



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

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TARİHİ YAPILARDAKİ KEMERLERİN FRP KULLANILARAK
ONARILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet EREN

DANIŞMAN

Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

AKSARAY, 2018

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orjinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

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.

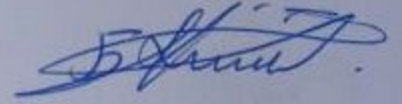
Ahmet EREN

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ONAY BELGESİ

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 122303410 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, "Ahmet EREN", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "Tarihi Yapılardaki Kemerlerin FRP Kullanılarak Onarılması" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

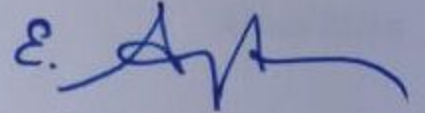
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

Aksaray Üniversitesi



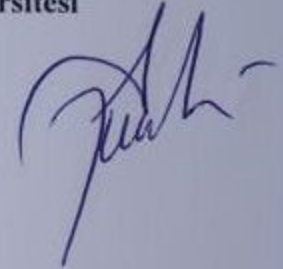
Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ersin AYDIN

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ali URAL

Aksaray Üniversitesi



Teslim Tarihi: 01.08.2018

Savunma Tarihi:10.09.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin yürütücülüğünü üstlenen, çalışmalarım da her konuda yardımını, ilgi ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübeleriyle daima yanımda olan, ufkumu açan Sayın Doç. Dr. Ali URAL'a, deney aşamasında emeği bulunan Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin KARA'ya, deneysel çalışmalarda desteklerini daima yanımda hissettiğim, Öğr. Gör. Yakup BÖLÜKBAŞ ile Tekniker Fatih ÇELİK'e ve isimlerini zikretmediğim diğer tüm emeği geçenlere sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmayı destekleyen Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, her yönden desteklerini gördüğüm başta beni yetiştiren anneme, babama ve ailemin her bir ferdine tüm kalbi duygularıyla sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet EREN

AKSARAY, 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	5
1.1.1 Yığma yapı davranışının deneysel olarak incelendiği çalışmalar	6
1.1.2 Kemerli yapıların güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar	6
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	9
2. TARİHİ YAPILARDA KEMERLER VE KEMERLERDE ONARIM VE GÜÇLENDİRME	11
2.1 Kemerler	11
2.2 Kemerlerde Onarım ve Güçlendirme	17
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ	19
3.1 Harcın Özellikleri	19
3.1.1 Harcın basınç dayanımı deneyleri	19
3.1.2 Harcın çekme dayanımı deneyleri	20
3.2 Pres Tuğla Özellikleri	21
3.2.1 Tuğla basınç dayanımı deneyleri	22
3.2.2 Tuğla eğilmede çekme dayanımı deneyleri	23
3.3 Kagir Basınç Dayanımı	24
3.4 CFRP Malzeme Özellikleri	26
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	28
4.1 Yapılan Deneyler	28
4.1.1 Referans numune	33
4.1.2 Model-1	35
4.1.3 Model-2	38
4.1.4 Model-3	40
4.1.5 Model-4	43
4.1.6 Model-5	47
4.1.7 Model-6	49
4.2 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	51
5. SAYISAL ANALİZ	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	72

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TARİHİ YAPILARDAKİ KEMERLERİN FRP KULLANILARAK
ONARILMASI

Ahmet EREN

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

ÖZET

Bu çalışmada hasar verilmiş kemerler üzerinde uygulanan farklı onarma tekniklerinin deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Pres tuğla ile örülen kemer numunelerinde tarihi yığma yapılardaki gibi kireç esaslı düşük dayanımlı harç kullanılmıştır. Toplamda yedi adet örülen kemer numuneleri yeterli dayanıma ulaşana kadar (28 gün) bekletilmiştir. Ardından kilit taşı hizasından düşey yönde yüklenmiştir. Numunelerden ilki (referans numunesi) göçme anına kadar yüklenmiş, diğer altısı ise belli yük düzeyinde hasara maruz bırakılmıştır. Hasar gören numuneler farklı tiplerde FRP şerit uygulamaları ve derz doldurma uygulaması ile onarılarak göçme anına kadar yüklemeye tabi tutulmuştur. Üzerinde onarım yapılmış kemer numuneleri bir analiz programı kullanılarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Referans numuneye göre hasarlı kemerler üzerinde FRP şerit ile onarım yapılması taşıma kapasitesinde en az %58 artış sağladığı, derzlerin epoksi harcı ile doldurulması ise yapı görüntüsünde bir değişikliğe yol açmadan kemer kapasitesinin önemli derecede artmasında bir alternatif olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yığma kemerler, Hasar, Onarım, Lif takviyeli polimer.

Eylül, 2018; 72 sayfa

M.Sc. THESIS

**REPAIRING OF MASONRY ARCHES USING FRP IN HISTORICAL
STRUCTURES**

Ahmet EREN

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

ABSTRACT

In this study, experimental examination of various repairing techniques applied to damaged masonry arches has made. Similar to historical masonry constructions, lime based low-strength mortar is used in arch samples which are laid with pressed brick. Totally, seven knitted masonry arch samples had kept until reach to adequate strength (28 Days). Then they attached vertically at the key block level. The first sample (reference sample) was loaded until the ultimate load, other six samples were exposed to damages at the decided load weight. Damaged samples had been subjected to loading with FRP strip and mortar applications until the load carrying capacity. Repaired masonry arch samples were modelled via using the analysis program and the results were compared with experimental outputs. Finally, it is seen that in comparison to reference sample, repairing damaged masonry arched with FRP strip provide a minimum %58 rise in bearing capacity and loading joints with epoxy mortar is an alternative to rising significantly capacity of masonry arch without leading to any visual change of the construction.

