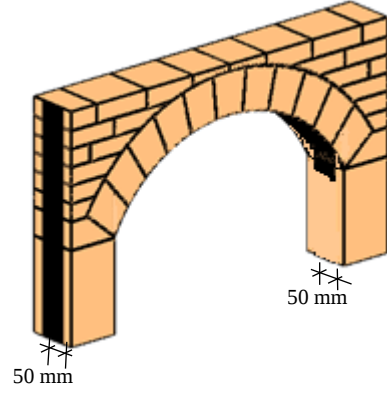


Şekil. 4.2 (devam): Hasarlı modellerde çatlaklar.

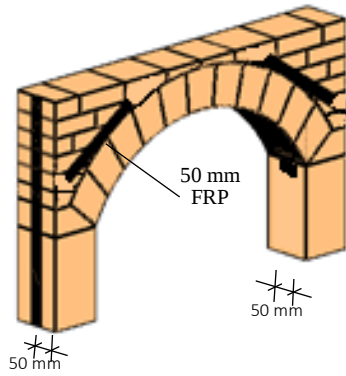
Öncelikle referans numune yapılmış ve üzerinde hiçbir güçlendirme yöntemi uygulanmadan deneye tabi tutulmuştur. Deney sonucunda bir kırılma yükü bulunmuştur. Diğer numunelere ise referans numune kırılma yükünün % 75 oranında bir yük altında hasar verilmiştir. Hasar verilen bu numunelere değişik FRP güçlendirme modelleri uygulanmıştır. FRP ve epoksi ile güçlendirilmiş modellere ait temsili çizimler Şekil 4.3’ de gösterilmiştir. Model 1’de kemerin iç yüzeyinden 100 mm genişliğinde FRP şerit, kemer üzengi taşının 50 mm aşağısından başlayacak şekilde yapıştırılmıştır. Kemer kolonunun dış yüzeyi ise mesnetlerden kemerin üst noktasına kadar yine 100 mm lik FRP şerit ile güçlendirilmiştir. Model 2’de Model 1’deki uygulamanın aynısı olup FRP genişliği 50 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Model 3’te Model 2’deki 50 mm. genişliğindeki FRP şerit ile güçlendirmeye ilave olarak numune ön ve arka yüzeylerine 50 mm genişliğinde FRP şeritler diyagonal olarak uygulanmıştır. Model 4’te tarihi yapıların görünümünü nispeten bozmayan sadece derzlerin epoksi harcı ile güçlendirilmesi tekniği incelenmiştir. Bu maksatla kemer iç yüzeyindeki ve kolon dış yüzeyindeki derzler yaklaşık 2 cm olacak şekilde epoksi esaslı harç ile doldurulmuştur. Tarihi yapılarda kemerlerin birbirlerine veya başka yapı elemanlarına bitişik olmaları nedeniyle kolon dış yüzeylerinin FRP ile güçlendirilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle Model 5 ‘te kemer numunesinin ön ve arka yüzeylerine mesnetlerden başlayarak yükseklik boyunca uzanan 50 mm genişliğinde FRP şerit uygulanmıştır. Aynı zamanda kemer iç yüzeyinde 100 mm genişliğinde FRP şerit ile güçlendirme yapılmıştır. Model 6’da ise kemer iç yüzeyine ve kolon dış yüzeyine yapıştırılarak yapılan 50 mm genişliğindeki şeritler üzerine derz aralıklarına denk gelecek şekilde ankraj uygulaması yapılmıştır.



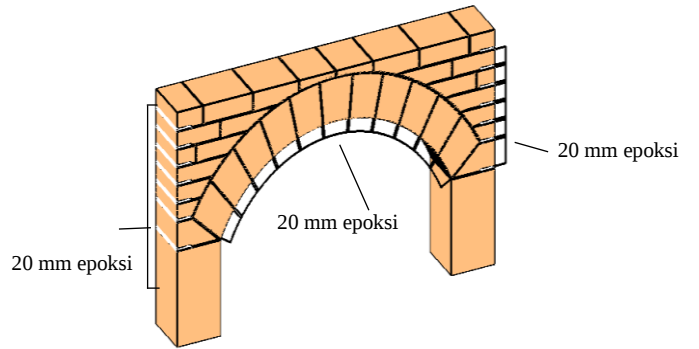
(a) Model 1



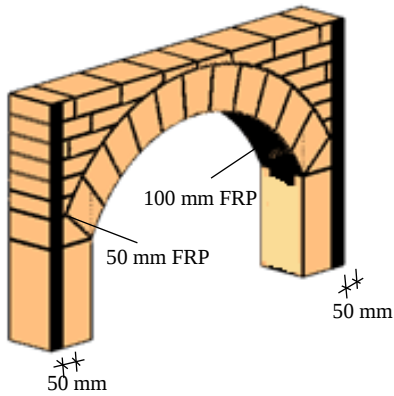
(b) Model 2



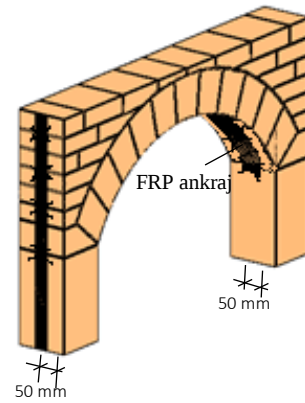
(c) Model 3



(d) Model 4



(e) Model 5



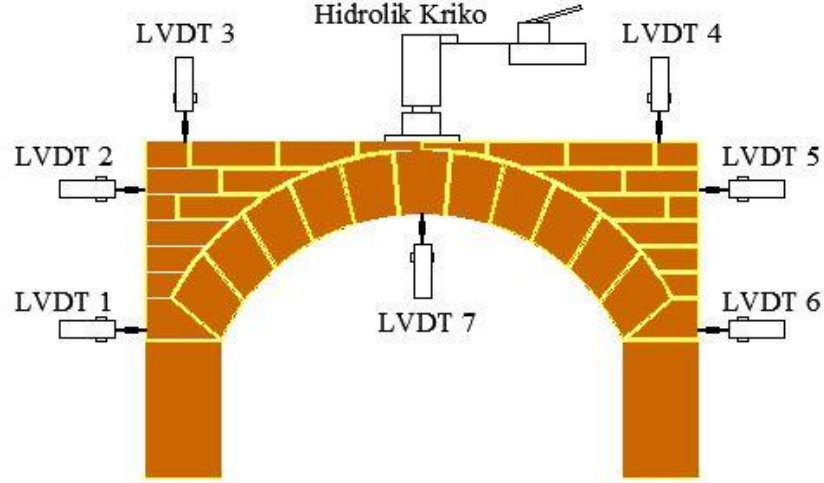
(f) Model 6

Şekil 4.3 : Değişik tipteki epoksi ve FRP güçlendirme uygulamaları.

4.1.1 Yer değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi

Maksimum yükleme sonucunda oluşan orta noktadaki yer değiştirme, yatay ve düşey yer değiştirmeler, yer değiştirme ölçerler (LVDT) kullanılarak bulunmuştur. Deney sonucunda numunelerde meydana gelen yer değiştirmeler 7 adet (LVDT) yer

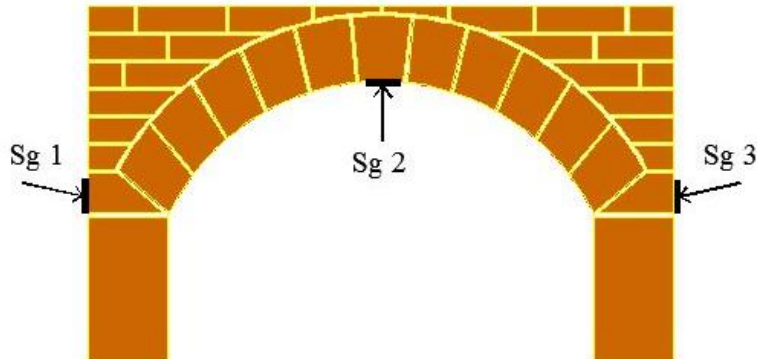
değiştirme ölçer yardımıyla hesaplanmıştır. Kemer numunesinde yatay ve düşey yer değiştirmelerin elde edildiği LVDT'lerin deney düzeneğine yerleşimi Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



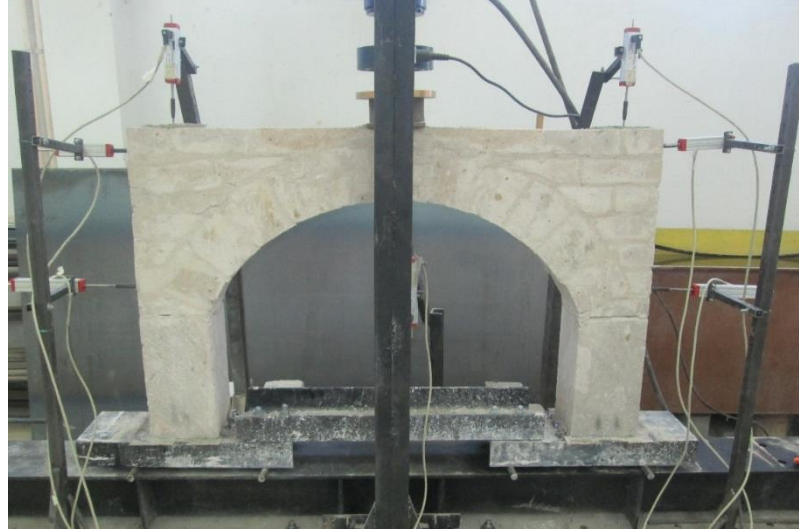
Şekil 4.4: Deney numunelerine LVDT'lerin yerleştirilmesi.

4.1.2 Şekil değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi

Deney numunelerinde oluşan şekil değiştirmeleri ölçmek için elastik bir taşıyıcı üzerinde birbirine paralel bağlantılı ince tellerden oluşan şekil değiştirme ölçerler (strain- gaugeler) kullanılmıştır. Deney numunesine uygulanan yükün etkisiyle uzayıp kısalan strain- gaugeler şekil değiştirmesi ölçülecek olan numunenin yüzeyine yapıştırılmıştır. Strain- gaugelerin deney düzeneğindeki yerleşimi Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Deney düzeneği ise Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.5: Deney numunelerine strain-gaugelerin yerleştirilmesi.



Şekil 4.6: Deney düzeneği.

