

TARİHİ YIĞMA YAPILARDAKİ HASARLI KEMERLER ÜZERİNDE FRP ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Fatih Kürşat FIRAT¹, Ahmet EREN²

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray

²Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Zonguldak

fkfirat@gmail.com, ahmeteren65@gmail.com

(Geliş/Received: 24.02.2015; Kabul/Accepted: 29.06.2015)

ÖZET

Bu çalışmada hasar verilmiş kemerlere uygulanan değişik FRP ile güçlendirme teknikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yedi adet kemer numunesi, pres tuğla ve tarihi yapılardaki harca benzer kireç esaslı düşük dayanımlı harç kullanılarak imal edilmiştir. Yeterli dayanıma ulaşan (28 gün dayanımı) kemerlerden, referans olarak adlandırılan numune göçme anına kadar yüklenmiş, diğer numunelere de belli oranda hasar verilmiştir. Sonra farklı boyutlardaki FRP şeritleri, ankraj uygulamaları ve derz dolgu tekniğini içeren altı farklı güçlendirme tekniği altı kemer numunesi üzerinde teste tabi tutulmuştur. Güçlendirme tekniği uygulanan hasar verilmiş kemer numuneler, ticari bir yapısal analiz programı kullanılarak nümerik olarak modellenmiş ve deneysel sonuçlarla nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, güçlendirilmemiş referans numunesine oranla güçlendirilmiş kemer numunesi kapasitesinin en az %58 arttığını ve aynı zamanda kemer derzlerinin yalnızca epoksi reçinesi ile güçlendirilmesinin hasar görmüş tuğla kemer kapasitesini artırmada etkili bir alternatif olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yığma kemerler, tarihi yapılar, hasar, LUSAS programı, FRP

INVESTIGATION OF FRP EFFECTS ON DAMAGED ARCHES IN HISTORICAL MASONRY STRUCTURES

ABSTRACT

The present paper deals with experimental behavior of deformed brick masonry arches strengthened with the fiber reinforced polymer (FRP). Seven arches were fabricated using commercial clay brick and low strength lime-based mortar, trying to mimic historical structures. After reaching sufficient strength (28 day strength), one arch called reference specimen is tested under the ultimate load and other arches are given damage to a certain extent. Then six different strengthening arrangements, including different dimensions of FRP strips, spike anchors and joint grouting are implemented on six arches damaged. The numerical modeling of damaged masonry arches strengthened with FRP is performed using a commercially available structural analysis program and the numerical results are compared with the experimental ones. The experimental results show that the capacity of damaged masonry arch strengthened increases at least 58% in comparison with unstrengthened masonry arches and strengthening of joints with epoxy resin is an effective alternative to increase the damaged masonry arch capacity.

Keywords: Masonry arches, Historical structures, Damage, LUSAS software, FRP

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarihi yapılara süreç içerisinde etki eden doğal afetler, savaşlar vb. nedenlerden meydana gelen tahribatlar ve yapım aşamasında kullanılan malzemelerin zamanla bozulmaya başlaması mevcut yapının yıkılmasına veya kullanılmamasına neden olmaktadır. Yapıların

geleceğe devredilmesi için sabit, hareketli deprem ve rüzgar yüklerine karşı yapı taşıyıcı sistemlerinin güçlendirilmesi ve bu yüklerin incelenmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır [1-6]. Önemli kültürel değere sahip tarihi yapıların, bu yükler altında zamanla kaybolan performanslarını geri kazandıracak uygun onarım/güçlendirme tekniklerini

de uygulamak gerekmektedir. Bu teknikler arasında FRP (Fiber Reinforced Polymer) ile yapının güçlendirilmesi son zamanlarda ön plana çıkmaktadır [7-9]. Elmalich ve Rabinovitch [10] çalışmalarında kompozit malzemelerle güçlendirilmiş kemerler için bir sonlu elemanlar modeli meydana getirmişlerdir. Milani ve Bucchi [11] FRP şeritler ile güçlendirilmiş kemer, kubbe gibi eğrisel tuğla yapı elemanlarının göçme mekanizması belirlemek için bir sonlu elemanlar modeli ortaya koymuşlardır. Garmendia vd. [12] taş kemerlerin onarım ve güçlendirilmesi için bazalt tekstil malzemesi kullanarak farklı güçlendirme yöntemi önermişlerdir. Tao vd. [13] FRP ile güçlendirilmiş bir taş kemer köprü modeli davranışını değerlendirmişlerdir. Caporale vd. [14] yaptıkları çalışmada FRP ile güçlendirilmiş değişik özelliklerdeki kemerlerin taşıma gücünü incelemişlerdir. Dagher vd. [15] yaptıkları çalışmada kemer formunun etrafına FRP sarılmış yapı elemanının analitik bir modeli ile deney sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Hasara uğramış kemer formları üzerinde çok fazla çalışmaya rastlanılmamış olup yeni nesil malzemelerle yapılan onarım/güçlendirme seçeneklerinin, yapı orijinalliğini mümkün olan derecede bozmaması ve yapının taşıyıcı sistemini arzu edilen doğrultuda güçlendirmesi gerekmektedir. Bu seçeneklerin yapıya ilave yük getirmemesi ve yapı elemanlarının birlikte çalışmasını sağlaması gerekmektedir.

Tarihi yapılar çelik ile güçlendirilebilmekle birlikte bu uygulama tarihi yapının orijinalliğini olumsuz olarak etkilemektedir. Normalde bu çalışmada ele alınacak olan FRP ile güçlendirme tekniği de yapının orijinalliğini bozabilmekte görünüş açısından bir takım problemleri de beraber getirebilmektedir. Fakat tarihi yapıların birçoğunda süsleme sanatı olan kalem işi süslemeler, hat sanatı ve çini sanatı uygulanmaktadır. Bu anlamda FRP üzerine sıva yapılabilmekte, tarihi dokuya uygun süsleme sanatları yeniden uygulanabilmektedir. Bunun yanında özellikle yapının görünmeyen kısımlarında FRP sıva yapılmadan da bırakılabilir. Ayrıca birçok ülkede gerek bürokratik sorunlar gerek ekonomik nedenlerden dolayı tarihi yapıların güçlendirilmesi ileriki bir tarihe ertelenebilmektedir. Bu durumda



gerçek bir restorasyona başlamak için geçecek sürede yapının daha fazla hasar görmemesi hatta yıkılmaması için sonradan kaldırılmak koşulu ile FRP uygulamaları yapılabilir. FRP yapı malzemesinin en önemli avantajı, yapı boyutlarını neredeyse değiştirmeden klasik yöntemlerle elde edilen dayanımdan çok daha fazla bir dayanım sağlamasıdır. İlâveten, çelikten çok daha güçlü ve hafiftir ayrıca paslanma problemi yoktur. Bu nedenlerle bazı yapıların güçlendirilmesinde değişik tipte FRP uygulamalarına rastlanmaktadır. Şekil 1'de tarihi yapılarda FRP uygulamasına ilişkin bazı örnekler sunulmaktadır.