Keywords: Masonry arches, Damage, Repairing, Fiber reinforced polymer.

September, 2018; 72 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Konya Alaaddin Cami	2
Şekil 1.2. Tarihi yapılarda süsleme sanatları	2
Şekil 1.2 (devam). Tarihi yapılarda süsleme sanatları	3
Şekil 1.3. Kosova Prizren Emin Paşa Camii kubbesinde FRP uygulaması	4
Şekil 1.4. FRP'nin tarihi yapılardaki uygulamaları.	5
Şekil 2.1. Tarihi yapılarda kemer örnekleri	11
Şekil 2.1 (devam). Tarihi yapılarda kemer örnekleri	12
Şekil 2.2. Kemerin kısımları	13
Şekil 2.3. Kemer çeşitleri.....	13
Şekil 2.3 (devam). Kemer çeşitleri.....	14
Şekil 2.4. Kemerlere etki eden kuvvetler ve itki çizgisinin konumu	14
Şekil 2.5. Ters çevrilmiş zincir eğrileri biçimindeki kemerler	15
Şekil 2.6. Tepe noktasından yüklenen kemerdeki hasarlar.....	16
Şekil 2.7. Kemerdeki hasarları önlemek için öneriler.....	16
Şekil 2.8. Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii kemerinde oluşan hasar ve yapının askıya alınmış hali	17
Şekil 2.9. Kemerlerde ve duvarlarda gergi düzenlenmesi	18
Şekil 2.10. Mimar Sinan'ın II.Beyazid Camii kemerinde yaptığı güçlendirme	18
Şekil 3.1. Harcın basınç dayanımı testi.....	20
Şekil 3.2. Harcın çekme dayanımı testi	21
Şekil 3.3. Yığma birim elemanı ölçüleri ve kesiti	21
Şekil 3.4. Tuğla düşey delik yönünde ve deliğe dik yönde basınç dayanımı testleri	22
Şekil 3.5. Tuğla delik yönünde ve tuğla deliğine dik yönde yapılan eğilmede çekme dayanımı testleri	24
Şekil 3.6. Kagir duvar basınç dayanımı testleri	25
Şekil 3.7. Kagir duvar gerilme-şekil değiştirme grafiği	25
Şekil 4.1. Kemer örümü ve ölçüleri	29
Şekil 4.2. Deney düzeneği ve LVDT yerleşim düzeni	30
Şekil 4.2 (devam). Deney düzeneği ve LVDT yerleşim düzeni.....	31
Şekil 4.3. Hasar verilmiş numune çatlakları	31
Şekil 4.4. Kemer üzerinde FRP ve epoksi uygulamaları	32
Şekil 4.4 (devam). Kemer üzerinde FRP ve epoksi uygulamaları	33
Şekil 4.5. Referans numune yükleme öncesi hali	33
Şekil 4.6. Referans numune yükleme sonrası hali	34
Şekil 4.7. Referans numune yük- yer değiştirme grafiği	34
Şekil 4.7 (devam). Referans numune yük- yer değiştirme grafiği	35
Şekil 4.8. FRP uygulaması öncesi hasarlı hali ve FRP uygulanmış hali	36
Şekil 4.9. Model-1 yükleme sonrası hali	37
Şekil 4.10. Model -1 yük-yer değiştirme grafiği.....	37
Şekil 4.10 (devam). Model -1 yük-yer değiştirme grafiği	38
Şekil 4.11. Model-2 yükleme sonrası hali	39
Şekil 4.12. Model-2 yük yer değiştirme grafiği.....	39
Şekil 4.12 (devam). Model-2 yük yer değiştirme grafiği.....	40
Şekil 4.13. Ankraj uygulamaları yapılan Model-3.....	41
Şekil 4.14. Model-3 yükleme sonrası hali	42
Şekil 4.15. Model-3 yük- yer değiştirme grafiği	42
Şekil 4.15 (devam). Model-3 yük- yer değiştirme grafiği	43