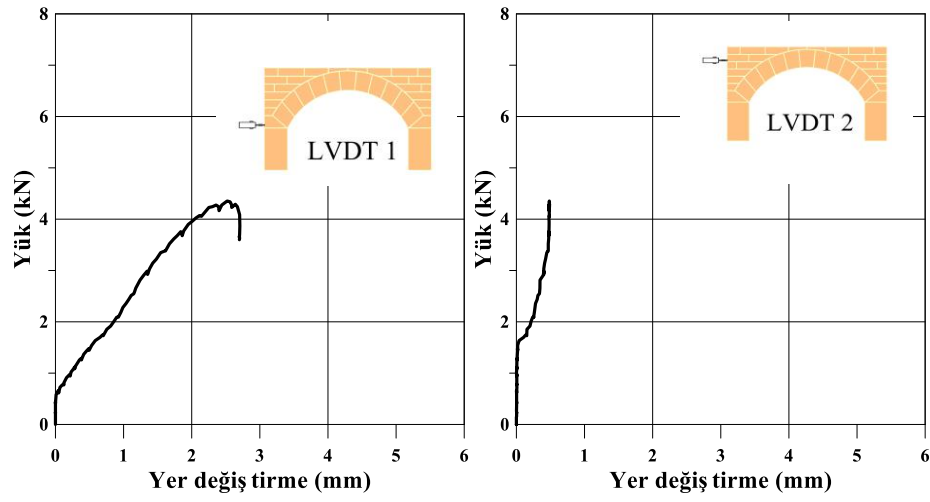
4.2 Referans Numune

Referans olarak üretilen kemer numunesi örüldükten sonra 28 gün bekletilmiş ve herhangi bir güçlendirme yapılmadan deneye tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen veriler referans olarak kabul edilmiştir. Referans numunede kolon ayakları ankastre mesnet olarak ayarlanmıştır. Bu şekilde mesnetlerde moment ve dönme olmaması sağlanmıştır. Kemerin orta noktasından düşey yük uygulanmak suretiyle deney gerçekleştirilmiştir.

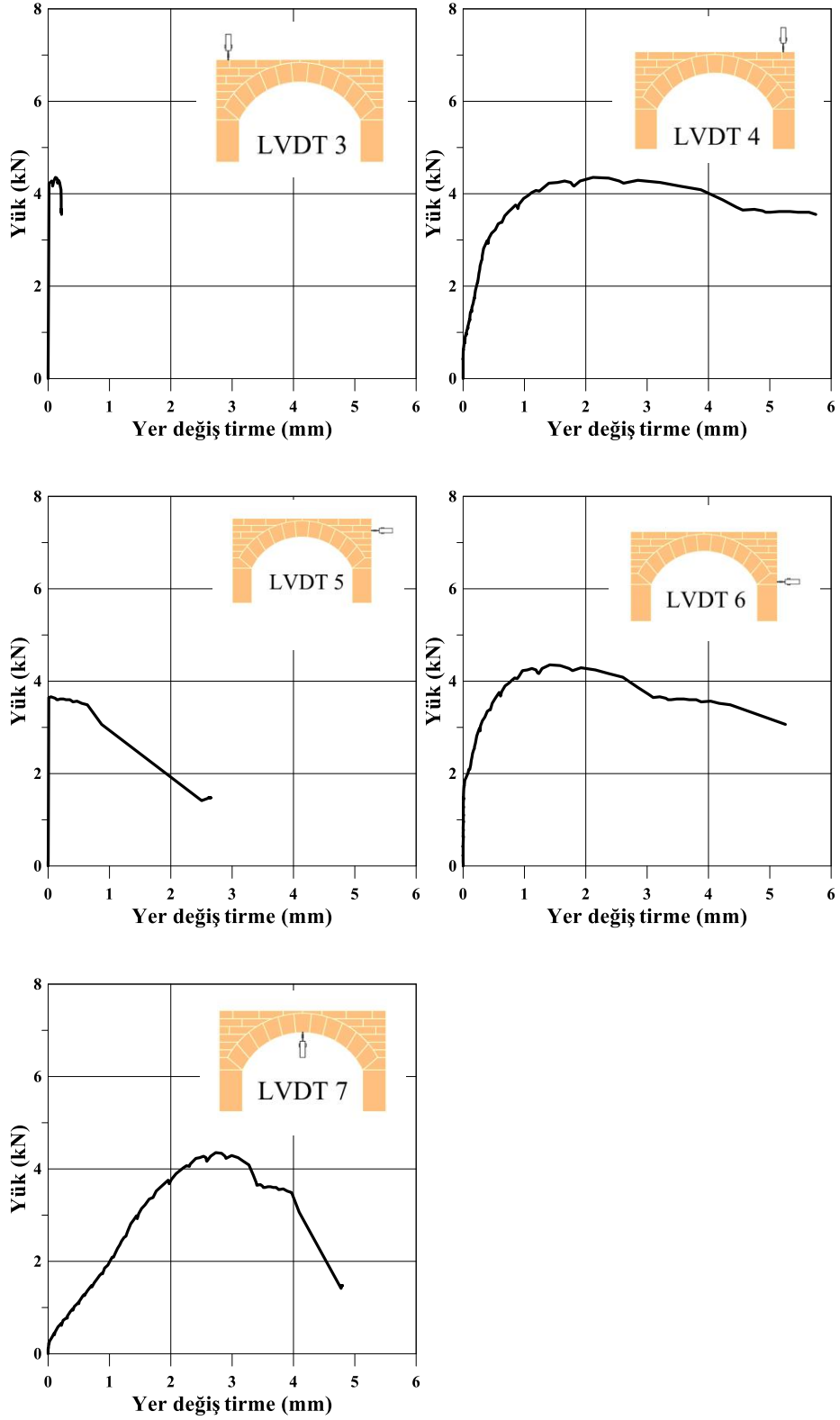
Referans kemer modelinde ilk çatlaklar 2 kN' luk yük ile hemen hemen aynı zamanda kilit taşının sağındaki derzde ve kemerin sağ üst tarafındaki taşların derz aralarında meydana gelmiştir. Göçme yüküne ulaştığında sağ üzengi taşı ile kolon arasındaki derzde ayrılma görülmüştür. Göçme anında 4,35 kN'luk yük altında kemer numunesindeki yatay yer değiştirme 3,93 mm iken düşey yer değiştirme 2,73 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.7' de referans numunenin göçme sonucundaki hali görülmektedir. Şekil 4.8' de referans numuneye ait yük - yer değiştirme grafikleri yer almaktadır. Çok küçük değerlerde kalan LVDT' lere ait grafikler çizilmemiştir.



Şekil 4.7: Referans numunenin göçme sonucundaki hali.



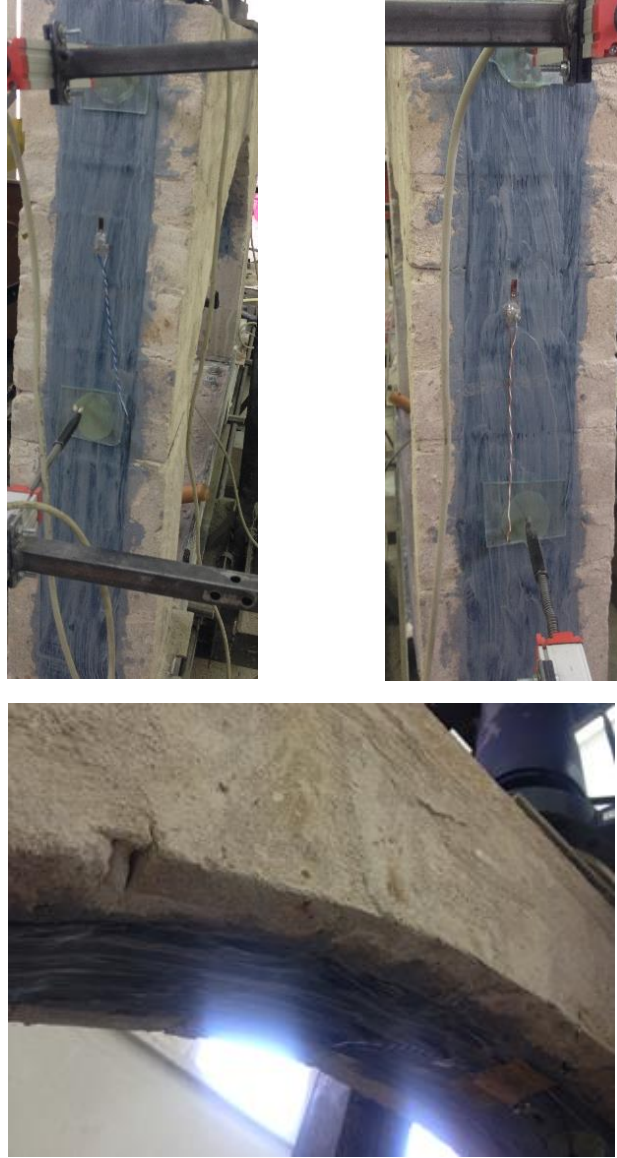
Şekil 4.8: Referans numuneye ait yük- yer değiş tirme grafikleri.



şekil 4.8 (devam): Referans numuneye ait yük- yer değiş tırme grafikleri.

4.3 Model 1

Model 1'e hasar verilmiş ve hasar verildikten sonra yüzeyde oluşan toz, parça vb. şeylerden temizlenmiştir. Kemer numunesinin temizlenmesinin ardından FRP uygulanacak yüzeye 2 bileşenli Sikadur 330 epoksi reçinesi sürülmüştür. Model 1'de kemerin iç yüzeyinden 100 mm genişliğindeki FRP şerit, kemer üzengi taşının 50 mm aşağısından başlayacak şekilde yapıştırılmıştır. Kemer kolonunun dış yüzeyi ise mesnetlerden kemerin üst noktasına kadar yine 100 mm lik FRP şerit ile güçlendirilmiştir. Hasarlı kemer numunesi ve FRP uygulanmış hali Şekil 4.9' da görülmektedir.