Bu çalışmanın amacı yapısal hasara uğramış tarihi yapılardaki kemerlerin değişik FRP uygulama biçimleri ile çeşitli şekillerde güçlendirilmesi sonucunda düşey yüklemeye altında en iyi sistem dayanımının elde edilmesinin araştırılmasıdır. Basınç etkisi altında hasara uğramış kemerler üzerine yapılan bu çalışmada yeni nesil malzeme olan FRP ve epoksi harcı ile güçlendirilen kemerler deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışma, onarım ve güçlendirme çalışmalarında kullanılan FRP uygulamasının ne şekilde yapılması konusunda önemli bir yol gösterici olacak ve kemer formlarında benzeri çalışmaya rastlanamaması nedeniyle büyük bir eksikliği giderecektir.

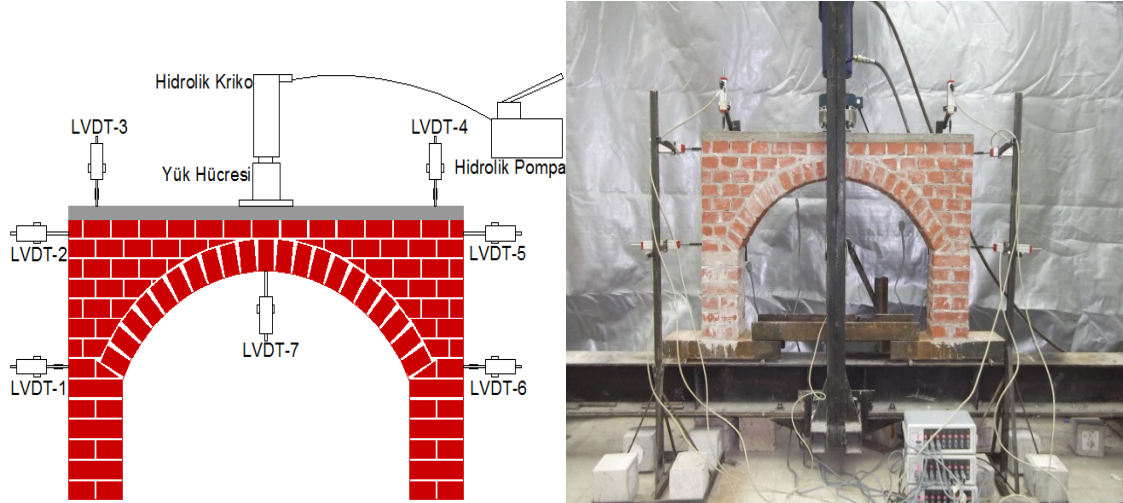
2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1 Deney ve Ölçüm Düzenegi (The Test Set-Up and Instrumentation)

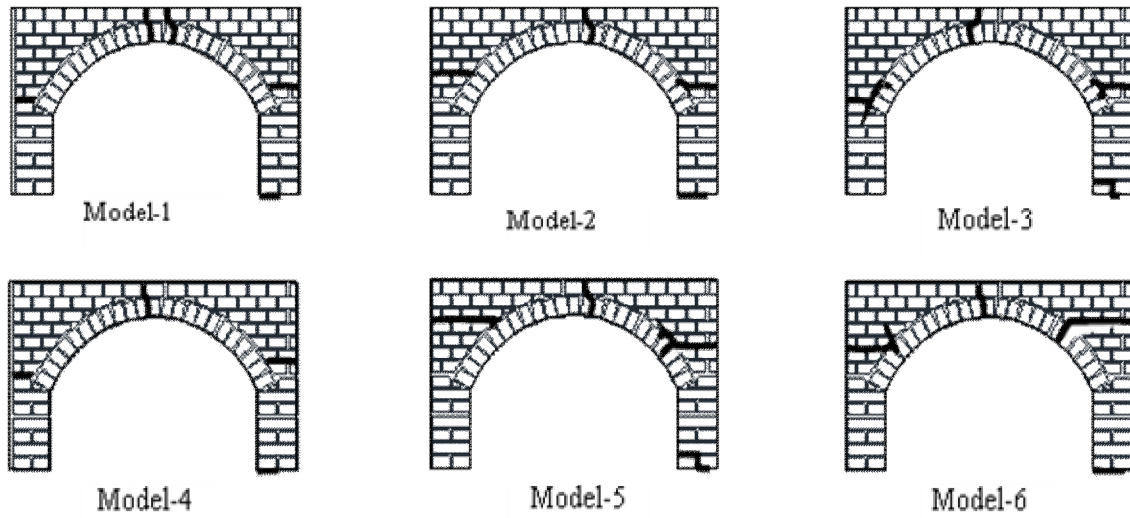
Manuel kontrollü hidrolik pompa yardımıyla 500 kN kapasiteye sahip hidrolik krika ile yapılan yüklemeye 500 kN kapasiteli yük hücresiyle ölçülmüştür. Kemerlerde yüklemeye ile meydana gelecek yatay ve düşey deplasman miktarları bütün deneylerde aynı geometrik bölgeye yerleştirilen 7 adet LVDT (Linear Variable Differential Transformer) yardımıyla ölçülmüştür. Deplasmanları ölçebilmek amacıyla kullanılan LVDT yerleşimi ve deney düzenegi Şekil 2'de görülmektedir. Düşey deplasmanları ölçebilmek için kilit taşı hizasına LVDT-7, sütunlarda meydana gelen düşey deplasmanları ölçebilmek için ise LVDT-3 ve LVDT-4 yerleştirilmiştir. Yatay deplasmanları ölçebilmek için üzüngü taşı hizasına LVDT-1 ve



Şekil 1. Tarihi yapılarda FRP uygulamaları (FRP applications on historical structures) [16]



Şekil 2. Deney düzeneği (Experimental set-up and instrumentation)



Şekil 3. Hasar verilmiş numune çatlakları (Crack types on damaged arches)