Şekil 4.16. Derzlerin epoksi harcı ile doldurulması.....	44
Şekil 4.17. Model-4 yükleme sonrası hali.	45
Şekil 4.18. Model-4 yük- yer değiştirme grafiği	46
Şekil 4.19. Model-5 yükleme sonrası hali.	47
Şekil 4.19 (devam). Model-5 yükleme sonrası hali.	48
Şekil 4.20. Model-5 yük- yer değiştirme grafiği.	48
Şekil 4.20 (devam). Model-5 yük- yer değiştirme grafiği.	49
Şekil 4.21. Model-6 yükleme sonrası hali.	50
Şekil 4.22. Model-6 yük- yer değiştirme grafiği.	50
Şekil 4.22 (devam). Model-6 yük- yer değiştirme grafiği.	51
Şekil 4.23. Yük – yer değiştirme grafikleri.....	52
Şekil 4.23 (devam). Yük – yer değiştirme grafikleri.....	53
Şekil 4.23 (devam). Yük – yer değiştirme grafikleri	54
Şekil 4.24. Yük – yer değiştirme grafiği.....	57
Şekil 5.1. Yığma duvarlarda modellemeler	58
Şekil 5.2. Drucker-Prager kriteri.....	60
Şekil 5.3. Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması.....	60
Şekil 5.4. Sonlu eleman modellemeleri	61
Şekil 5.4 (devam). Sonlu eleman modellemeler	62
Şekil 5.5. SEY ve deney sonuçlarının yük-düşey yer değiştirme grafikleri kıyaslaması.	63
Şekil 5.5 (devam). SEY ve deney sonuçlarının yük-düşey yer değiştirme grafikleri kıyaslaması.	64
Şekil 5.5 (devam). SEY ve deney sonuçlarının yük-düşey yer değiştirme grafikleri kıyaslaması.	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Harcın küp basınç dayanımı sonuçları	20
Çizelge 3.2. Harcın çekme dayanımı deneyi sonuçları	21
Çizelge 3.3. Pres tuğla delik yönünde yapılan basınç deneyi sonuçları	22
Çizelge 3.4. Pres tuğla deliğine dik yapılan basınç deneyi sonuçları	23
Çizelge 3.5. Tuğla delik yönünde eğilmede çekme dayanımı sonuçları.....	24
Çizelge 3.6. Tuğla deliğe dik yönde eğilmede çekme dayanımı sonuçları	24
Çizelge 3.7. Kagir duvarların basınç dayanımları	25
Çizelge 3.8. CFRP malzeme özellikleri.....	26
Çizelge 3.9. Epoksi reçinesi malzeme özellikleri.	26
Çizelge 3.9 (devam). Epoksi reçinesi malzeme özellikleri.	27
Çizelge 4.1. Concresive 1406 teknik özellikleri.	44
Çizelge 4.2. Deney sonuçları	55
Çizelge 5.1. Malzeme özellikleri	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b	Tuğlanın genişliği
c	Kohezyon
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Lif Takviyeli Polimer)
d	Tuğlanın yüksekliği
E	Elastisite modülü
f	Basınç dayanımı
f_{cst,m}	Yarmada çekme deneyi sonucu harcın çekme dayanımı
FRP	Fiber Reinforced Polymer (Lif Takviyeli Polimer)
h_c	Silindir numunenin yüksekliği
k	Pozitif malzeme sabiti
l_c	Silindir numunenin uzunluğu
L	Tuğlanın boyu
LUSAS	London University Structural Analysis System
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
mV	Milivolt
P	Maksimum yükleme
P_f	Maksimum yük
P_s	Yarmada çekme deneyinde uygulanan maksimum yük
R_{tf}	Eğilmede çekme dayanımı
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
V	Maksimum yük
α	Pozitif malzeme sabiti
ε	Şekil değiştirme
σ	Gerilme
Θ	Malzemenin içsel sürtünme açısı

1. GİRİŞ

Kültürel mirasımızın bir parçasını oluşturan tarihi yapılar yapıldığı dönemin izlerini kendisinden sonraki yüzyıllara ulaştırmaktadır. Bu yapıların kullanım süresi içerisinde yapının ayakta kalmasını olumsuz yönde etkileyebilecek birçok faktör bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak insan kaynaklı meydana gelen tahribatlar, yapıda kullanılan malzemelerin süreç içerisinde özelliklerini yitirmesi (aşınması, deforme olması vb.), doğal afetler ve savaşlar gibi sebeplerden oluşan hasarlar verilebilir. Böylece oluşan hasarlar mevcut yapının kullanılamamasına veya yıkılmasına neden olabilmektedir. Tarihi yapıların geleceğe devredilmesi, özellikle yapı taşıyıcı sistemlerinin onararak/güçlendirilerek deprem ve rüzgâr yüklerine karşı mukavim olması konusunda birçok çalışma yapılmaktadır. Bunun yanı sıra özellikle hasara uğramış kemer tipleri üzerinde yapılan araştırmada çok fazla çalışmaya rastlanılmamıştır.

Hasarlı yapı elemanlarına yeni nesil malzemelerle uygulanan onarım/güçlendirme seçeneklerinin, yapının taşıyıcı sistem kapasitesini arzu edilen doğrultuda arttırırken, yapı orijinalliğini, dokusunu mümkün olan derecede bozmaması gerekmektedir. Ayrıca uygulanacak seçeneklerin yapı elemanlarının birlikte çalışmasını sağlaması ve yapıya ilave yük oluşturmaması gerektirmektedir. Aksi takdirde özellikle tarihi kimliğe sahip yapılarda orijinal dokunun bozulmasına veya yapının göçmesine sebep olunabilir.

Kültürel mirasımızda önemli değere sahip bu yapıların özellikle yapı taşıyıcı sisteminde kaybedilen performanslarını geri kazandıracak onarım/güçlendirme tekniklerinden en uygun olanını uygulamaya geçirmek gerekmektedir. Bu teknikler arasında yapı onarımında/güçlendirilmesinde kullanılan lif takviyeli polimer (FRP - Fiber Reinforced Polymer) son zamanlarda sıkça kullanılarak ön plana çıktığı görülmektedir.

Tarihi yapının orijinal dokusunu olumsuz yönde etkileyen ve yapıya ilave yük oluşturan çelik ile onarım/güçlendirme yapılabilmektedir. Konya'da Alaaddin Cami'ye yapılan çalışmada sütunlara yerleştirilmiş bilezikler ve yapılan gergi düzenlemesi Şekil 1.1'de görülmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi çoğu zaman bu tür güçlendirme tekniği yapının doğallığını olumsuz olarak etkilemektedir.



Şekil 1.1. Konya Alaaddin Cami.

Bu çalışmada konu edinen lif takviyeli polimer (FRP) ile onarım aslında uygulanan yapının orjinallliğini bozarak görünüş bakımından bazı olumsuzluklarda yansıtabilmektedir. Ancak birçok tarihi yapıda hat sanatı, çini sanatı ve kalem işi gibi süsleme sanatlarının uygulandığı görülmektedir. Bu anlamda FRP üzeri uygun sıva tabakası ile örtülebilmekte bu tabaka üzerinede süsleme sanatları tarihi dokuya uygun olacak şekilde tekrar uygulanabilmektedir. Anadolu’da süsleme sanatı uygulamasına örnek birçok eser mevcuttur (Şekil 1.2). Bu eserlerden Bursa Ulu Cami’de kalem işi süslemeler ve hat sanatı örnekleri, bunun yanında İstanbul Şehzade Camisi ve Süleymaniye Cami süslemeleri dikkat çekicidir.