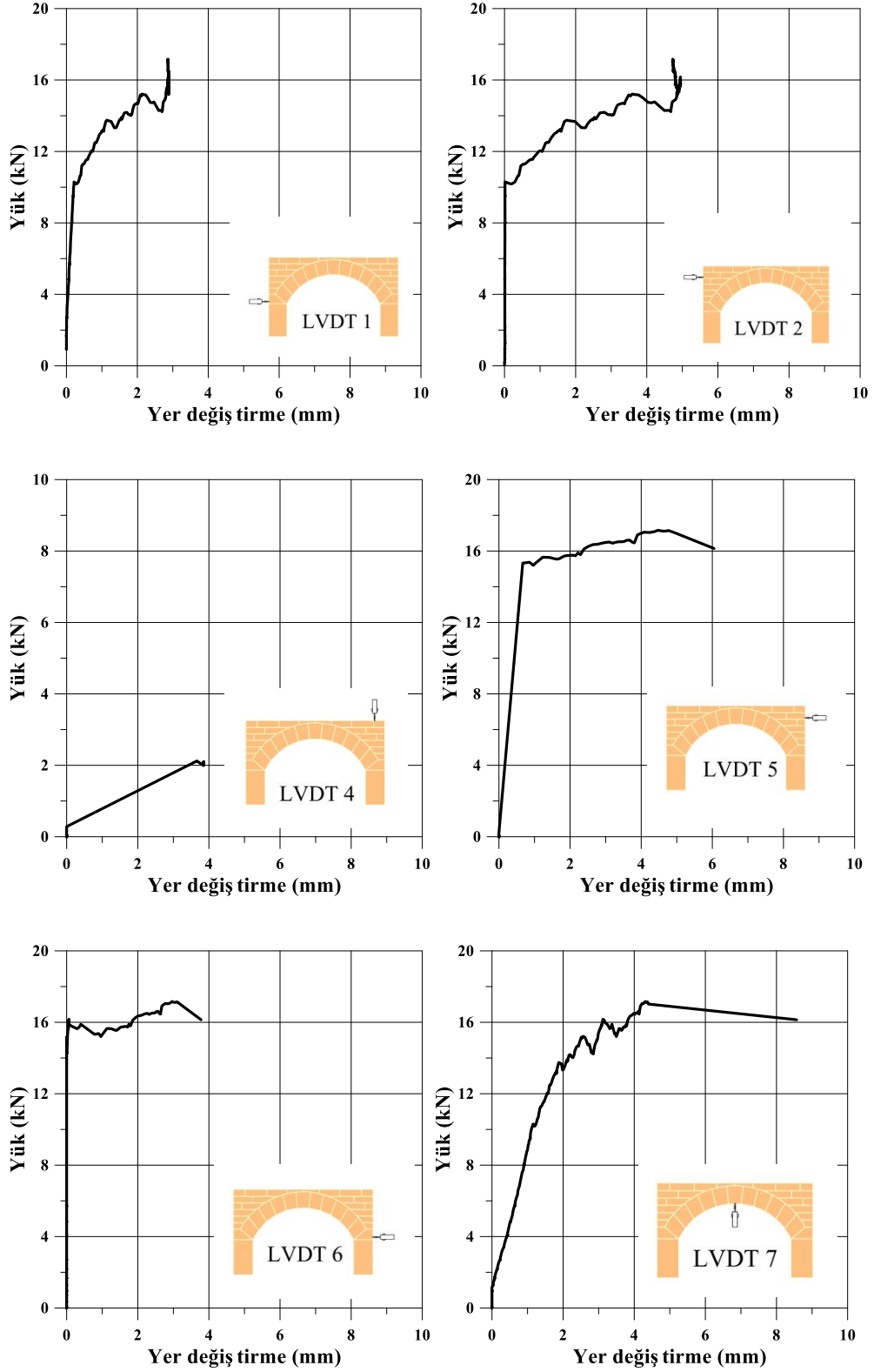


Şekil 4.9: Model 1'in sağ ve sol kolon boyunca ve kemer iç yüzeyine FRP uygulanmış hali.

Model 1’de ilk çatlaklar 9 kN yük altında kilit taşının sağ yanındaki derzde oluşmuştur. 10 kN’luk yüke ulaşıldığında numunenin sol tarafındaki kemer sırtı boyunca uzanan derzde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Uygulanan yük 15 kN’a çıktığında numunenin sağ tarafındaki kemer sırtı boyunca uzanan derzde çatlaklar gözle görülür hale gelmiştir. Model 1 üzerinde maksimum yük 17,16 kN’ a ulaştığında göçme meydana gelmiş; bu anda yatay yer değiştirme 5,83 mm, düşey yer değiştirme 4,31 mm olarak ölçülmüştür. Göçme anında kemer iç yüzeyinde bulunan FRP şerit, kilit taşının altından ayrılmıştır. FRP’nin kemer yüzeyinden ayrılması ve yükleme sonrası hali Şekil 4.10’ da görülmektedir. Şekil 4.11’ de Model 1’ e ait yük - yer değiştirme grafikleri yer almaktadır. Çok küçük değerlerde kalan LVDT’ lere ait grafikler çizilmemiştir.



Şekil 4.10: Model 1’de FRP’nin ayrılması ve yükleme sonrası hali.



Şekil 4.11: Model 1'e ait yük- yer değiş tirme grafikleri

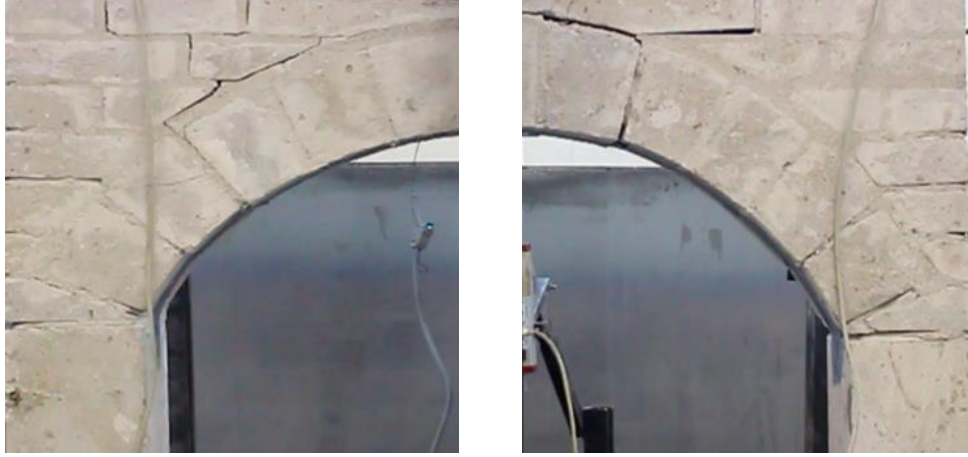
4.4 Model 2

Model 2’de Model 1’deki uygulamanın aynısı olup FRP genişliği 50 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Numune üzerine LVDT ile strain- gaugeler yerleştirilmiş, bu sayede gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçülmüştür. Model 2’ nin deney öncesi görünümü Şekil 4.12’de gösterilmektedir.

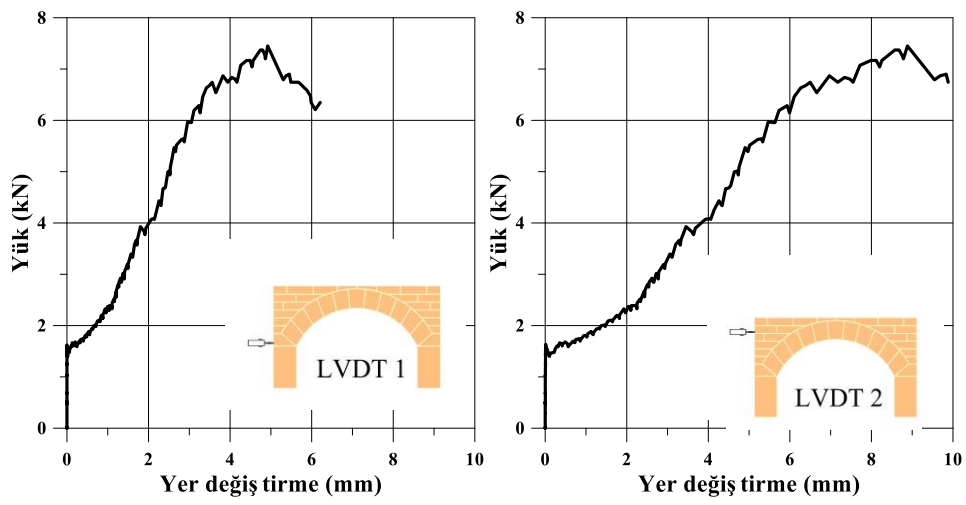


Şekil 4.12: Model 2’ nin deney öncesindeki hali.

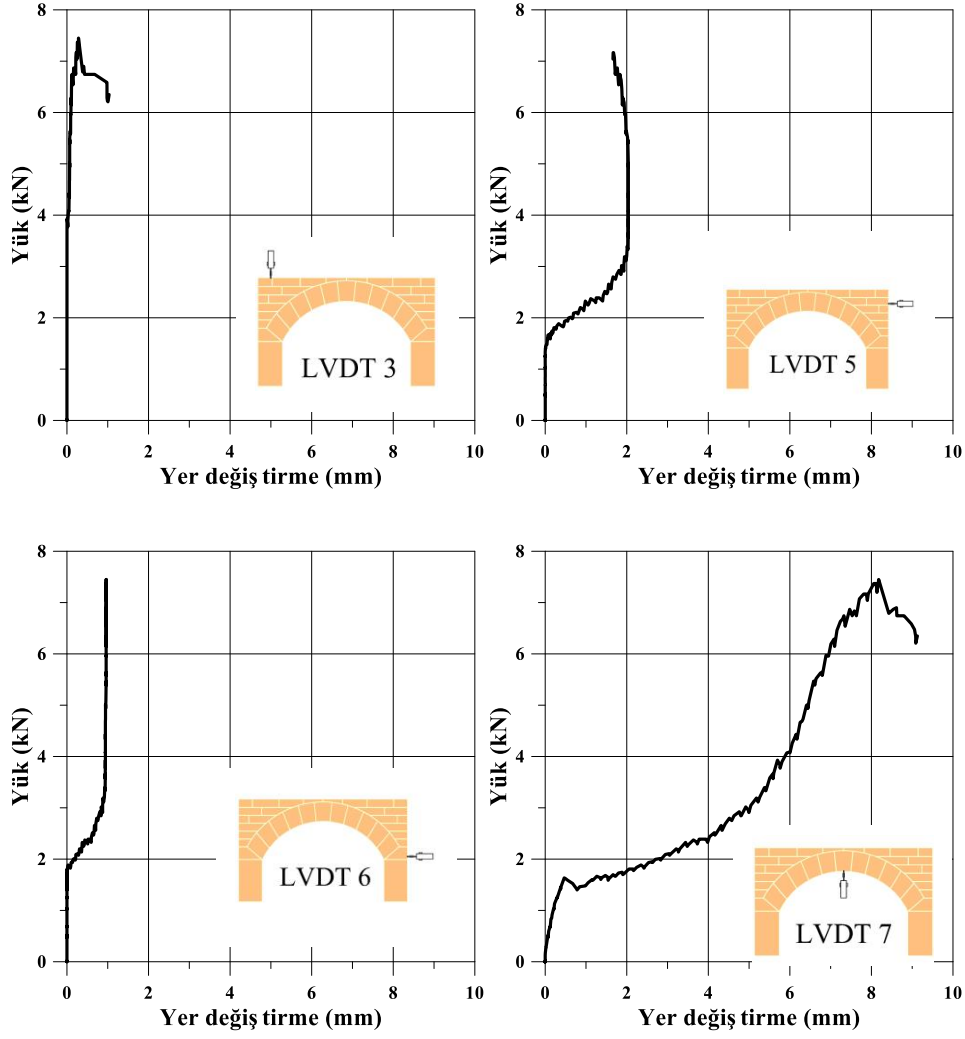
Model 2’de ilk önce numunenin sol tarafındaki kemer sırtı boyunca uzanan derzde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Artan yükün etkisiyle kilit taşı üzerindeki taş ezilmiş kilit taşının düşey yönde daha belirgin yer değiştirme yaptığı görülmeye başlamıştır. Yük 6,86 kN olduğunda numunenin sol kısmındaki kemer taşları arasındaki derzlerde çatlamlar görülmüş olup bu bölgedeki iki kemer taşı kırılmıştır. Sistem bu şekilde yük taşımaya devam etmiş yük 7,44 kN’a çıktığında kilit taşının altından FRP şerit ayrılarak göçme meydana gelmiştir. Bu esnada yatay yer değiştirme 5,66 mm iken düşey yer değiştirme 9,08 mm olarak ölçülmüştür. Model 2’ nin yükleme sonrası hali Şekil 4.13’ de görülmektedir. Şekil 4.14’ de Model 2’ ye ait yük - yer değiştirme grafikleri yer almaktadır. Çok küçük değerlerde kalan LVDT’ lere ait grafikler çizilmemiştir.