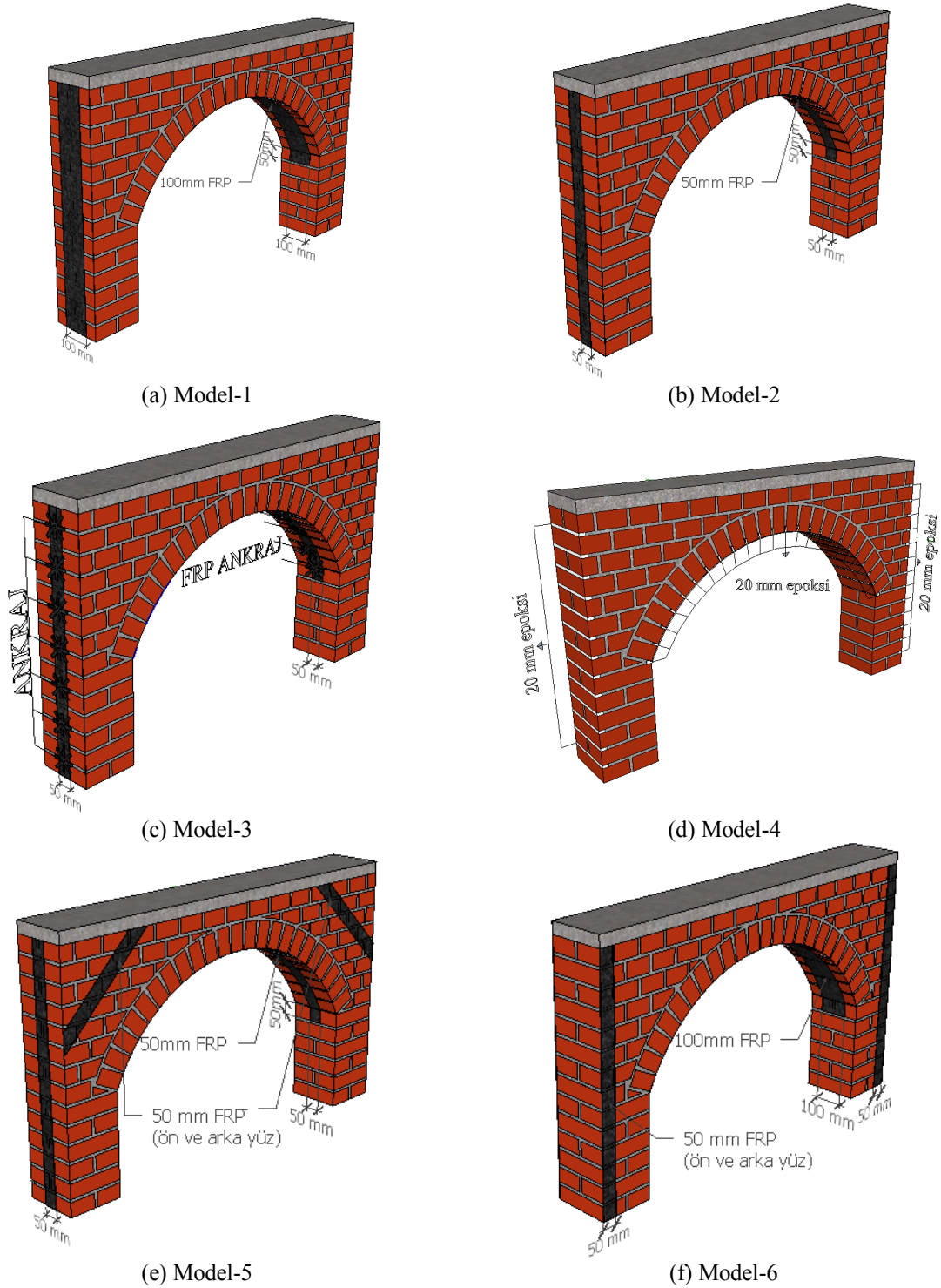
LVDT-6, kemer üst kısmına ise LVDT-2 ve LVDT-5 yerleştirilmiştir. Ayrıca farklı yerlere yerleştirilen 120 Ohm direnci ve 10 mm boyunda olan şekil değiştirme ölçerler (strain gauge) deformasyon ölçümü için kullanılmıştır.

2.2 Deney Numuneleri (The Test Specimens)

Deneysel çalışmaları yapmak üzere toplamda 7 adet kemer örülmüştür. $190 \times 190 \times 50 \text{ mm}^3$ pres tuğla yığma birimlerinden oluşan kemer açıklığı 1020 mm olacak şekilde üretilmiştir. Kilit taşının alt seviyesine kadar olan net yüksekliği 670 mm olan kemer numunesinin toplam yüksekliği 820 mm'dir. Düşey tekil kuvvet etkisine maruz kalacak üst sıradaki yığma birimlerin zarar görmemesi için 40 mm kalınlığında donatılı beton uygulaması yapılmıştır. Üretildikten sonra 28 gün bekletilen kemer numuneleri deney

düzenine yerleştirilmiş kontrol numunesi kırılma yükünün % 75'ine denk gelen düşey yük (9,24 kN) altında deney numunelerinde belirli oranda çatlaklar verilmiştir. Aynı yükte aynı çatlaklar meydana gelmemiş ve numuneler göçme anına kadar yüklenmediğinden dolayı numunelerin taşıma kapasitesinden çok meydana gelen çatlaklar dikkate alınmıştır. Yük uygulanırken meydana gelen çatlaklar Şekil 3'te gösterilmiştir.

Bu şekilden görüldüğü üzere her bir numune için elde edilen çatlak formları birbirine çok yakındır. Bu çalışmada incelenen epoksi ve FRP güçlendirme uygulamaları Şekil 4'te gösterilmiştir. Her modelde farklı şekilde kullanılan FRP boyutları ve uygulama biçimi ileride ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Bu FRP uygulamaları daha önceden hasar verilmiş kemer numuneleri üzerinde yapılmıştır.



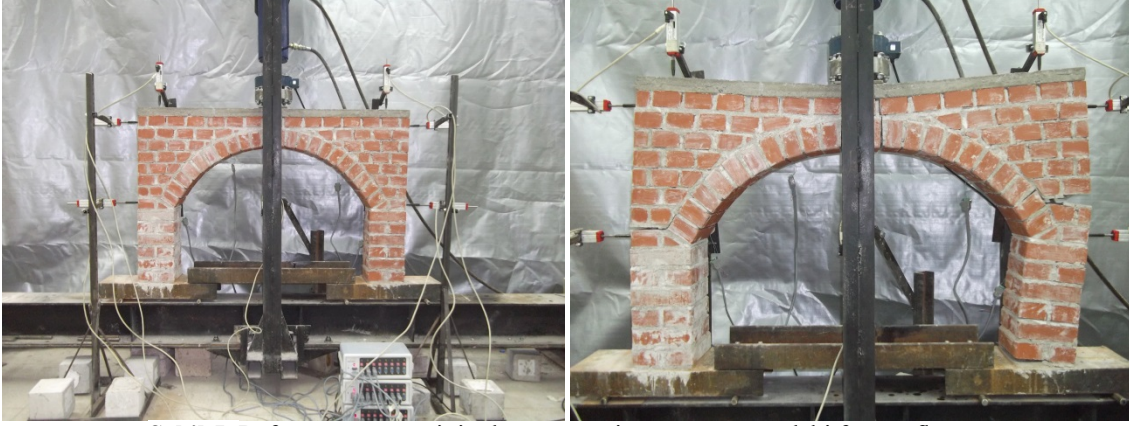
Şekil 4. Değişik tipteki epoksi ve FRP güçlendirme uygulamaları
(The different types of epoxy and FRP strengthening applications)