(a) Ulu Cami (Bursa)

Şekil 1.2. Tarihi yapılarda süsleme sanatları.



(b) Süleymaniye Cami (İstanbul)



(c) Şehzade Cami (İstanbul)

Şekil 1.2 (devam). Tarihi yapılarda süsleme sanatları.

Tarihi yapıların onarılması veya güçlendirilmesi bazı ülkelerin ekonomik ve bürokratik sorunları nedeniyle daha ileriki tarihlere ertelenebilmektedir. Böylece yapıdaki hasar miktarının süre geçtikçe artması hatta ayakta kalamayacak duruma gelerek yıkılması kaçınılmaz olabilmektedir. Bu durumların yaşanmaması ve yapının ayakta kalması adına doğru ve uygun restorasyona başlanana kadar FRP uygulamaları yapılabilir. Ayrıca dışarıdan bakıldığında görünmeyen yapı kısımlarında üzerine sıva yapılmadan FRP uygulandığı gibi bırakılabilir. Özellikle kurşun levha ile örtülü olan kubbelerde bu tür çalışmalar yapılabilir. Şekil 1.3'te Kosova'nın Prizren şehrinde 1832 yılında yapılan Emin Paşa Camii'sinde 2015 yılındaki restorasyon ve güçlendirme çalışması kapsamında kubbedeki kurşun levha kaplaması altına yapılan FRP uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Kosova Prizren Emin Paşa Camii kubbesinde FRP uygulaması.

Yeni nesil yapı malzemesi olan FRP'nin en önemli avantajı, klasik yöntemlerle edinilen taşıma gücünün çok daha fazlasını yapı elemanı boyutlarını neredeyse

değiştirmeden sağlamasıdır. Buna ek olarak, çelikteki gibi paslanma sorunu olmaması ile birlikte çelikten hafif ve daha da güçlüdür. Bu nedenle tarihi yapıların onarılmasında FRP'nin farklı şekillerde uygulamalarına rastlanılmıştır. Şekil 1.4'te FRP'nin tarihi yapılarda uygulanmasına ilişkin bazı örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 1.4. FRP'nin tarihi yapılardaki uygulamaları (Peker, 2005).

1.1 Literatür Özeti

Kemerlerin malzeme ve güçlendirme tekniği açısından çok değişik şekillerde inşa edilmesi nedeniyle, bu yapılar hakkında gerçekleştirilmiş çok sayıda yayın bulunmaktadır. Bununla beraber kemerlerle ilgili yapılan çalışmalarda kemer köprüler dikkate alınmıştır. Bu çalışmada ise kemer köprülerden ziyade tarihi yapılardaki kemer formu dikkate alınmış, bu tür yapıların güçlendirilme teknikleri irdelenmiştir.

1.1.1 Yığma yapı davranışının deneysel olarak incelendiği çalışmalar

Benedetti vd., (1998) 24 adet 1/2 ölçekli yığma yapı modeli üzerinde 119 adet sarsma tablası deneyi yapmışlardır. Yapılan deneylerde hasar görmüş modellere farklı onarım ve güçlendirme teknikleri uygulayarak, modeller tekrar sarsma tablası deneyine tabii tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlarla birçok farklı güçlendirme tekniklerinin uygulanabilirliğini göstermişlerdir.

Schultz vd., (1998), mesnet noktaları güçlendirilmiş ve bazı bölgelerine beton enjeksiyon yapılmış yığma kesme duvarına tekrarlı yükler etkitererek yığma duvarın göstermiş olduğu rijitlik, kesme dayanımı, enerji yayılımı ve deformasyon kapasitesini belirlemeye çalışmışlardır.

Çöğür (2007), çalışmasında düzlem dışı yüklenen yığma duvarların ve yığma duvarlarda oluşan çatlakların kontrol altına alınmasını sağlayacağı düşünülen yatay derz takviyesi uygulaması ile epoksi reçineli FRP uygulamasını, deneysel ve analitik olarak araştırmıştır.

Kanıt ve Işık (2007), model olarak aynı açıklığa sahip farklı geometrilerdeki (dairese, sepet kulpu ve sivri) tuğla kemerlerin açıklıkları boyunca yüklenmesi ile elde edilen deney sonuçlarını sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Numunelerin eşdeğer sürekli ortam parametrelerini deneylerden elde edilen deformasyon sonuçları ile analizde kullanılan sonlu farklar yöntemleri kalibre edilmesi ile bulmuşlardır. Yığma yapıların analizinde kullanılan yöntemlere göre ayrık elemanlar yöntemi sonuçlarının daha gerçekçi olduğu belirtilmiştir.

1.1.2 Kemerli yapıların güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar

Valuzzi vd., (2001), çalışmalarında farklı şekillerde FRP ile güçlendirilmiş tonozların nihai koşullar altındaki davranışları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ve göçme mekanizmaları için modelleme önerilmiş ve tartışılmıştır.

Basilio vd., (2004), çalışmalarında yarım daire kemerlerin FRP ile güçlendirilmesiyle etkinliğini değerlendirmek için modeller yapmışlardır. Yığma kemerlerin optimum güçlendirilmesiyle ilgili deneysel sonuçları sunmuşlardır.

Foraboschi (2004), mafsal mekanizması göçme modu oluşmayacak şekilde iç ve dış kısımlarından FRP ile güçlendirilmiş kemer ve tonoz yapı elemanlarının davranışı ile ilgilidir. Çalışmada, ezilme, kayma, sıyrılma ve FRP kopması gibi değişik göçme modları için değişik matematiksel modeller sunulmuştur. Bu matematiksel modeller ile her bir göçme modu için maksimum yük taşıma kapasiteleri belirlenmiştir.