Şekil 4.13: Model 2 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.



Şekil 4.14: Model 2'ye ait yük- yer değıştirme grafiği.



Şekil 4.14 (devam): Model 2'ye ait yük- yer değişirme grafiği.

4.5 Model 3

Model 3'te Model 2'deki 50 mm. genişliğindeki FRP şerit ile güçlendirmeye ilave olarak numune ön ve arka yüzeylerine 50 mm genişliğinde FRP şeritler diyagonal olarak uygulanmıştır. Yapılan FRP uygulaması ile diyagonal çatlaklar önlenerek daha fazla dayanım sağlanacağı öngörölmüştür. Model üzerine uygulanan FRP şeritler Şekil 3.24'te görölmektedir. Model 3 'ün deney öncesindeki hali Şekil 4.15'te gösterildiği şekildedir.



Şekil 4.15: Model 3 üzerinde uygulanan FRP şeritler.

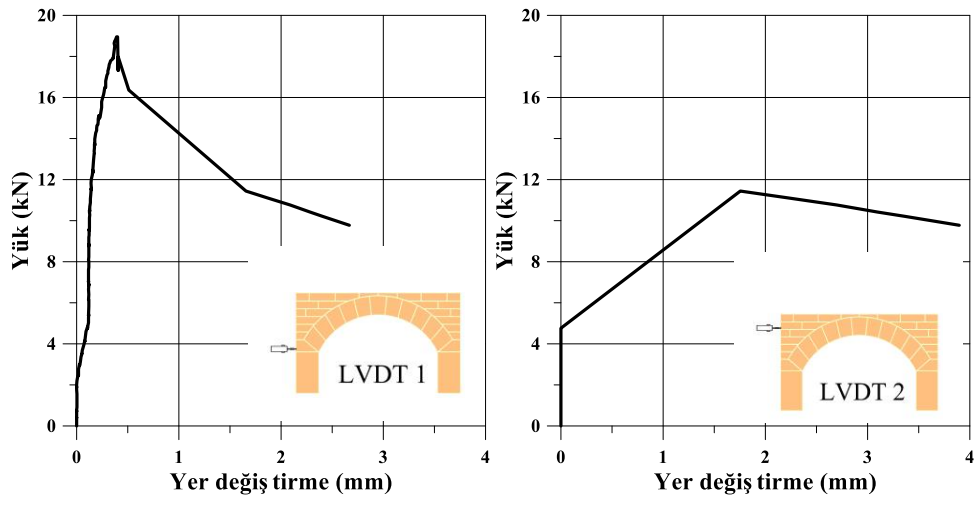
Model 3'te kemer numunesinde ilk çatlaklar kilit taşının solundaki derzde 1,71 kN' luk yükte oluşmuştur. Önceki modellerde gözlenen kemer sırtı boyunca oluşan çatlaklar numune ön ve arka yüzüne diyagonal olarak yapıştırılan FRP'nin etkisiyle oluşmamıştır. Numune sol mesnetinin iç bölgesinde çekme gerilmelerinden dolayı çekme çatlağı meydana gelmiştir. Kemer sol iç yüzeyinden FRP' nin bir kısmının ayrıldığı görülmüştür (Şekil 4.16). Göçme anında yük 18,95 kN' a çıktığı zaman yatay yer değiştirme 1,71 mm iken düşey yer değiştirme 3,53 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.17' de Model 3' e ait yük - yer değiştirme grafikleri yer almaktadır. Çok küçük değerlerde kalan LVDT' lere ait grafikler çizilmemiştir.



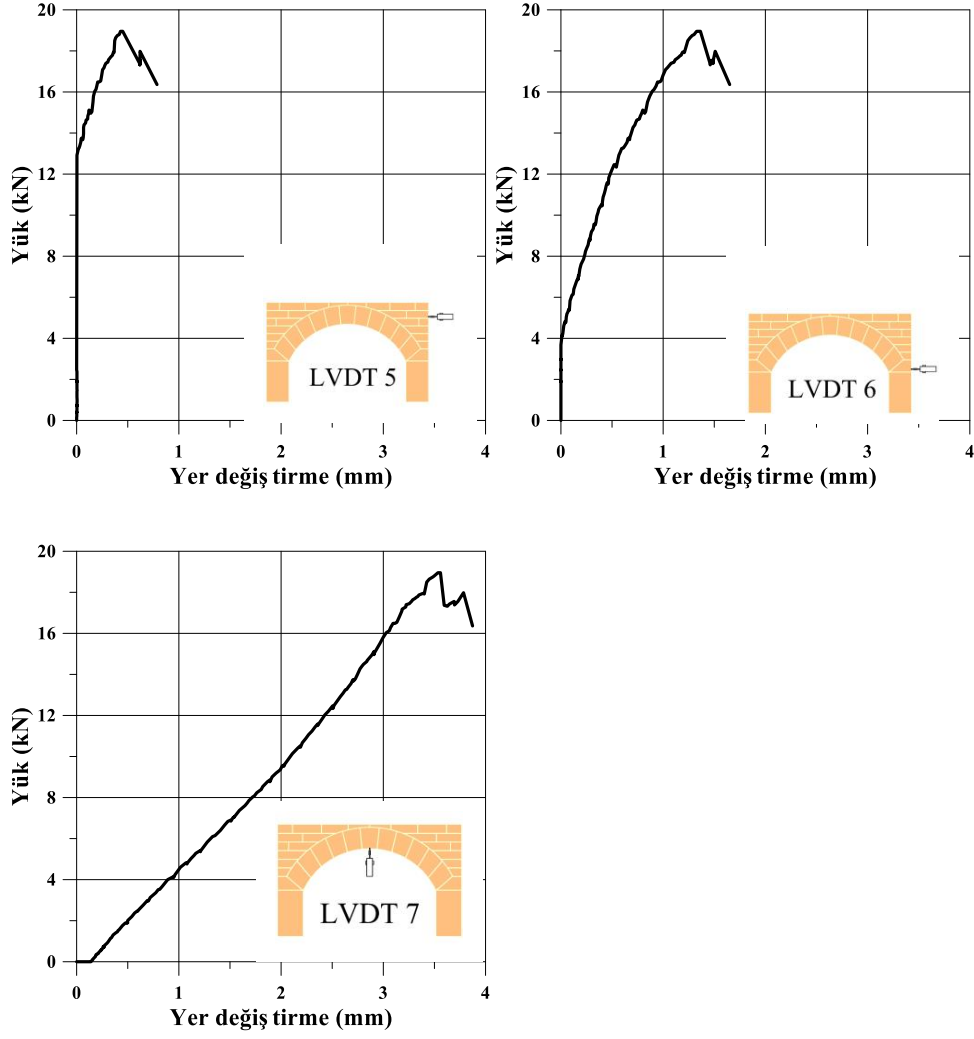
Şekil 4.16: Model 3 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.



Şekil 4.16 (devam): Model 3 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.



Şekil 4.17: Model 3'e ait yük- yer değiştirme grafikleri.



şekil 4.17 (devam): Model 3'e ait yük- yer değiş tirme grafikleri.

4.6 Model 4

Model 4'te tarihi yapıların görünümünü nispeten bozmayan sadece derzlerin epoksi harcı ile güçlendirilmesi tekniği incelenmiştir. Bu maksatla kemer iç yüzeyindeki ve kolon dış yüzeyindeki derzler yaklaşık 2 cm boşaltılmıştır. Boşaltılan derzler toz ve taş kırıntılarından temizlendikten sonra iki bileşenli epoksi esaslı harç (Concresive 1406) ile doldurulmuştur. Concresive 1406' nın Çizelge 4.1' de karışımındaki oranlar verilmektedir.

Çizelge 4.1: Concresive 1406'nın karışım oranları (URL-3).

Concresive 1406	Bileşen A	Bileşen B
Karışım Miktarı	3,75 kg	1,25 kg
Karışım Yoğunluğu	1,70 kg/litre	

Concresive 1406 kolay uygulanır, pasta kıvamındadır. Betona ve çelik malzeme ile aderansı güçlüdür. Gaza ve suya geçirimsizdir ve nemli olan yüzeylerde aderansı iyidir. Çizelge 4.2’de, Concresive 1406’ ya ait teknik özellikler verilmektedir. Model 4’ün deney öncesindeki hali Şekil 4.18’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2: Concresive 1406’ nın teknik özellikleri (URL-4).

Malzemenin Yapısı	Epoksi Reçine
Concresive 1406 Bileşen A	Epoksi Sertleştirici
Concresive 1406 Bileşen B	
Renk	Gri
Karışım Yoğunluğu	1,70+0,05 kg/litre
Basınç Dayanımı (TS EN 196)	
1 gün	17 N/mm ²
7 gün	25 N/mm ²
Yapışma Dayanımı (28 gün)	
Betona	3,0 N/mm ²
Çeliğe	3,5 N/mm ²
Uygulama Kalınlığı	Min. 2 mm
Uygulama Kalınlığı	Maks. 30 mm
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	+5 °C +30 °C
Kullanma Süresi (+20 °C)	40 dak.
Yeniden Kaplanabilme Süresi (+20 °C)	18-24 saat
Üzerinde Yürünebilme Süresi (+20 °C)	24 saat
Servis Sıcaklığı	-15 °C + 90 °C
Tam Kurlenme Süresi (+20 °C)	7 gün