İlk olarak bir adet referans numune örülmüş ve bu numuneye herhangi bir FRP uygulaması yapılmadan kemer deneye tabi tutulmuştur. Bu aşamada kemerin taşıyacağı yük ve ortaya çıkan şekil değiştirmeler referans olarak kabul edilmiştir. Referans numunesine yapılan yüklemde 8 kN yük düzeyinden itibaren yatay derzlerde, mesnetlerde ve kilit taşı düşey derzlerinde açılmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Toplamda 12,32 kN yük taşıyan referans numunesinin

deney öncesi ve geçmeden sonraki durumu Şekil 5’de verilmiştir. Referans olarak yapılan deney numunesi haricindeki kemerler belirli yük düzeyine kadar yapısal hasara maruz bırakıldıktan sonra 5 tanesi farklı şekillerdeki FRP uygulamaları, 1 tanesi ise derzlere epoksi harcı uygulaması ile güçlendirilmiştir. Model-1’de hasar verilmiş kemerin FRP uygulaması yapılacak yüzeyleri temizlenerek epoksi reçinesi sürülmüştür. Kemer iç yüzeyinde üzengi taşından 50

mm altından başlanarak 100 mm kalınlığında FRP şerit ve numune yan yüzey boyunca mesnetlerden kemer üst noktasına kadar 100 mm kalınlığında FRP şerit uygulaması yapılmıştır. Referans numunesinin 4 katı kadar yük taşıyan Model-1'de ani kırılma meydana gelmiştir (Şekil 6). Referans numunede meydana gelen üzengi taşı hizasındaki yatay derz çatlaklarının yerine yine derz aralıklarını takip eden diyagonal çatlaklar meydana gelmiştir. Kemerin iç yüzeyindeki FRP'nin kilit taşı hizasında yüzeyden

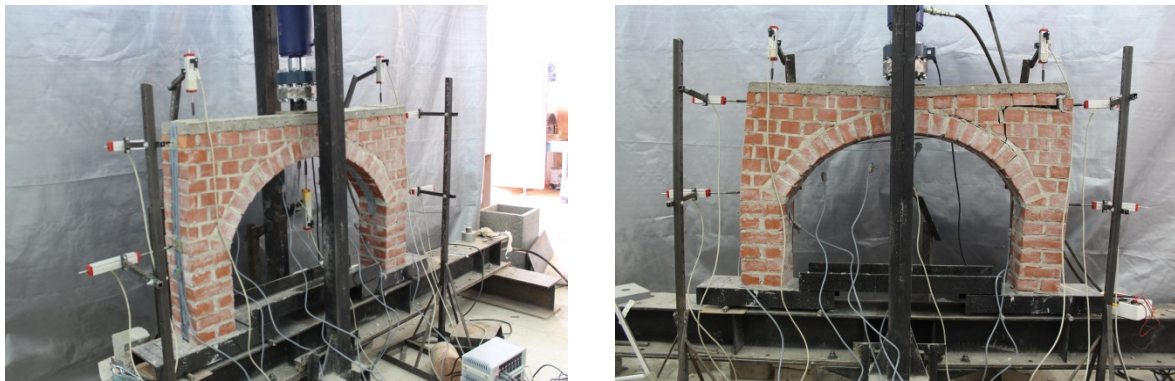
ayrılmaya başladığı görülmüştür. Model-2'de, Model-1'dekine benzer olarak FRP şerit kalınlığı etkisini incelemek için FRP şerit kalınlığı 50 mm'ye düşürülmüştür. (Şekil 7). Yükleme aşamasında 13 kN yük mertebesinde kemer iç yüzeyindeki FRP'nin yine kilit taşı hizasından yüzeyden ayrılmaya başladığı gözlenmiştir. 31,50 kN yükte ise sağ ve solda bulunan yan yüzeylerdeki FRP'nin şerit kalınlığının yetersiz olması nedeniyle yüzeyden açılmaya başladığı görülmüştür. Model-2'de, Model-1'deki gibi ani



Şekil 5. Referans numunesinin deney öncesi ve göçme anındaki fotoğrafları
(The photo of reference specimen and failure mechanism developed)



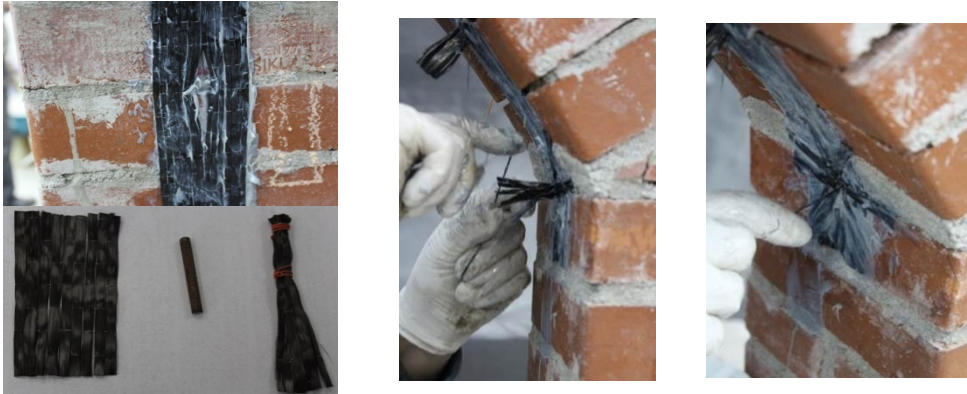
Şekil 6. Model-1 numunesinin deney öncesi ve göçme anındaki fotoğrafları
(The photo of Model-1 specimen and failure mechanism developed)



Şekil 7. Model-2 numunesinin deney öncesi ve göçme anındaki fotoğrafları
(The photo of Model -2 specimen and failure mechanism developed)

kırılma gerçekleşmiştir. Model-1 ve Model-2' de yapılan deneysel çalışmalar, FRP'nin yüzeyden sıyırılması ile sistemin yük taşımadığını göstermiştir. Model-3'te FRP'nin yüzeyden ayrılmasını önlemek amacıyla Model-2'deki benzer uygulama yeniden yapılmış ilaveten 50 mm kalınlığındaki FRP şerit uygulanacak kemer iç ve yan yüzeylerine iki derz aralığında bir olacak şekilde 10 mm çapında ankraj delikleri açılmıştır. 8 mm çapında 50 mm uzunluğunda sonsuz dişli etrafına FRP sarılarak ankrajlar elde edilmiştir (Şekil 8). Derzlere açılan delikler ve FRP uygulanacak olan yüzey toz vb. malzemelerden temizlendikten sonra FRP'nin yapıştırılacağı yüzeye epoksi reçinesi sürülmüştür. Bu yüzeye FRP yapıştırılmış deliklerin üzerine denk gelen yerlerdeki FRP delinerek içerisi epoksi reçinesi ile doldurulmuş ardından daha önce hazırlanmış ankrajlar yerleştirilmiştir. 50 mm delik uzunluğunun