Bastianini vd., (2005), FRP kullanılarak güçlendirilmiş kagir duvarlar ve tonoz için bir sismik güçlendirme tekniği ile ilgili bir gerçek ölçekli deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada İtalya'daki 1997 yılında meydana gelen depremde tahrip olan ve sonradan CFRP ile güçlendirilen 1600 yılında yapılmış Palazzo Elmi-Pandolfi isimli tarihi binanın işlevselliği dinamik ve statik testler ile değerlendirilmiştir.

Cavicchi ve Gambarotta (2005), gerek tam gerekse model ölçekli kemerler üzerinde yapılan deneysel çalışmaların, kemer üzerindeki parapet ve dolgu duvarların kemerin taşıma gücü dayanımını ve davranışını önemli ölçüde etkilediği tespiti üzerine, kemer ve kemer dolgusu etkileşimini incelemek için çok açıklıklı kemer köprülerin iki boyutlu modellemesini yapmışlardır.

Shrive (2006), kendi çalışmasında kemer yapı formlarının, meydana gelecek depremlere karşı dayanımlarını arttırmak için FRP'nin nasıl kullanılması konusunu incelemiştir.

Baratta ve Corbi (2007), çalışmalarında yığma kemerin FRP şeritler ile çeşitli şekillerde güçlendirilen yığma kemerin güçlendirilmemiş haline göre statik davranışlarını test edip karşılaştırma yapmışlardır.

Lorenzis vd., (2007), çalışmalarında yanal itme ile üniform yükleme maruz FRP ile güçlendirilmiş tuğla tonozlar üzerinde deneysel bir araştırma yapmışlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ve teorik kabuller çalışmanın sonucunda tartışılmıştır.

Diamanti vd., (2008), tuğla kemer köprülerde bir tahribatsız deney tekniği olarak yeraltı radarı uygulaması (GPR) tekniğini çalışmışlardır. Yer altı radarı uygulaması yapılan nümeriksel modeller ile değerlendirilmiş; laboratuvar çalışmaları ile kalibre edilmiştir.

Milani vd., (2009), çalışmalarında kemer, tonoz ve kubbeden oluşan elemanların FRP uygulaması yapılmış ve yapılmamış modellemelerinde 3 boyutlu limit analiz sonuçlarını değerlendirmişlerdir.

Felice (2009), çalışmasında çok açıklıklı taş kemer köprülerin yük taşıma kapasitesine etki eden etmenler ile lifli elemanların tatbiki ile yük kapasitesindeki değişimlerini incelemiştir.

Milani ve Bucchini (2010), yaptıkları çalışmada, eğrisel tuğla yapı elemanlarını FRP şeritler ile güçlendirerek göçme mekanizması ve göçme yükünü belirlemek için bir kinematik sonlu elamanlar modeli sunmuşlardır. Sunulan bu modelin göçme yükü ve göçme mekanizmasını güvenli sınırlar içerisinde belirlediği ve sunulan bu modelin uygulamada kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Oliveira vd., (2010), GFRP (glass fiber reinforced polymer) ile güçlendirilmiş tuğla kemerlerin deneysel davranışları incelenmiştir. On iki adet 1/2 oranında küçültülmüş numuneler kemer genişliğinin 1/4'ünden yüklenmiştir. Çalışmanın numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçların standart ve yönetmeliklerin geliştirilmesi ve ileri nümerik modellerin ve analitik çözümlerin doğrulanması için önemli bilgiler sağlayacağı ifade etmektedirler.

Borri vd., (2011), çalışmalarında kemerleri güçlendirmek için yenilikçi bir teknik olan karbon plaka kullanımının etkinliğini araştırmışlardır. Tuğla kemerin on beş prototipini çeşitli şekillerde kompozit malzemeler ile güçlendirerek düşey yük altında test etmişlerdir.

Garmendia vd., (2011), çalışmalarında taş kemerlerin onarımında kullanılan takviye yöntemlerine alternatif olarak BTRM (bazalt tekstil takviyeli harç) uygulanmasının deneysel çalışmasını yapmışlardır.

Tao vd., (2011), çalışmalarında iki açıklıklı dairesel yığma kemer köprüünün fiber takviyeli polimer (FRP) ile güçlendirmiş ve davranışını incelemiştir. FRP taş kemer köprüünün yapısal performansını artırmak için etkili bir teknik olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

Caporale vd., (2012), yaptıkları çalışmada değişik özelliklerdeki kemerler FRP ile güçlendirerek bu kemerlerin göçme yükü belirlenmiştir. Bu çalışmada lineer ve nonlinear iki farklı yöntem kullanılmış olup, nümeriksel örneklerle önerilen iki farklı yöntemin avantajları ve FRP ile güçlendirilmiş farklı kemer formlarının işlevselliği incelenmiştir.

Dagher vd., (2012), yaptıkları çalışmada kemer formundaki beton yapı elemanın etrafına FRP sarılarak elemandaki eğilme davranışını değerlendirmek, deneysel ile analitik model sonuçlarını karşılaştırmak ve bu teknoloji alanında uygulamasını göstermek için yapılmıştır. Bu amaçlara ulaşmak için, FRP sarılmış kemer formundaki yapı elemanının eğilme yükü-deformasyon ilişkisi ve moment eğrilik ilişkisi üç kiriş ve dört kemer üzerinde yapılan deneylerle incelenmiştir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem eğrisel elemanlarından biri olan kemer formları yatay ve düşey olarak etkiyen yükleri güvenli bir şekilde sütunlara iletmektedir. Yapıldığı günden bugünlere çeşitli hasarlara ve yıpranmalara maruz kalmış tarihi yapıların aslına uygun olarak onarımı/güçlendirilmesi gerekebilmektedir. Bu nedenle yapıya ilave yük getirmeyen ve görünüşte orijinalliği bozmayan çözümler tercih edilmektedir. Teknolojik gelişmelerde göz önüne alındığında yeni nesil malzemeler ile yapıda doğal görünüşü bozmadan farklı çözümlere gitmek mümkün hale gelebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı tarihi yapılarda yapısal hasara uğramış kemerlerin farklı FRP uygulamaları ile onarılarak düşey olarak yüklemeye taşıma gücü olarak en iyi dayanımının araştırılmasıdır. Düşey yük etkisinde hasara uğrayan kemerler üzerine yapılan bu araştırmada epoksi harcı ve FRP uygulaması ile onarılan numuneler deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Deneysel olarak incelenen numuneler aynı zamanda nümerik olarak modellenmiş ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Toplamda 7 numune üretilmiş olup referans numunesine hasar verilmemiş diğer 6 numuneye ise hasar verilmiştir. Referans numune haricindeki deney elemanlarına hasar verildikten sonra uygulanan farklı biçimlerde onarma yöntemlerinin yapıda etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler hasara uğramış kemerler üzerinde yapılan