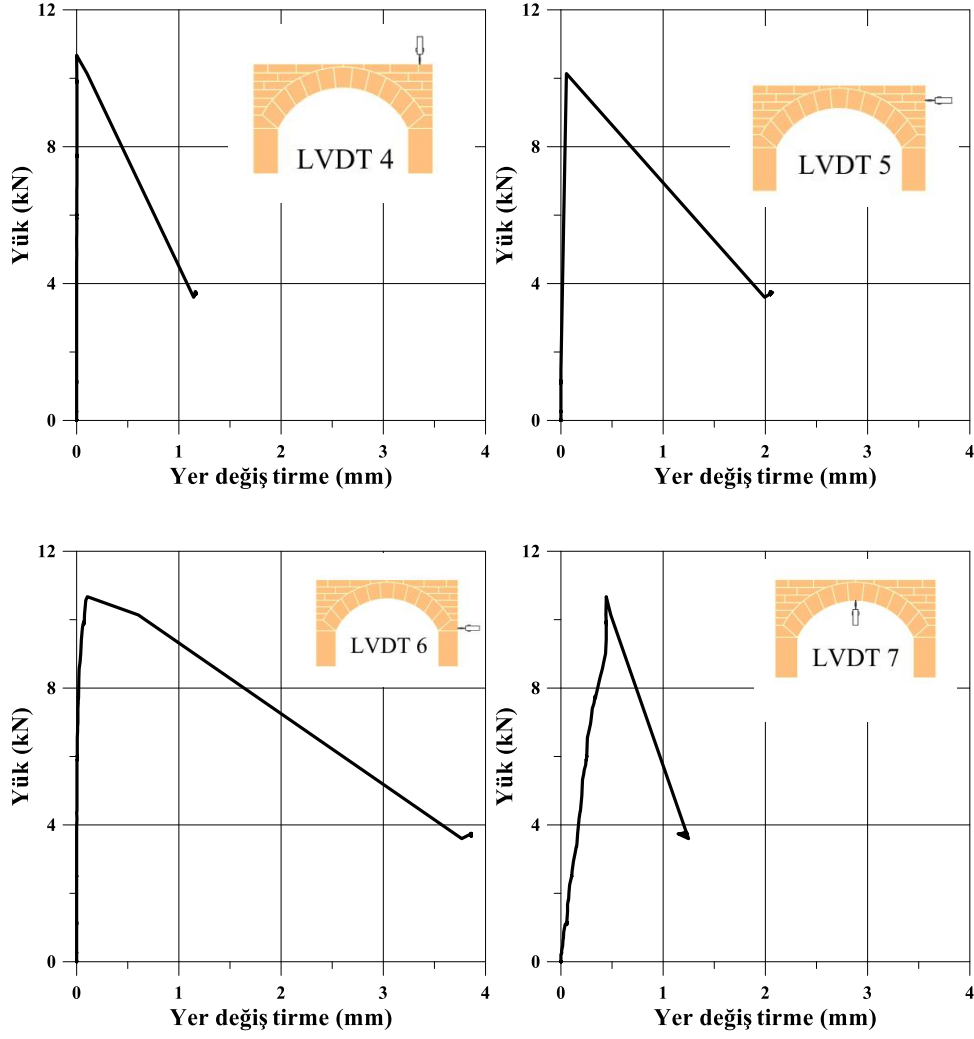


Şekil 4.18: Model 4’ün deney öncesindeki hali.

Kemer iç yüzeyindeki derzlerin epoksi esaslı harç ile güçlendirildiği Model 4’de kemer numunesinde ilk çatlaklar 3,59 kN’luk yükte kilit taşının solundaki ve sağ üzengi taşının üzerindeki derzde oluşmuştur. 3,59 kN’luk yükte başlayan çatlaklar artan yükte belirgin hale gelmiştir. Bu derzlerin epoksi uygulanan bölümünde çatlak ilerleyememiş ve epoksi esaslı harçtan daha düşük dayanımdaki taş üzerinde kırılma meydana gelmiştir (Şekil 4.19). Göçme anında yük 10,67 kN’ a çıktığı zaman yatay yer değiştirme 0,11 mm iken düşey yer değiştirme 0,44 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.20’ de Model 4’ e ait yük - yer değiştirme grafikleri yer almaktadır. Çok küçük değerlerde kalan LVDT’ lere ait grafikler çizilmemiştir.



Şekil 4.19: Model 4 yükleme sonrası hali.



şekil 4.20: Model 4'e ait yük- yer değiş tirme grafikleri.

4.7 Model 5

Tarihi yapılarda kemerlerin birbirlerine veya başka yapı elemanlarına bitişik olmaları nedeniyle kolon dış yüzeylerinin FRP ile güçlendirilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle Model 5 'te kemer numunesinin ön ve arka yüzeylerine mesnetlerden başlayarak yükseklik boyunca uzanan 50 mm genişliğinde FRP şerit uygulanmıştır. Aynı zamanda kemer iç yüzeyinde 100 mm genişliğinde FRP şerit ile güçlendirme yapılmıştır. şekil 4.21'de Model-5'in deney öncesi hali görölmektedir.

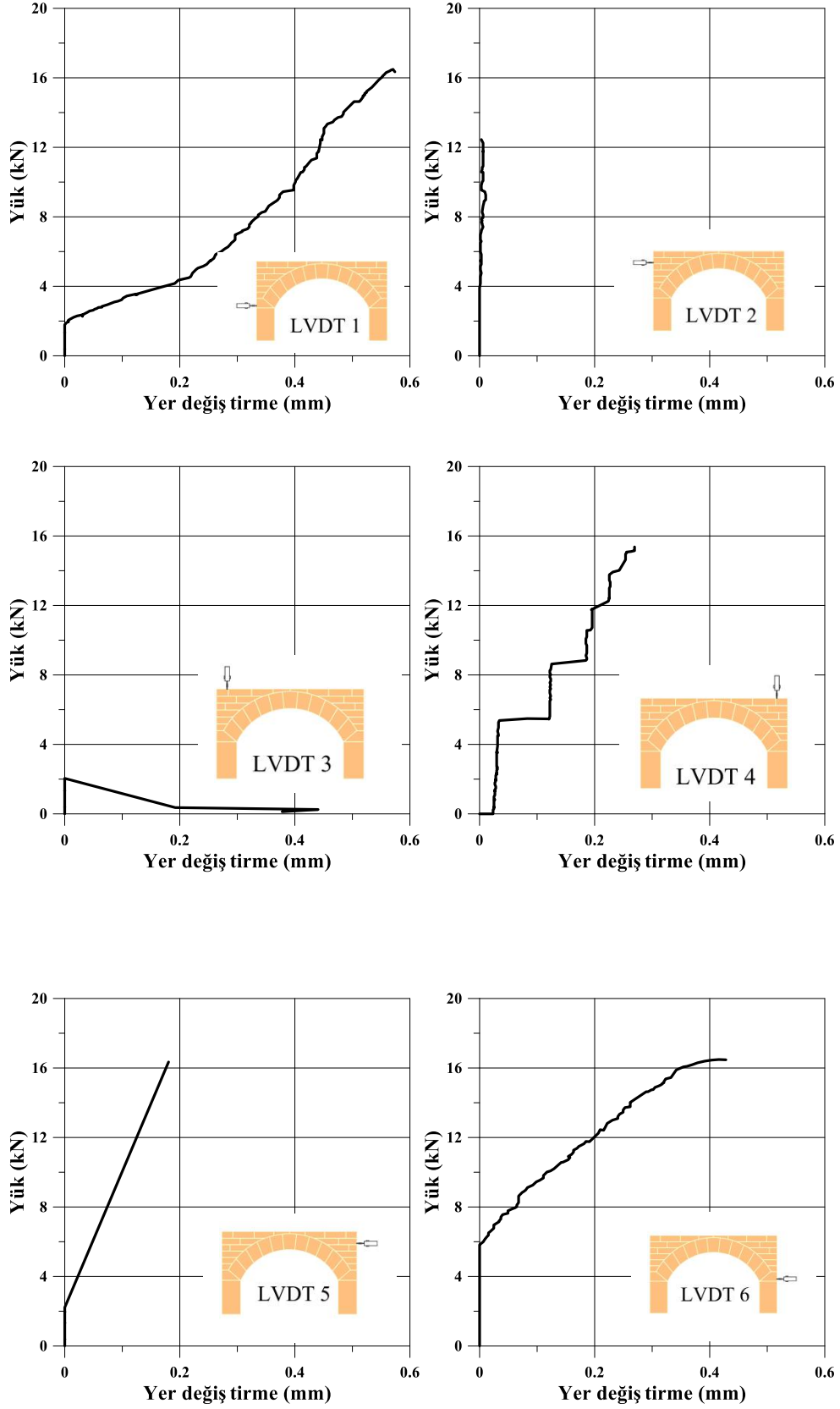


Şekil 4.21: Model 5'in deney öncesi hali.

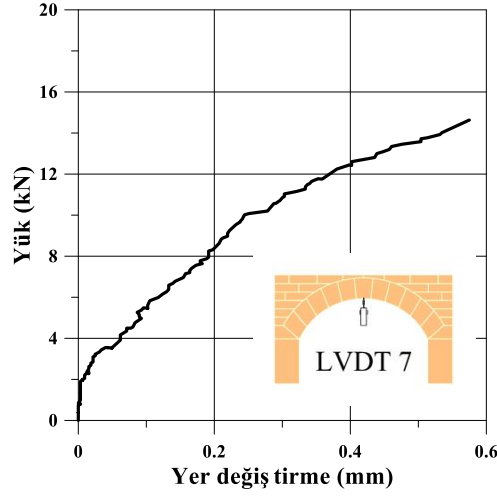
Model 5 kemer numunesinde ilk çatlaklar kilit taşının solundaki taşın düşey derzinde oluşmuştur. Yük arttıkça, çatlakların kilit taşının üzerindeki derzden sağa doğru ilerlediği ve numunenin üst kısmına kadar kesintisiz uzandığı görülmüştür. Yük 16,49 kN' a çıktığı zaman yatay yer değiştirme 0,99 mm iken düşey yer değiştirme 1,01 mm olarak ölçülmüş ve sistemde ani olarak göçme meydana gelmiştir. Model 5' in deney sonrası hali Şekil 4.22' de görülmektedir. Şekil 4.23' de Model 5' e ait yük - yer değiştirme grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.22: Model 5' in yükleme sonrası hali.



Şekil 4.23 : Model 5'e ait yük- yer değiş tirme grafikleri.



Şekil 4.23 (devam): Model 5'e ait yük- yer değişirme grafikleri.

4.8 Model 6

Model 6'da Model 2'ye ilave olarak ankraj uygulaması yapılmıştır. Model 2'de uygulanan güçlendirme tekniğinde FRP'nin yüzeyden sıyrıldığı gözlenmiştir. Bunu engellemek adına kemer iç ve yan yüzeylerine iki derz aralığında bir olacak şekilde 10 mm çapında ankraj delikleri açılmıştır. Ankrajlar, FRP'nin 8 mm çapında 50 mm uzunluğunda sonsuz dişli etrafına sarılmasıyla elde edilmiştir. Ankrajın uygulanacağı delikler ve FRP'nin uygulanacağı yüzey toz vb. malzemelerden temizlenmiştir. Temizlenen yüzeylere epoksi reçinesi sürölmüş ve FRP şeritler yapıştırılmıştır. 10 mm çapında açılan delikler epoksi ile doldurulduktan sonra hazırlanan ankrajlar yerleştirilmiştir. Uygulanan ankrajın delik dışında kalan kısmı dairesel olarak (fan) açılmış ve altta bulunan 50 mm'lik FRP şerit yüzeye yapıştırılmıştır. Ankraj uygulaması Şekil 4.24'de görölmektedir.