dışında kalan sadece FRP'den oluşan ankraj bölümü dairesel olarak (fan) açılmış FRP şerit yüzeyine yapıştırılmıştır (Şekil 8). Ankraj uygulaması yapılan Model-3'te, kemerin sol kısmında kemer yayı üst hizasındaki derzlerden başlayarak gelişen çatlaklar harcin tuğlalardan ayrılarak kilit taşı hizasına kadar ulaşmıştır. Ayrıca kemerin sol üst kısmından kemer yayına doğru çatlak gelişimi yanında sol mesnet iç kısmında harçta ezilmeler ani kırılma sonucunda görülmüştür. Model- 3'te yapılan ankraj uygulaması ile FRP'nin yüzeyden sıyrılmadığı gözlenmiştir (Şekil 9). FRP uygulanan numunelerden farklı olarak görünümünü bozmayacak bir tasarım olarak düşünülen Model-4'te kemer iç yüzeyi ve sütun yan yüzeylerinden yükseklik boyunca derzleri 20 mm boşaltılmıştır. Boşaltılan derzler toz ve parçalardan temizlenmiş, iki bileşenli epoksi (Concresive 1406) ile doldurulmuştur (Şekil 10).



Şekil 8. Model-3 numunesine yapılan ankraj uygulamaları (The spike anchors on Model-3 specimen)



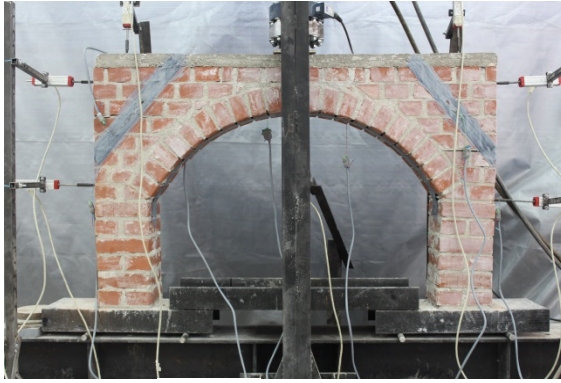
Şekil 9. Model-3 numunesinin deney öncesi ve göçme anındaki fotoğrafları
(The photo of Model-3 specimen and failure mechanism developed)



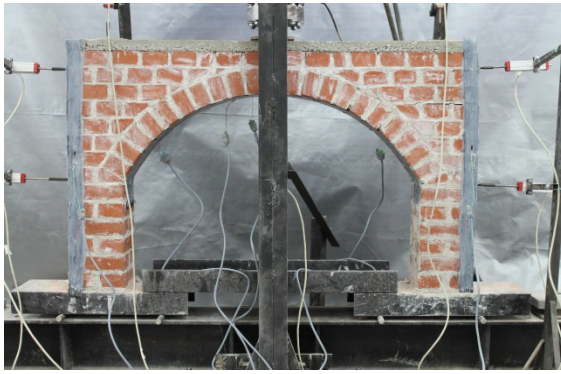
Şekil 10. Derzlerin epoksi harcı ile doldurulması (The filling of epoxy resin in joints)



Şekil 11. Model-4 numunesi göçme anı hasarları (The failure mechanism of Model-4)



Şekil 12. Model-5 numunesinin deney öncesi ve göçme anındaki fotoğrafları
(The photo of Model-5 specimen and failure mechanism developed)



Şekil 13. Model-6 numunesinin deney öncesi ve göçme anındaki fotoğrafları (The photo of Model-6 specimen and failure mechanism developed)

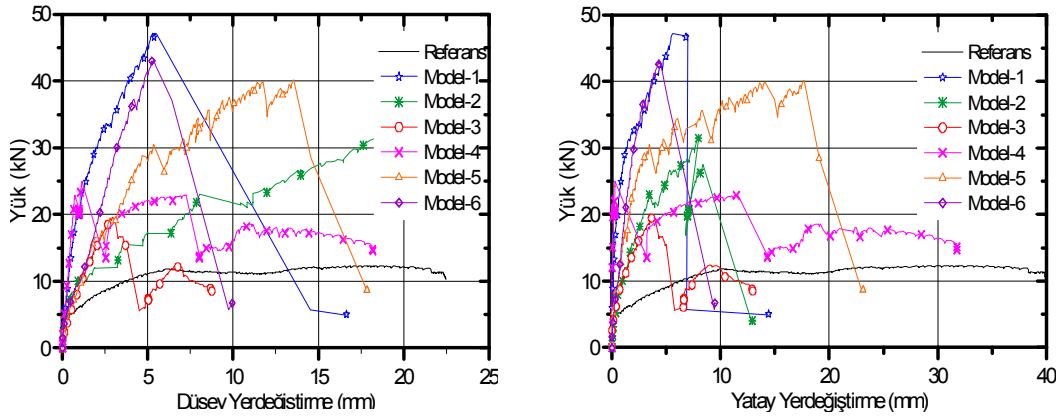
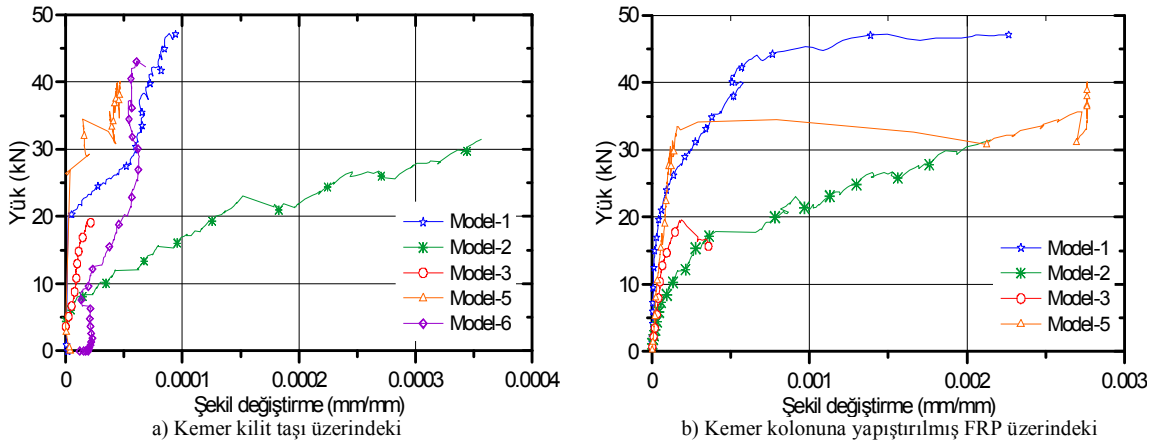
Model-4'e uygulanan yüklemde 20 kN yük düzeyinde duvarın sol üst kısmından çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yüklemeye devam edildiğinde ise 24,95 kN yükünde sistemde ani kırılma gerçekleştiği, sol üstten kemer yayına doğru derz ayrılmalarının olduğu ve sol mesnet birleşim yerinden ayrılma olduğu gözlenmiştir. Yük 13,5 kN yük mertebesine düşmesine rağmen yüklemeye biraz daha devam edilmiş 22,94 kN yük mertebesinde kilit taşında ayrılma ile sağ mesnette açılma görülmüş bunun yanında üzengi taşı iç kısmında tuğlada çatlak gelişimi, dış kısmında ise yatay derzde ayrılma meydana gelmiştir. Yapılan yüklemde epoksi harcının olduğu bölgelerin dayanımı arttırdığı