uygulamaların eksenel kuvvet dayanımını önemli oranda arttırdığını göstermiştir. Bu çalışma, kemer tipleri üzerine benzer araştırma ile karşılaşılamaması nedeniyle bir eksikliği giderecek aynı zamanda onarım/güçlendirme kapsamında yeni nesil FRP uygulamasının nasıl yapılması noktasında yol gösterici olacaktır.



2. TARİHİ YAPILARDA KEMERLER VE KEMERLERDE ONARIM VE GÜÇLENDİRME

2.1 Kemerler

Tarihi yapılar incelendiğinde yapıyı oluşturan elemanlar düzlemsel ve eğrisel olarak sınıflandırılabilir. Düzlemsel elemanlara örnek olarak duvar, sütun, payanda, düz atkı (lento), ayak, Türk üçgeni verilebilirken; eğrisel elemanlara örnek olarak kemer, tonoz, kubbe, pandantif verilebilir.

Yığma yapılarda açıklıkları geçmek için imal edilen kemerler; sütunlar arasında bulunan açıklıkların üstünü örtebilmek için kagir, ahşap vb. malzemeler ile yapılan eğrisel yapı elemanı olarak tanımlanır.

İlk örneklerine M.Ö. 3000 yıllarına dayanan kemer formlarını Mezopotamya’da Sümerler kullanmasına rağmen, etkin bir şekilde şaheser olarak Romalılar kullanmıştır (Toker ve Ünay, 2004). Birçok medeniyete beşiklik yapmış olan ülkemizde farklı tarihi yapılar içerisinde kemer formlarını görmek mümkündür. Özellikle köprüler gibi büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılan kemerleri cami, hamam, su yolları vb. farklı yapıların taşıyıcı siteminde görmek mümkündür. Şekil 2.1’de farklı tarihi yapılarda kullanılan kemer formlarına örnekler görülmektedir.



(a) Sultan Ahmet Cami (İstanbul)



(b) Süleymaniye Cami (İstanbul)

Şekil 2.1. Tarihi yapılarda kemer örnekleri.



(c) Uzunköprü (Edirne)



(d) Hierapolis Antik Kenti (Denizli)

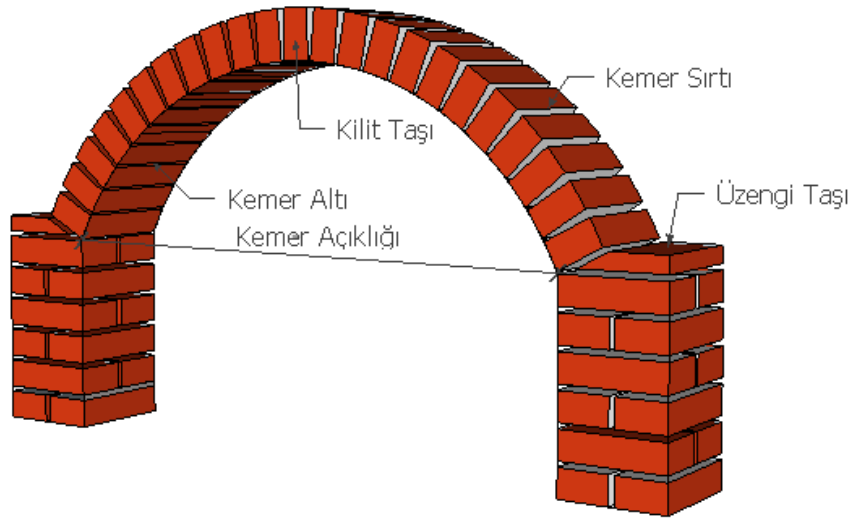


(e) Bozdoğan Su Kemer (İstanbul)