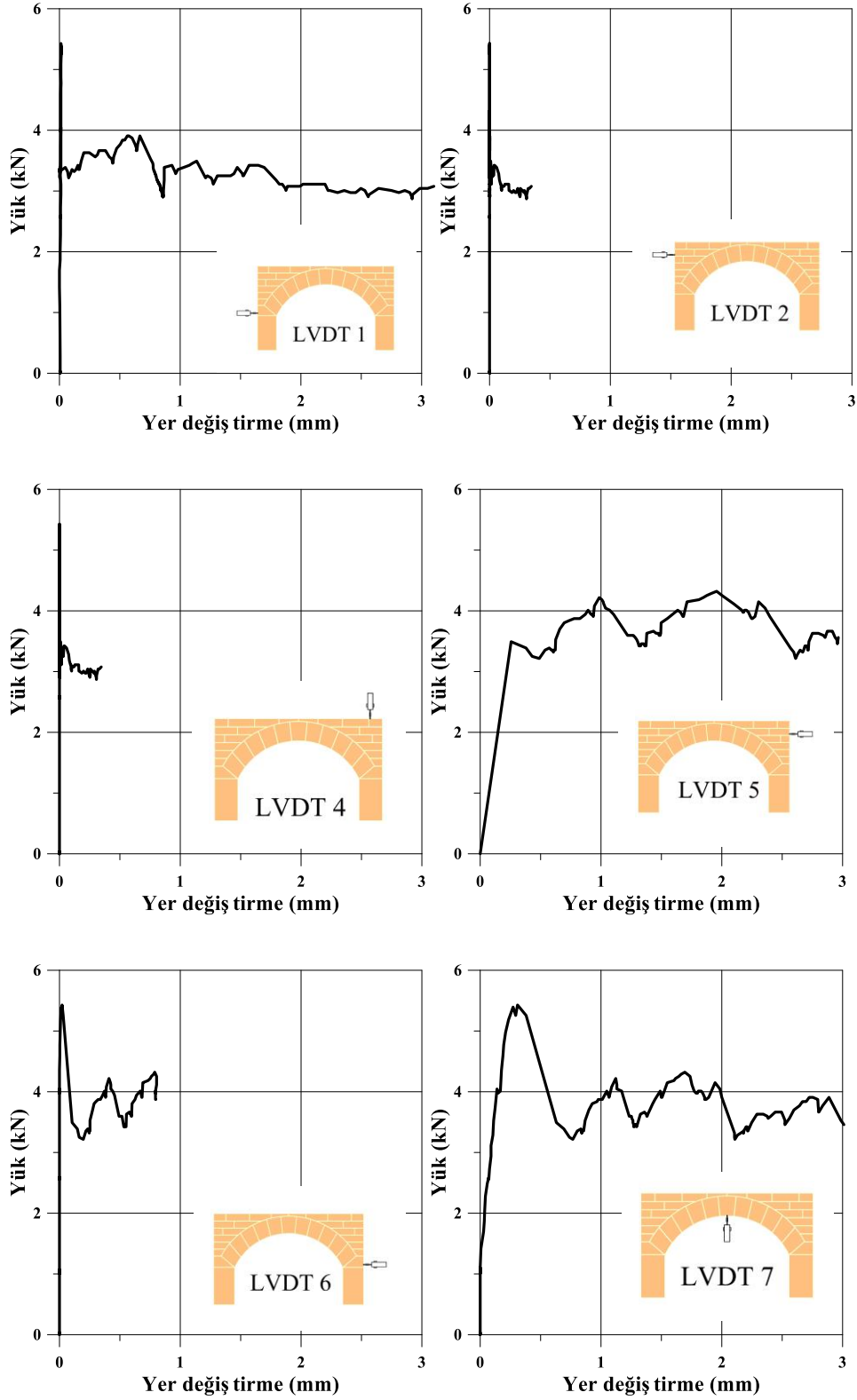
Şekil 4.24: Model 6 yükleme öncesi hali.

Model 6 'da ilk çatlaklar kilit taşının sağındaki taşın yatay ve düşey derzlerinde meydana gelmiştir. Sağ üzengi taşının kolon ayağı ile birleştiği derzde de çatlaklar gözlenmiştir. Yükleme artmasıyla beraber kilit taşının üzerindeki taşta ezilmeler meydana gelmiştir. Yükleme 6,23 kN' a çıktığı zaman yatay yer değiştirme 0,034 mm iken düşey yer değiştirme 0,39 mm ölçülmüştür. Maksimum taşıma yüküne ulaşan kemer numunesinin sağ kolonu, mesnetlenme bölgesinin iç tarafında meydana gelen çekme gerilmelerinden dolayı ayrılmıştır. Aynı zamanda kilit taşının sağındaki taşın yatay ve düşey derzlerinde çatlaklar büyümüş bu çatlakların artması ile kemer düşey olarak yer değiştirme yapmış ve nihayetinde bu bölgedeki FRP ayrılarak göçme

meydana gelmiştir. Model 6' nın yükleme sonrası hali Şekil 4.25' de görülmektedir. Şekil 4.26' da Model 6' ya ait yük - yer değiştirme grafikleri yer almaktadır. Çok küçük değerlerde kalan LVDT' lere ait grafikler çizilmemiştir.



Şekil 4.25: Model 6 yükleme sonrası hali.



Şekil 4.26 : Model 6'ya ait yük- yer değiş tirme grafikleri.

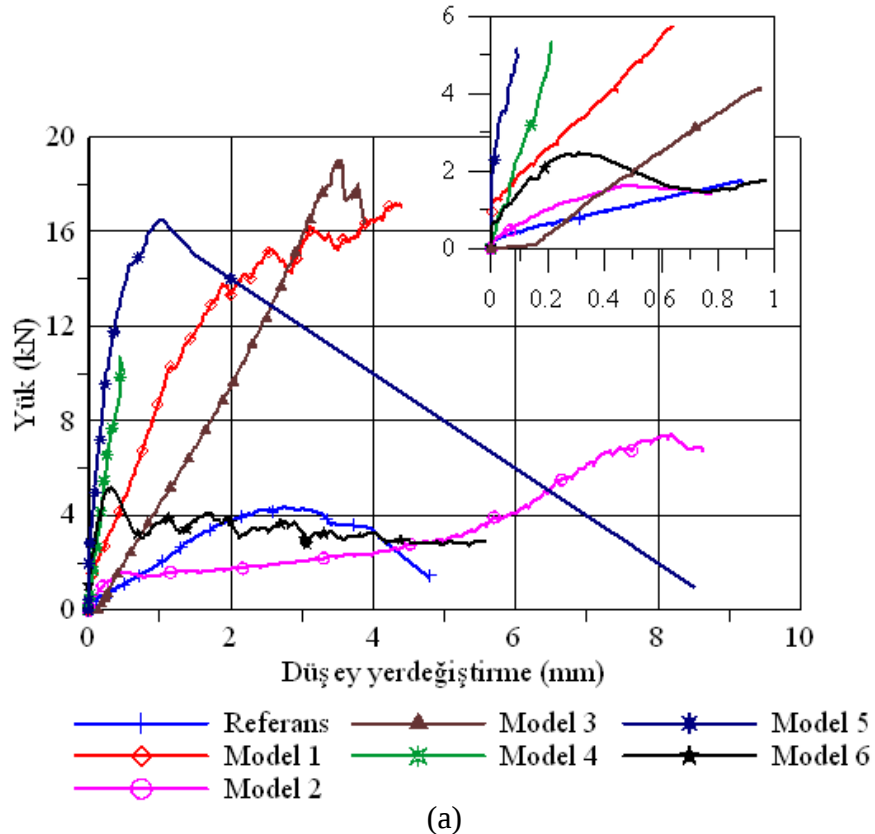
4.9 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

LVDT'ler bütün modellerde aynı bölgeye gelecek şekilde bağlanmıştır. Kemer numunelerinin orta noktasından düşey yönde yük uygulanmıştır. 7 numaralı LVDT'den düşey yer değiştirme değerleri okunmuştur. Kolon kemer birleşim bölgesine yerleştirilen LVDT1 ve LVDT 6'dan elde edilen değerlerin toplamıyla da yatay yer değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.3'de deneylerden elde edilen veriler gösterilmiştir. Yük-yer değiştirme grafikleri ise Şekil 4.27'de topluca verilmektedir.

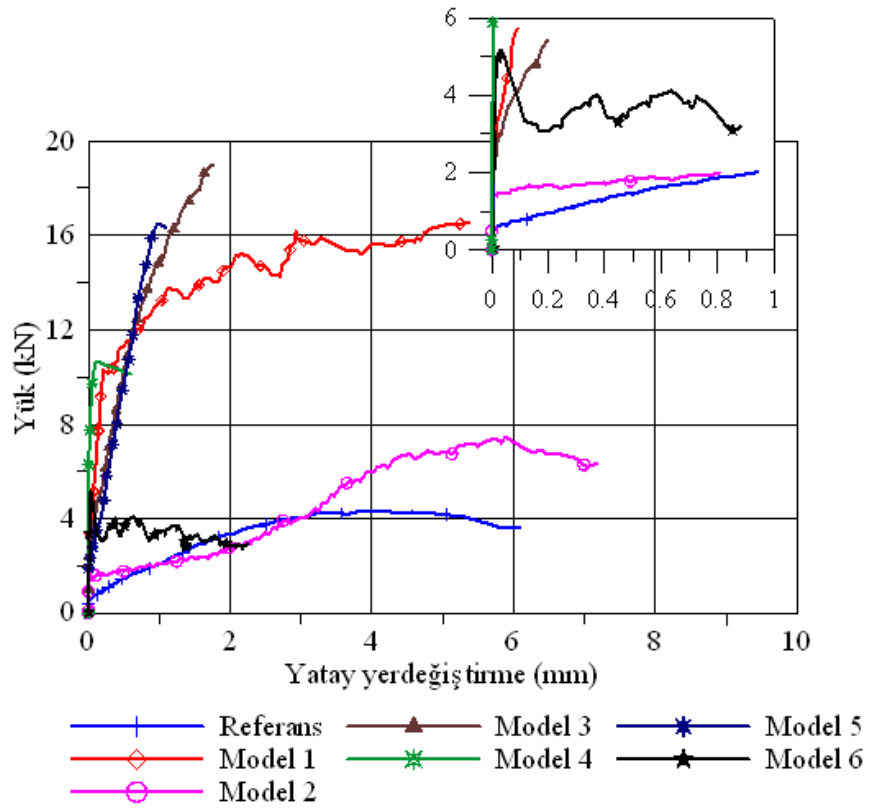
Çizelge 4.3: Deney sonuçları.

Modeller	Referans	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
P_{max} (kN)	4,35	17,16	7,44	18,95	10,67	16,49	5,43
Artış ^a (%)	0	294,4	71	335,6	145,2	279	24,83
Kilit taşındaki düşey yer değiştirme (mm)	2,73	4,31	9,08	3,53	0,44	1,01	0,39
Yatay yer değiştirme (mm)	3,93	5,83	5,66	1,71	0,11	0,99	0,034

^a Modellerin kontrol deney elemanına göre basınç dayanımlarındaki yüzdelik artış miktarı



Şekil 4.27: Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri.