gözlenmiştir. Derzlerden açılmaları imkanı vermeyen epoksi harcı nedeniyle yığma birimlerde ezilmeler görülmüştür (Şekil 11). Model-2'deki FRP uygulaması olan kemer iç yüzeyinden ve sütun yan yüzeylerinden 50 mm şerit FRP'ye ilave olarak kemer ön ve arka yüzeylerinden diyalagonal olacak şekilde 50 mm şerit FRP uygulaması yapılarak Model-5 numunesi üretilmiştir. Yerleştirilen diyalagonal FRP şeritler ile diyalagonal çatlakları önleyerek kemerin daha fazla yük taşıyacağı öngörülmüştür. Diğer numunelerde göçme anında meydana gelen diyalagonal çatlakların oluşmasına engel olunmuş Şekil 12'de verilen göçme şekli elde edilmiştir. Ayrıca diğer numunelerde görülmeyen bir kırılma şekli

Tablo 1. Deney sonuçları (Test results)

Modeller	Referans	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4	Model-5	Model-6
P_{max} (kN)	12,32	47,18	31,49	19,53	24,95	40,11	43,11
Artış ^a (%)	100	382,9	255,6	158,5	202,5	325,5	349,9
Kilit taşındaki düşey yerdeğiştirme (mm)	17,41	5,29	18,34	2,96	1,14	13,51	5,32
Yatay yerdeğiştirme (mm)	30,05	5,61	7,98	3,81	0,30	17,62	4,33
Sütunlardaki düşey yer değiştirme (mm)	13,11	0,18	1,01	0,03	-0,43	0,49	-0,32

^aReferans numuneye göre maksimum yük taşıma kapasitesindeki yüzdelik artış miktarı

**Şekil 14.** Yük-düşey ve yatay deplasman grafikleri (Vertical load versus vertical and horizontal displacements)**Şekil 15.** Düşey yük-şekil değiştirme grafikleri (Vertical load versus strain graphs)

gerçekleşmiş sol yan yüzeye duvar yüksekliği boyunca uygulanan FRP'nin üzengi taşı hizasında koptuğu gözlenmiştir. Birçok yapı tek bir kemer sisteminden meydana gelmediğinden dolayı kemer yan yüzeylerine FRP yapıştırmak imkansız görünmektedir. Bu nedenle Model-6'da kemer eğrisi iç yüzeyi boyunca 100 mm ve deneysel çalışmalarda özellikle sütun üzengi taşına meydana gelen derz açılmalarının önüne geçebilmek amacıyla ön-arka yüzeyinden yükseklik boyunca 50 mm FRP şerit kemer ön yüzüne yapıştırılmıştır. Model-6'da yapılan yüklemde 15 kN yük düzeyinde kilit taşı üstünde yatay derzde çatlak gelişimi meydana gelmiş 32 kN yük mertebesinde çatlaklar tuğlalarda hasar

oluşturmaya başlamıştır. 18 kN yük mertebesinde, FRP yüzeyden sıyrılmaya kilit taşının sağ tarafından kemer eğrisi hizasında başlamıştır. 43,11 kN yükte duvarın sol tarafından kemer yayına doğru oluşan çatlak ile sol iç tarafta FRP yüzeyden tuğla parçası koparak ayrılmış ani kırılma meydana gelmiştir (Şekil 13).

2.3 Deney Sonuçları (Main Test Results)

Deneyler kilit taşı hizasından düşey yük uygulanarak yapılmıştır. Tablo 1'de maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirme değerleri verilmiştir. Düşey yer değiştirme değeri için kemer kilit taşı alt

hizasına yerleştirilen LVDT-7'den alınan değerler kullanılmıştır. Sütunlarda meydana yer değiştirmeler için kemer üstündeki beton bloğun sağ ve sol uçlarına yerleştirilen LVDT-3 ve LVDT-4'ten elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Yatay deplasman için ise düşey yük altında en fazla yanal deplasman yapacağı tahmin edilen kritik bölge olan üzengi taşı hizasında deney numunesi yan yüzlerine yerleştirilen LVDT-1 ve LVDT-6'dan elde edilen değerlerin toplamı alınmıştır. Ayrıca yukarıda yerleri verilen LVDT'lerden deney süreci boyunca elde edilen okumalara dayalı yük-deplasman grafikleri Şekil 14'de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre herhangi bir güçlendirme yapılmamış referans numunesinin yük taşıma kapasitesi 12,32 kN olarak ölçülmüşken, en fazla düşey yükü 47,18 kN ile Model-1 taşımıştır. Şekil 14'te referans dışındaki numunelerde yüklenme neticesinde ani kırılmalar sonucu grafiklerde ani düşüşler görülmektedir. Model-1'de maksimum yükteki düşey yer değiştirme değeri 5,61 mm olarak ölçülmüştür. Kemer üzerine yerleştirilmiş şekil değiştirme ölçerlerden okunan deformasyon ölçümlerine göre Model-1 de kilit taşından alınan ölçümler referans numuneye göre oldukça düşüktür. Model-1 ile aynı FRP uygulama biçiminde olan yalnız şerit kalınlığının 100 mm yerine 50 mm olarak tasarlandığı Model-2'de maksimum taşıma kapasitesi 31,49 kN iken oluşan düşey yer değiştirme miktarı 18,34 mm'dir. Ankraj uygulaması yapılarak FRP uygulanan Model-3'te yük taşıma kapasitesi 19,53 kN ölçülmüş iken bu yükte oluşan düşey deplasman miktarı 2,96 mm kadardır. Kemer görünümünde bir değişikliğe neden olmaması için derzlerinin 20 mm boşaltılıp epoksi esaslı harç ile doldurulduğu uygulama olan Model-4'ün maksimum yük taşıma kapasitesi 24,95 kN dur. Aynı zamanda Model-4 numunesi için elde edilen düşey ve yatay yer değiştirme değerleri, yapılan deneyler arasındaki en küçük değerlerdir. Model 5'in maksimum yük taşıma miktarı 40,11 kN iken bu değerdeki düşey yer değiştirme miktarı 13,51 mm'dir. Model-6 maksimum düşey yük taşıma kapasitesi 43,11 kN dur. Model-3 ile davranış açısından benzerlik gösteren Model-6'da yatay ve düşey yer değiştirme miktarları nispeten fazladır. Kemer kilit taşı bölgesi olarak adlandırılabilir tuğla üzerine yapıştırılan ve kemer kolonu üzerine yapıştırılan FRP üzerindeki şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen okumalar Şekil 15'de gösterilmiştir.