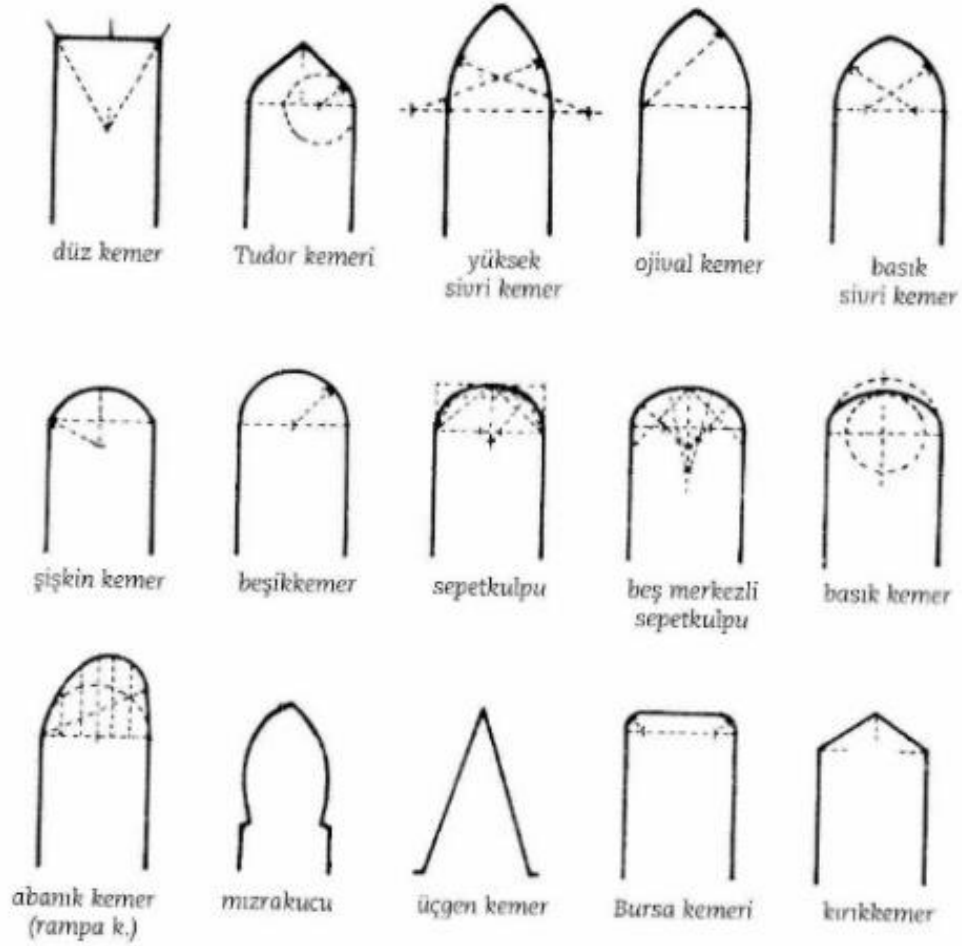
Şekil 2.1 (devam). Tarihi yapılarda kemer örnekleri.

Yapı formu olarak kemerler üzerine gelen yükleri iki yanındaki sütunlara iletirler ve sadece basınca çalışırlar. Bu nedenle kemerlerde basınç dayanımı yüksek olan taş, tuğla gibi yapı malzemelerinin kullanılması daha uygundur. Kemerler pencere gibi küçük açıklıkları geçmek için kullanıldığı gibi kubbenin yükünü sütunlara aktarmak için büyük açıklıklı olarak da kullanılmıştır. Bir kemerde örgü taşı olarak üç eleman bulunmaktadır. Bunlar üzengi taşları, kemer taşları ve kilit taşıdır. Kemer yayının ilk taşı olan üzengi taşıdır. Kilit taşı, üzengi taşlarından başlayıp kendisine kadar gelen karşılıklı kemer taşlarını birbiri ile bütün oluşturarak kilitleyen taşıdır. Kemer taşları, üzengi taşları ile kilit taşı arasında kalan ve kemeri oluşturan taşlardır. Şekil 2.2’de kemerin kısımları görülmektedir.

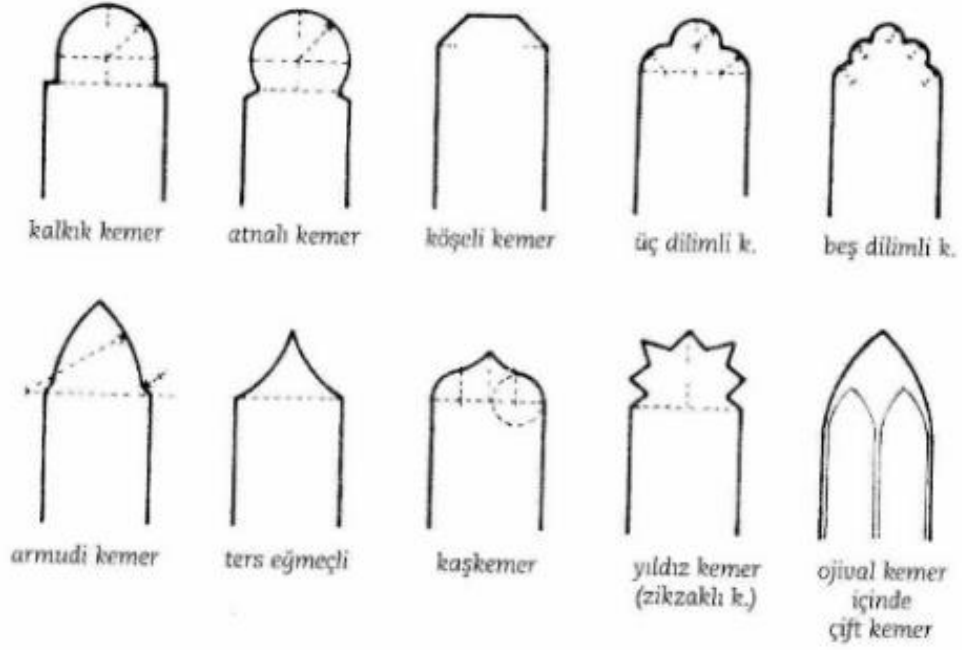
İlk kemerler iki büyük taşın birbirine ters V şeklinde dayanması ile oluşturulmuştur. Günümüzdeki kemer tiplerine gelene kadar birçok teknikler denenmiş ve basık, şişkin, sepetkulpu, beşik, düz, üçgen, abanık, mızrak ucu, at nalı, tudor, dilimli, köşeli, armudi, ters eğmeçli, yıldız, kaş kemer gibi birçok kemer çeşidine ulaşılmıştır (Özer, 2006). Şekil 2.3’te farklı kemer biçimleri görülmektedir.



Şekil 2.2. Kemerin kısımları.