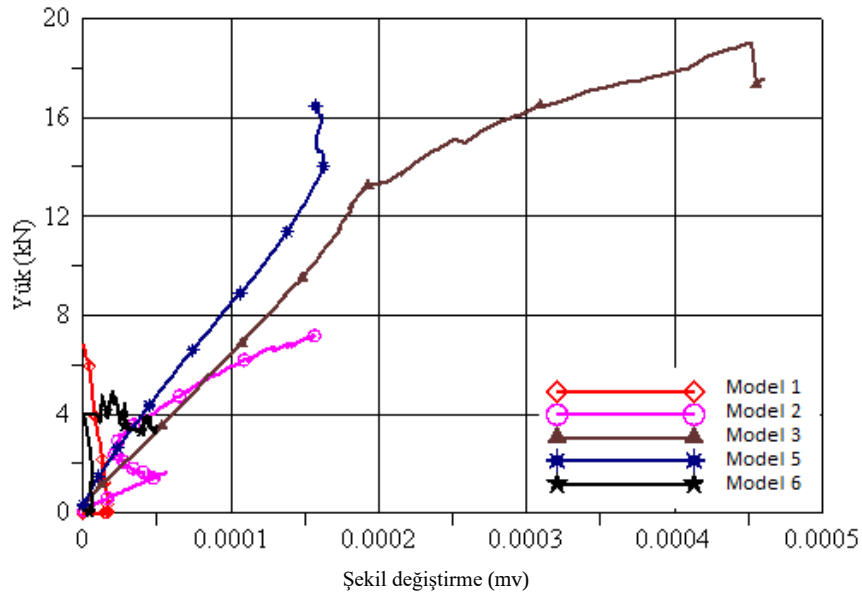
(b)

Şekil 4.27 (devam): Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri.

Gerek Çizelge 4.3 gerekse Şekil 4.27'den de görüleceği gibi maksimum yük taşıyan kemer numunesi Model 3'tür. Model 3'te Model 2'deki 50 mm genişliğindeki FRP şerit ile güçlendirmeye ilave olarak numune ön ve arka yüzeylerine 50 mm genişliğinde FRP şeritler diyagonal olarak uygulanmıştır. Model 3'ün göçme anında taşıdığı yük 18,95 kN' a çıktığı zaman yatay yer değiştirme 1,71 mm iken düşey yer değiştirme 3,53 mm olarak ölçülmüştür. Model 3'ten sonra en yüksek yükü taşıyan Model 1 üzerinde maksimum yük 17,16 kN' a ulaştığında göçme meydana gelmiş; bu anda yatay yer değiştirme 5,83 mm, düşey yer değiştirme 4,31 mm olarak ölçülmüştür. Göçme anında kemer iç yüzeyinde bulunan FRP şerit, kilit taşının altından ayrılmıştır. Kemer numunesinin ön ve arka yüzeylerine mesnetlerden başlayarak yükseklik boyunca uzanan 50 mm genişliğinde FRP şerit uygulanan Model 5 maksimum yük taşıyan üçüncü kemer numunesi olmuştur. Model 5'te, yük 16,49 kN' a çıktığı zaman sistemde ani olarak göçme meydana gelmiş, yatay yer değiştirme 0,99 mm iken düşey yer değiştirme 1,01 mm olarak ölçülmüştür. Tarihi yapıların görünümünü nispeten bozmayan sadece derzlerin epoksi harcı ile

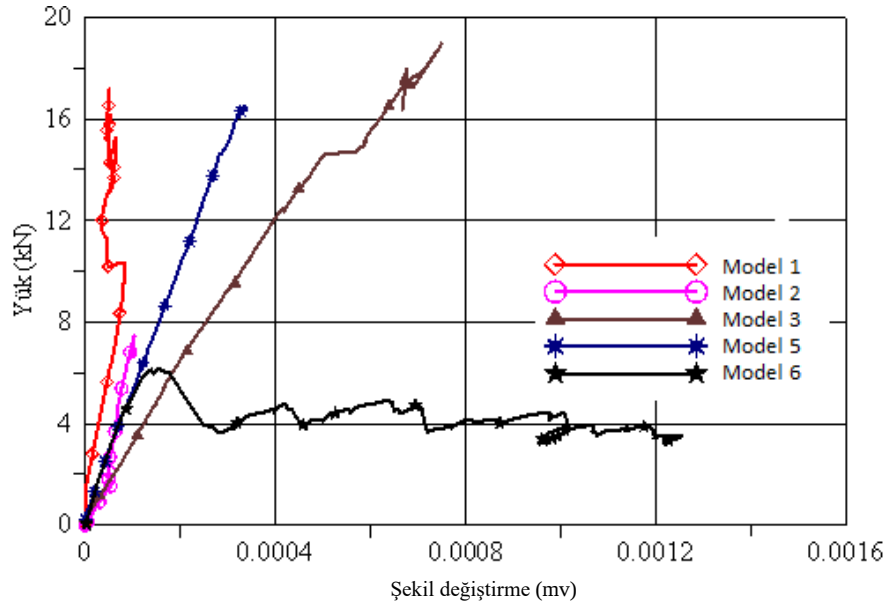
güçlendirilmesi tekniğinin incelendiği Model 4'te göçme anında yük 10,67 kN' a çıktığı zaman yatay yer değiştirme 0,11 mm iken düşey yer değiştirme 0,44 mm olarak ölçülmüştür. Model 2'de kemerin iç yüzeyinden 50 mm genişliğinde FRP şerit, kemer üzengi taşının 50 mm aşağısından başlayacak şekilde yapıştırılmıştır. Kemer kolonunun dış yüzeyi ise mesnetlerden kemerin üst noktasına kadar yine 50 mm lik FRP şerit ile güçlendirilmiştir. Model 2, yük 7,44 kN'a çıktığında kilit taşının altından FRP şerit ayrılarak göçme meydana gelmiştir. Bu esnada yatay yer değiştirme 5,66 mm iken düşey yer değiştirme 9,08 mm olarak ölçülmüştür. En düşük dayanımın elde edildiği Model 6'da Model 2'ye ilave olarak ankraj uygulaması yapılmıştır. Model 6, yük 6,23 kN' a çıktığı zaman yatay yer değiştirme 0,034 mm iken düşey yer değiştirme 0,39 mm ölçülmüştür.

Şekil 4.28'de modellerin sağ kolonuna yapıştırılmış FRP üzerinde, sol kolonuna yapıştırılmış FRP üzerinde ve kemer iç yüzeyine yapıştırılmış FRP üzerinde bulunan strain- gaugelerden elde edilen değerlerle kemere uygulanan düşey yüke karşılık gelen şekil değiştirmeleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

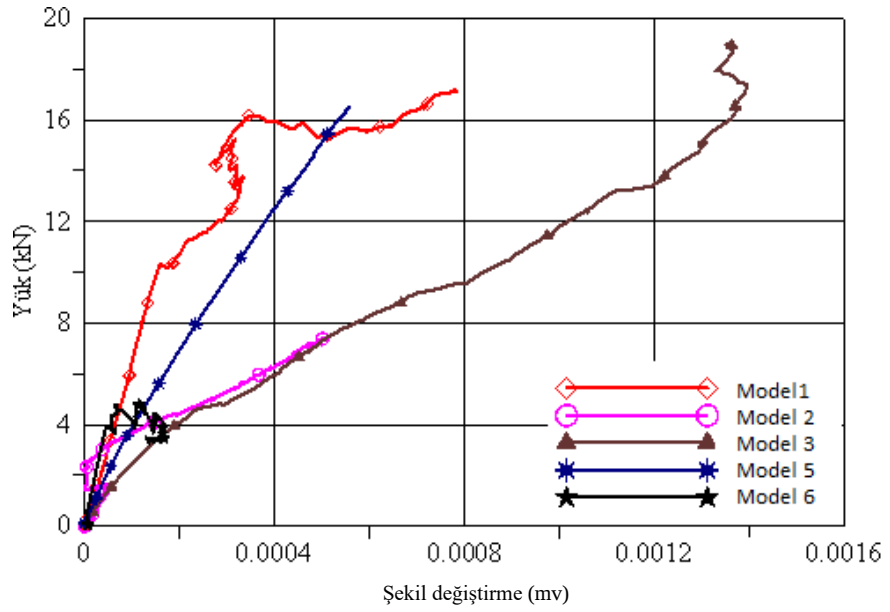


(a) Sağ kolona yapıştırılmış FRP üzerinde

Şekil 4.28: Düşey yük – şekil değiştirme grafikleri.



(b) Sol kolona yapıştırılmış FRP üzerinde



(c) Kemer iç yüzeyine yapıştırılmış FRP üzerinde

Şekil 4.28 (devam): Düşey yük – şekil değiştirme grafikleri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada, hasara uğrayan taş kemerli sistemlere farklı şekillerde güçlendirme uygulanmış, bu güçlendirme tekniğinin yapı davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Referans olarak imal edilen kemer numunesi herhangi bir güçlendirme yapılmadan göçme anına kadar düşey yüke maruz bırakılmıştır. Referans numune dışındaki 6 adet kemer numunesine belli oranlarda hasar verilmiştir. Hasara uğrayan kemer numunelerinin 5 tanesine güçlendirme tekniği olarak farklı ebatlardaki FRP şeritler uygulanmıştır. Kalan 1 adet modelin güçlendirilmesi ise derzlerin epoksi esaslı harç ile doldurulmasıyla yapılmıştır. Taş kemerler, güçlendirme tekniğinin yapılmasının ardından kemerin orta noktasından uygulanan düşey tekil yük altında test edilmiştir. Restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında bu çalışma iyi bir referans olabilecek ve konu üzerine yapılacak diğer bilimsel çalışmalara da ışık tutabilecektir. Çalışmadan neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Güçlendirilmiş modeller üzerine düşey yük uygulanarak yapılan deneyler sonucunda kemerin yük taşıma kapasitesi referans numuneye göre en az %24,83 oranında artmıştır.

Farklı güçlendirme teknikleri uygulanan kemer modelleri içerisinde en fazla taşıma kapasitesine sahip olan deney numunesi Model 3' tür. Model 3'te, Model 2' ye ilave olarak diyagonal şekilde ön ve arka yüzeye 50 mm FRP şeritler uygulanmıştır. Model 3' ün yük taşıma kapasitesinin referans numuneye göre %335,6 daha fazla olduğu görülmüştür.

100 mm genişliğindeki FRP şerit ile kemer iç yüzeyi ve kolonun güçlendirildiği Model 1, Model 3'ten sonra en fazla yük taşıyan kemer numunesi olmuştur. Model 1, Model 3'e göre daha düşük taşıma kapasitesine sahip olmasına rağmen daha yüksek yer değiştirme meydana gelmiştir. Bu açıdan Model 1'in de tercih edilebilen bir yöntem olduğu söylenebilir.

Model 2'in güçlendirilmesinde kullanılan FRP şeritler, Model 1'deki FRP şeritlerin yarısı genişliğinde olacak şekilde tasarlanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde Model 2'de yük taşıma kapasitesi 7,44 kN iken, Model 1'in taşıdığı yük 17,16 kN' a

ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre FRP şerit genişliğinin yük taşıma kapasitesini arttırdığı görülmüştür.