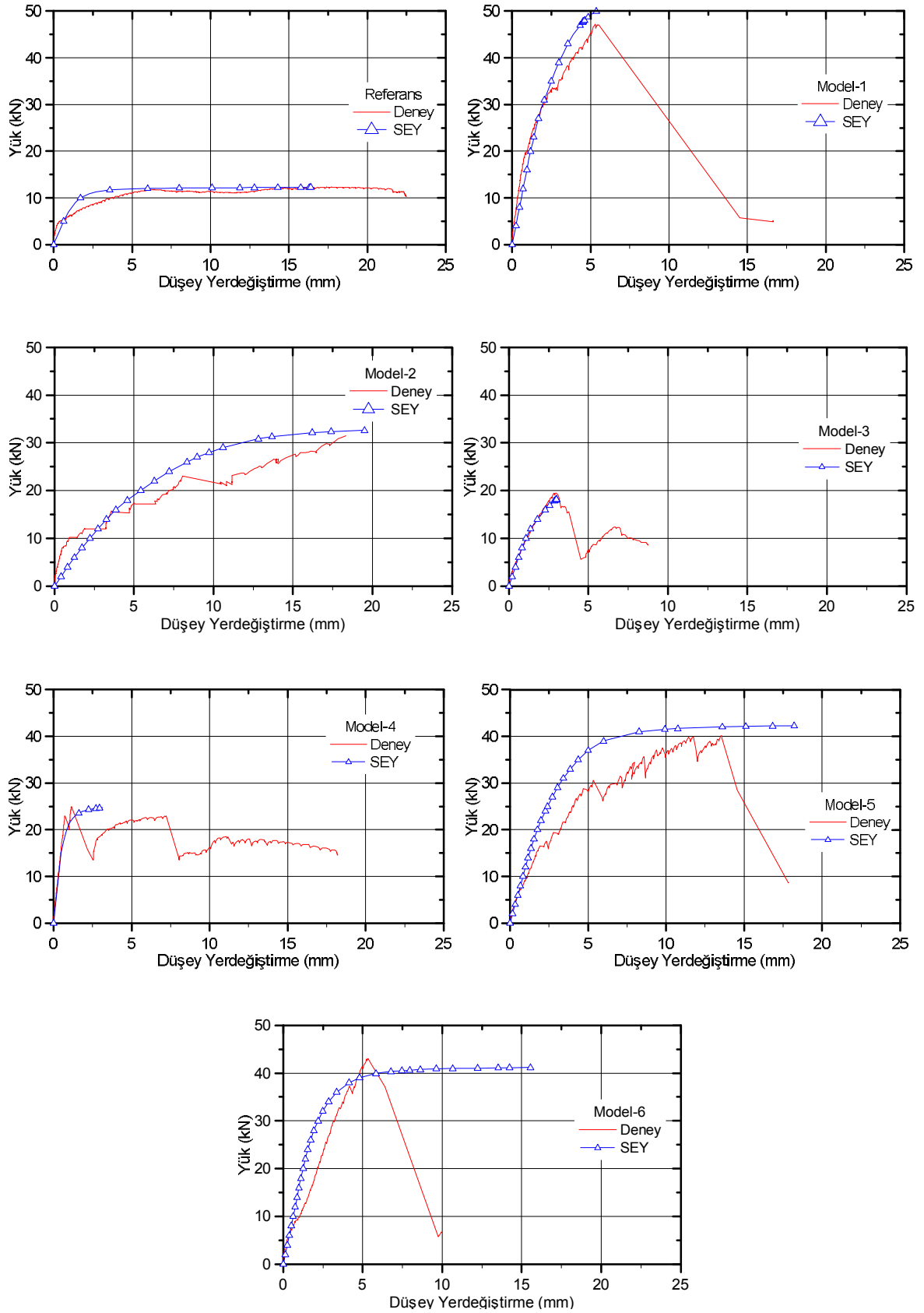
3. SAYISAL ANALİZ (NUMERICAL ANALYSIS)

Deneysel çalışmalardan elde edilen grafikler incelendiğinde yüklenme neticesinde deney elemanları doğrusal olmayan davranış sergilemişlerdir. Bu nedenle modelleme yapılırken sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak malzemelerin nonlineer özellikleri dikkate alınmıştır. Yığıma yapılarda modelleme 3 farklı teknik üzerinden yapılır. Bunlar;

Detaylı Mikro Modelleme, Basitleştirilmiş Mikro Modelleme ve Makro Modelleme teknikleridir [17]. Bu çalışmada modellemeler makro modelleme tekniklerine göre deney elemanları yığıma birim ve harç homojen olarak tek bir eleman olarak LUSAS [18] yapısal analiz programında modellenmiştir. Modellemelerde malzemelerin özellikleri olarak Tablo 2'deki lineer ve lineer olmayan özellikler alınarak tasarım yapılmıştır. Nonlineer davranışta Drucker-Prager kriteri esas alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda kemer kilit taşı bölgesinin alt noktasından alınan gerek Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) değerleri gerekse deneysel çalışmadan elde edilen değerler kullanılarak oluşturulan grafikler incelendiğinde (Şekil 16) davranışların birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Malzeme özellikleri
(Properties of Materials) [19-22]

Malzeme	Özellikler	Değerler
Beton	Elastisite modülü (MPa)	28500
	Poisson oranı	0,2
	Kohezyon (MPa)	3
	İçsel sürtünme açısı	33
	Çekmede kohezyon eğimi	0,0
	Sürtünme geriliminin eğimi	0,0
Pres Tuğla	Elastisite modülü (MPa)	3743
	Poisson oranı	0,2
	Kohezyon (MPa)	2,5
	İçsel sürtünme açısı	25
	Çekmede kohezyon eğimi	0,0
	Sürtünme geriliminin eğimi	0,0
CFRP Sikawrap 230-C (tek doğrultulu)	Birim ağırlık (g/m ²)	230±10
	Lif yoğunluğu (g/cm ³)	1,76
	Kalınlık (mm)	0,131
	Çekme dayanımı (MPa)	4300
	Elastisite modülü (MPa)	234000
	Nihai çekme şekil değiştirmesi	0,018
Epoksi reçinesi Sikadur 330	Nihai çekme dayanımı (MPa)	12500
	Elastisite modülü (MPa)	3800
	Nihai çekme şekil değiştirmesi	0,009