Model 4'te tarihi yapılar da görüntünün bozulmaması ve hızlı müdahale edilebilmesi için FRP ile güçlendirmeye alternatif olarak epoksi esaslı harç ile derzlerin doldurulması yöntemi uygulanmıştır. Yük taşıma kapasitesi referans numuneye oranla % 145,2 artmış, buna karşılık yer değiştirme değerleri oldukça düşük seviyelerde kalmıştır.

Tarihi binalar da genellikle kemerli sistemlerin ardı ardına sıralanması nedeniyle kolon dış yüzeylerine FRP uygulanmasında sorunlarla karşılaşılabilir. Bu nedenle Model 5' te kemer yüzeyine 100 mm FRP' ye ilave olarak 50 mm genişliğinde FRP şeritler n ve arka yüze ye kemer yüksekliğince yapıştırılarak deney gerçekleştirilmiştir. Sonuçta Model 5'in referans numuneye oranla yük taşıma kapasitesi % 279 artarken yer değiştirme değerleri düşük olduğundan ani kırılma meydana gelerek sistem göçmüştür.

Model 6'da Model 2' deki sisteme ilave olarak derzlere ankraj uygulanmıştır. Ankrajın sisteme ciddi bir katkısı olmamış, referans numuneye göre yük taşıma kapasitesini % 24,83 oranında arttırmıştır. Bunun sebebi ankraj için açılan deliklerin kemerin derzlerinde bulunan harca zarar vermesidir. Ankrajın derzlere değil de dayanımı harçtan daha fazla olan taş yüzeylere uygulanması başka bir çalışma konusu olarak belirlenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Aiello, M.A. ve Ombres, L., 2002. Structural performances of concrete beams with hybrid (fiber reinforced polymer-steel) reinforcements, *Journal of Composite for Construction* 6(2), 133–140.
- Altunışık, A.C., 2011. FRP Kompozitler ile Güçlendirilmiş Kagir Minarelerin Dinamik Tepkisi, Doğal Afetler ve Yer Bilimleri Sistemi, 11-7.
- Baratta, A. ve Corbi, O., 2007. Stress analysis of masonry vaults and static efficacy of FRP repairs, *International Journal of Solids and Structures*, 44(24), 8028-8056.
- Basílio, I., Oliveira, D. V., ve Lourenço, P. B., 2004. Optimal FRP strengthening of masonry arches.
- Bastianini, F., Rizzo, A., Galati, N., Deza, U., ve Nanni, A., 2005. Discontinuous Brillouin strain monitoring of small concrete bridges: comparison between near-to-surface and smart FRP fiber installation techniques, In *Smart Structures and Materials* (pp. 612-623), International Society for Optics and Photonics.
- Bayraktar, A., 2006. Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metodları, Beta Basım A. Ş. , İstanbul.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007. Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Bildiriler Kitabı*, 29-39.
- Birinci, F., 2010. Taş kemer köprülerin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Benedetti, D., Carydis, P. ve Pezzoli, P., 1998. Shaking Table Tests on 24 Simple Masonry Buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 67-90.
- Borri, A., Castori, G. ve Corradi, M., 2011. Intrados Strengthening of Brick Masonry Arches with Composite Materials, *Composites: Part B*, 42, 1164-1172.
- Caporale, A., Feo, L. ve Luciano, R., 2012. Limit Analysis of FRP Strengthened Masonry Arches via Nonlinear and Linear Programming, *Composites Part B: Engineering*, Cilt 43, No 2, 439-446.
- Cavicchi, A. ve Gambarotta, L., 2005. Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch–fill interaction, *Engineering Structures*, 27(4), 605-615.

- Çöğürçü, M.T., 2007. Yığma yapıların yatay derz güçlendirme yöntemiyle güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Dagher, H.J., Bannon, D.J., Davids, W.G., Lopez-Anido, R.A., Nagy, E. ve Goslin, K., 2012. Bending Behavior of Concrete-Filled Tubular FRP Arches for Bridge Structures, *Construction and Building Materials*, 37, 432-439.
- DBYBHY, 2007. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Diamanti, N., Giannopoulos, A. ve Forde, M. C., 2008. Numerical modelling and experimental verification of GPR to investigate ring separation in brick masonry arch bridges, *NDT & E International*, 41(5), 354-363.
- Döndüren, S.M., 2008. Bağlayıcı özelliği artırılan duvar ve sıva harcının düzlem dışı yüklenen tuğla duvarların mekaniksel davranışına etkisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Elmalich, D. ve Rabinovitch, O., 2009. Masonry and Monolithic Circular Arches Strengthened with Composite Materials – A Finite Element Model, *Computers and Structures*, 87, 521-533.
- Foraboschi, P., 2004. Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips, *Journal of Composites for Construction*, vol. 8, no. 3, pp. 191-202.
- Garmendia, L., San-Jose, J.T., Garcia, D. ve Larrinaga, P., 2011. Rehabilitation of Masonry Arches with Compatible Advanced Composite Material, *Construction and Building Materials*, 25, 4374-4385.
- Hradil, P., Žák, J., Novák, D. ve Lavický, M., 2001. Stochastic analysis of historical masonry structures, *Historical Construction Possibilities of Numerical and Experimental Techniques Proceedings of the 3rd International Seminar*, Guimarães, Portugal, 647-654.
- Kanıt, R. ve Işık, N.S., 2007. Tuğla kemerlerin deneysel davranışı ve bilgisayar modeli analizleri, *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara, 22, 1, 13-20.
- Kasapgil, M.E., 2007. Eski Eserlerde, Yığma Duvarların, Kubbelerin, Tonozların ve Temellerin Enjeksiyon Reçineleri ve Ankraj Sistemleriyle Güçlendirilmesi, *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1*, 215-218.
- De Lorenzis, L., Dimitri, R., ve La Tegola, A., 2007. Reduction of the lateral thrust of masonry arches and vaults with FRP composites, *Construction and Building Materials*, 21(7), 1415-1430.
- Mahrebel, H.A., 2006. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Mazılıgüney, I., 2006. Tarihi Bir Binada Deprem Güçlendirmesi Projelendirme Uygulaması (Kuleli Askeri Lisesi Örneği), Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ İnş. Müh. Böl., Ankara.
- Milani, G., Milani, E. ve Tralli, A., 2009. Upper bound limit analysis model for FRP-reinforced masonry curved structures, Part II: Structural analyses. Computers & Structures, 87(23), 1534-1558.
- Milani, G. ve Bucchini, A., 2010. Kinematic FE Homogenized Limit Analysis Model for Masonry Curved Structures Strengthened by Near Surface Mounted FRP Bars, Composite Structures, 93, 239-258.
- Ocak, S.G., 2009. Batı Anadolu Roma Dönemi örnekleriyle su kemerleri künkleri ve sarnıçları üzerine bir araştırma ve uygulama çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, İzmir.
- Oliveira, D. V., Basilio, I. ve Lourenço, P. B., 2010. Experimental behavior of FRP strengthened masonry arches, Journal of Composites for Construction.
- Orhan, S.N., 2010. Tek açıklıklı dairesel kagir kemer köprülerin göçme yüklerinin limit analiz yöntemleri ile hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Örmecioğlu, H., T., 2010. Tarihi Yapıların Yapısal Güçlendirilmesinde Ana İlkeler ve Yaklaşımlar, Politeknik Dergisi, 13, 3, 233-237.
- Peker, K., 2003. Tarihi Yapıların Yapısal Analizinde Performans Tabanlı Yaklaşımlar ve Bir Örnek Çalışma, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Schultz, A.E., Hutchinson, R.S ve Cheok, G.C., 1998. Seismic Performance of Masonry Walls With Bed Joint Reinforcement, Structural Engineers World Congress, T119-4 , 1-7.
- Sesigür, H., Çelik, O. C. ve Çılı, F., 2005. Esnek Döşemeli Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi İzmit Sultan Abdülaziz Av Köşkü Örneği, Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- Sesigür, H., Çelik, O.C. ve Çılı F., 2007. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Bileşenler, Hasar Biçimleri, Onarım ve Güçlendirme, İMO İstanbul Bülten, sayı: 89, sayfa: 10-21.
- Shrive, N. G., 2006. The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of masonry, Construction and Building Materials, 20(4), 269-277.
- Tuğruelelçi, Ş., 2014. Düşey Yüklenen Tuğla Kemerlerdeki Gergi Çubukların Davranışa Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Tao, Y., Stratford, T.J. ve Chen, J.F., 2011. Behavior of A Masonry Arch Bridge Repair Using Fibre-Reinforced Polymer Composites, Engineering Structures, 33, 1594-1606.

- Toker, S. ve Ünay, A. İ., 2004. Kemerli Taş Köprülerin Matematiksel Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, GÜ Fen Bilimleri Dergisi, 2(17), 129-139.
- TS EN 771-6, 2007. Kâgir birimler-özellikleri-bölüm 6: Doğal taş kâgir birimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-1, 2012. Kâgir birimler-deney yöntemleri-bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-6, 2004. Kâgir birimler-deney metodları-bölüm 6: Beton kâgir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-11, 2000. Kâgir harcı-deney metodları-bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ural, A. ve Firat, F.K., 2014. Evaluation of Masonry Minarets Collapsed by a Strong Wind Under Uncertainty, Natural Hazards, DOI 10.1007/s11069-014-1531-7.
- URL-1 <<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6259/20/19.pdf>> , alındığı tarih: 20.04.2015.
- URL-2<https://wiki.bath.ac.uk/download/attachments/74949791/MSDS_Sikadur%20330.pdf> , alındığı tarih: 20.04.2015.
- URL3<<http://www.totalwarturkiye.com/twforum/index.php?topic=28391.0>>,alındığı tarih: 21.04.2015.
- URL-4<<http://imeryapi.com.tr/wp-content/uploads/CONCRESLVE1406.pdf>, alındığı tarih: 21.04.2015.
- Uslu, S., 2013. Tarihi yığma yapılarda kullanılan metal bağlantı elemanlarının deneysel metodlarla incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, ASÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Valluzzi, M., Valdemarca M. ve Modena, C., 2001. Behavior of Brick Masonry Vaults Strengthened by FRP Laminates, Journal of Composites for Construction, vol. 5, pp.163–169.
- Yaldız, E., Yavuz, G. ve Yılmaz, S.Ü., 2011. Tarihi Taş Yığma Konutların Güçlendirilmesinde Kullanılan Yöntemler, New World Sciences Academy, 6, 4, 1033-1052.
- Yapı- Endüstri Merkezi A. Ş., (2007). Yapı Dergisi, 303, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Derya KOÇ

Doğum Tarihi ve Yeri: 15.07.1980 BAKIRKÖY

E-posta adresi : derya.koc@icisleri.gov.tr

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat
Mühendisliği, 2002

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat
Mühendisliği, 2015