Şekil 16. Sonlu elemanlar analizi ve deneysel sonuçların yük-düşey yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması (The comparison of the graphs obtained by FEM and experiments)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada hasara uğramış kemerlerin farklı şekillerde güçlendirilerek düşey yük altında davranışları incelenmiştir. Biri referans numune olmak üzere 6 numune belirli yük düzeyinde hasara uğratıldıktan sonra farklı FRP uygulamaları ile güçlendirilmiştir. İlaveten herhangi bir FRP uygulaması olmadan yalnızca derzlerin epoksi harcı ile doldurulması ile farklı bir uygulama türü denenmiştir. Deneysel olarak elde edilen davranışlar ile eşdeğer bilgisayar modellerinden elde edilen davranışların birbirine yakın çıktığı tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Kemer kilit taşı hizasından düşey yük uygulanarak yapılan deneyler sonucunda referans numuneye göre yapılan güçlendirme uygulamalarıyla kemerin yük taşıma kapasitesi en az %58,5 artmıştır. FRP'nin farklı şekillerde uygulanması ile oluşturulan modellerden en fazla yük taşıma kapasitesine sahip olan Model-1'dir. Model-1'de FRP şerit kalınlığının Model-2'de kullanılan şerit kalınlığının iki katı olması yük taşıma kapasitesini yaklaşık %50 oranında arttırmıştır. Model-3'deki uygulama, Model-2'deki uygulamanın ankrajlı hali olmasına karşılık yük taşıma kapasitesinde artış gözlenmemiştir. Bunun nedeni ankraj uygulaması yapılması için derzlerde açılan deliklerin derz içerisindeki harca zarar vermesidir. Ankraj uygulamasının derzlerden ziyade yığıma birimlere yapılması çok daha emniyetli sonuçlar verecektir. Model-2'deki FRP uygulama şekline ilave olarak diyagonal biçimde ön ve arka yüzeye FRP uygulaması yapılan Model-5, birbiri ile kıyaslandığında diyagonal FRP'nin yük taşıma kapasitesini Model-2'ye göre yaklaşık % 27 arttırdığı görülmüştür. Bunun yanında Model-5'te düşey deplasman miktarı Model-2'ye göre azalırken; yatay deplasman miktarında % 100 artmıştır. Ayrıca yüklemeye neticesinde Model-5'te yan yüzeyde kopma görülen FRP'de şerit kalınlığının artırılarak yük taşıma kapasitesinde daha yüksek değerler elde edilebilir. Tarihi yapılarda yapının görünüşünde herhangi bir farklılığa neden olmayacak çözüm yöntemi olarak düşünülen Model-4'deki derzlerin epoksi reçinesi ile doldurulması uygulama olarak nispeten ucuz ve pratiktir. Derzlerin epoksi ile doldurulması modeli maksimum yük taşıma kapasitesi olarak diğer üç model kadar yük taşımasa da referans numuneye göre 202,5% daha fazla yük taşımıştır. Bunun yanında diğer modellere göre yatay ve düşey deplasmanların en az olduğu tasarımdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Mendes, N. ve Lourenço, P.B., "Sensitivity Analysis of the Seismic Performance of Existing Masonry Buildings", **Engineering Structures**, Cilt 80, 137-146, 2014.
2. Ural, A. ve Fırat, F.K., "Evaluation of Masonry Collapsed by a Strong Wind under Uncertainty", **Natural Hazards**, Cilt 76, No 2, 999-1018, 2015.
3. Soyluk, A. ve Tuna, M.E., "Dynamic Analyses of Historical Sehzade Mehmet Mosque for Base Isolation Application", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 26, No 3, 667-675, 2011.
4. Can, H., Kubin, J. ve Ünay, A.İ., "Seismic Behavior of Historical Masonry Buildings with Irregular Geometry", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 27, No 3, 679-686, 2012.
5. Fırat, F.K. ve Yucemen, M.S., "Comparison of loads in Turkish earthquake code with those computed statistically", **Earthquakes and Structures**, Cilt 8, No 5, 977-994, 2015.
6. Fırat, F.K. ve Yucemen, M.S., "Determination of Reliability Based New Load and Resistance Factors for Reinforced Concrete Structural Members", **Teknik Dergi**, Cilt 25, No 125, 1785-1808, 2014.
7. Cancelliere, I., Imbimbo, M. ve Sacco E., "Experimental Tests and Numerical Modeling of Reinforced Masonry Arches", **Engineering Structures**, Cilt 32, 776-792, 2010.
8. Oliveira, D., Basilio, I. ve Lourenço, P.B., "Experimental Behavior of FRP Strengthened Masonry Arches", **Journal of Composites for Construction**, Cilt 14, No 3, 312-322, 2010.
9. Borri, A., Castori, G. ve Corradi, M., "Intrados Strengthening of Brick Masonry Arches with Composite Materials", **Composites: Part B**, Cilt 42, No 5, 1164-1172, 2011.
10. Elmalich, D. ve Rabinovitch, O., "Masonry and Monolithic Circular Arches Strengthened with Composite Materials – A Finite Element Model", **Computers and Structures**, Cilt 87, No 9-10, 521-533, 2009.
11. Milani, G. ve Bucchi, A., "Kinematic FE Homogenized Limit Analysis Model for Masonry Curved Structures Strengthened by Near Surface Mounted FRP Bars", **Composite Structures**, Cilt 93, No 1, 239-258, 2010.
12. Garmendia, L., San-Jose, J.T., Garcia, D. ve Larrinaga, P., "Rehabilitation of Masonry Arches with Compatible Advanced Composite Material", **Construction and Building Materials**, Cilt 25, No 12, 4374-4385, 2011.
13. Tao, Y., Stratford, T.J. ve Chen, J.F., "Behavior of A Masonry Arch Bridge Repaired Using Fibre-Reinforced Polymer Composites", **Engineering Structures**, Cilt 33, No 5, 1594-1606, 2011.
14. Caporale, A., Feo, L. ve Luciano, R., "Limit Analysis of FRP Strengthened Masonry Arches via Nonlinear and Linear Programming", **Composites Part B: Engineering**, Cilt 43, No 2, 439-446, 2012.
15. Dagher, H.J., Bannon, D.J., Davids, W.G., Lopez-Anido, R.A., Nagy, E. ve Goslin, K., "Bending Behavior of Concrete-Filled Tubular FRP Arches for Bridge Structures", **Construction and Building Materials**, Cilt 37, 432-439, 2012.

16. Peker, I.Y., “Yığma ve Tarihi Yapılarda FRP Malzemeler Kullanılarak Yapılan Güçlendirme Uygulamaları”, **Deprem Sempozyumu**, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 979-981, 23-25 Mart 2005.
17. Ural, A., **Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi**, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
18. LUSAS, 2012. Finite element analysis software products. United Kingdom: Finite Element System, FEA Ltd.
19. Kanıt, R. ve Işık, N.S., “Experimental Behavior of Brick Masonry Arches and Analyses by Computer Models”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 22, No 1, 13-20, 2007.
20. Tuğrulelçi, Ş., **Düşey Yüklenen Tuğla Kemerlerdeki Gergi Çubukların Davranış Etkisinin İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
21. İnternet: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6259/20/19.pdf> (2015)
22. İnternet: https://wiki.bath.ac.uk/download/attachments/74949791/MSDS_Sikadur%20-330.pdf (2015).