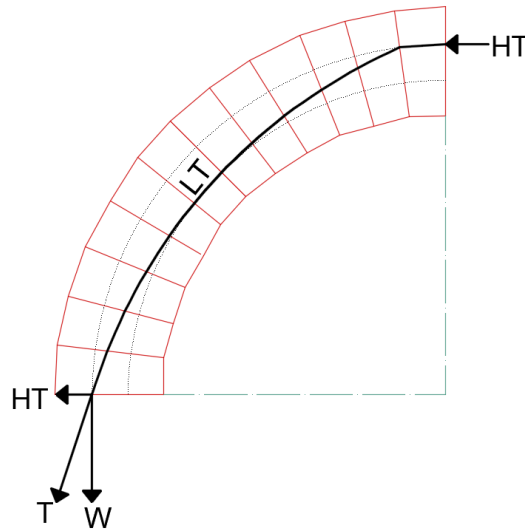


Şekil 2.3. Kemer çeşitleri (Hasol, 2016).



Şekil 2.3 (devam). Kemer çeşitleri (Hasol, 2016).

Kemer stabilitesini etkileyen en önemli ölçüt, itki çizgisinin açısı ve şiddetidir. İtki çizgisi ise kemerin ağırlığı ve yatay itki sonucu olduğu varsayılan ve kemer kesitinin ortalarında yer alması gereken çizgidir. Bu itki her zaman kemerin şekline ve ağırlığına bağlı olarak belirli bir açıyla aşağı doğru iner. Yatay itkinin şiddeti, kemer taşının ağırlığı ile oluşur ve bu itki taşlar tarafından birbirine iletilerek kemer eğrisinin başladığı yere doğru taşınır (Özer, 2006) (Şekil 2.4).



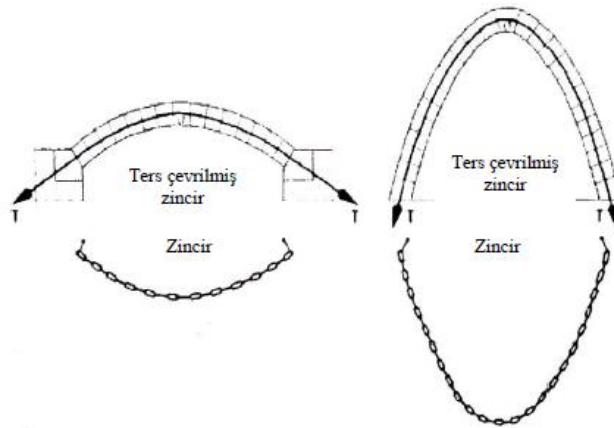
Şekil 2.4. Kemerlere etki eden kuvvetler ve itki çizgisinin konumu.

Şekil 2.4'te; HT eğrisel yapı elemanlarındaki (kemer, tonoz ve kubbelerdeki) yatay itkiyi, LT kemer taşlarının davranışını temsil eden itki çizgisini, W strüktür üzerindeki tüm yüklerin (sabit ve hareketli) ağırlığını, T ise yatay itki ve düşey yükün bileşke kuvveti olan itkiyi göstermektedir.

Kemerin ağırlığı ve yatay itkinin bileşkesi olan itki çizgisi, kemerin orta üçte birlik kısmının içinde kalırsa kemer kararlıdır. İtki çizgisi, kemerin içe bakan üçte birlik kısmındaysa yan taraf dışa doğru deformasyona uğrar. İtki çizgisi, kemerin dışa bakan üçte birlik kısmındaysa yan taraf içe doğru deformasyona uğrar (Özer, 2006).

Yığma yapılarda bazı temel kurallar bilindiği zaman karmaşık hesaplar yapılmaksızın bu yapıların tasarlanması kolaylaşır. Bir kemerin, tonozun ya da kubbenin alması gereken ideal biçim ve oturacağı duvar ya da ayağın genişliği yaklaşık olarak belirlenebilir. Kemerlerin boyutu ve şekli ne olursa olsun itki çizgisi, basınç gerilmesi çizgisidir ve her zaman ters çevrilmiş zincir eğrisi şeklindedir, çünkü bu, kagir yapılarda doğal yük aktarımı eğrisidir (Özer, 2006).

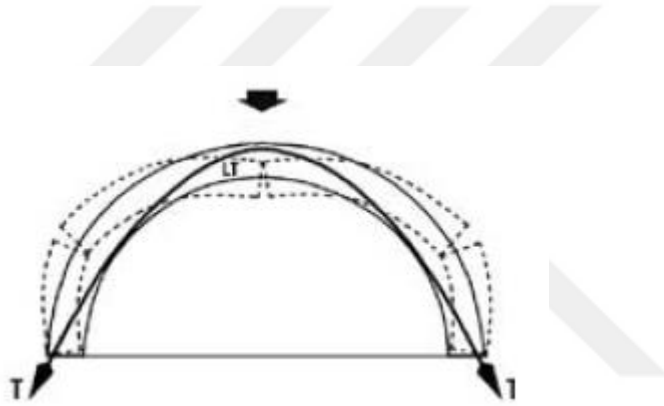
İki ucundan serbest asılmış zincirin yerçekimi etkisinde aldığı biçim zincir eğrisidir. Zincir eğrisinin tersi olan kemer formunun kesitlerinde çekme kuvveti oluşmaz ve bütün kesitlerinde eğilme momenti sıfırdır. Şekil 2.5'de ters çevrilmiş zincir eğrisi biçiminde oluşturulmuş iki farklı kemer gösterilmiştir. Ters çevrilmiş zincir eğrisi formunda yapılan kemerler kesitlerinin ince olması durumunda bile çok sağlamdır ve kararlıdır. Kemerin biçimi, zincir eğrisinden uzaklaştıkça, kemerde eğilme momentleri ve çekme kuvvetleri meydana gelerek, çatlak ve deformasyonlar oluşmaya başlar (Aköz, 2008).



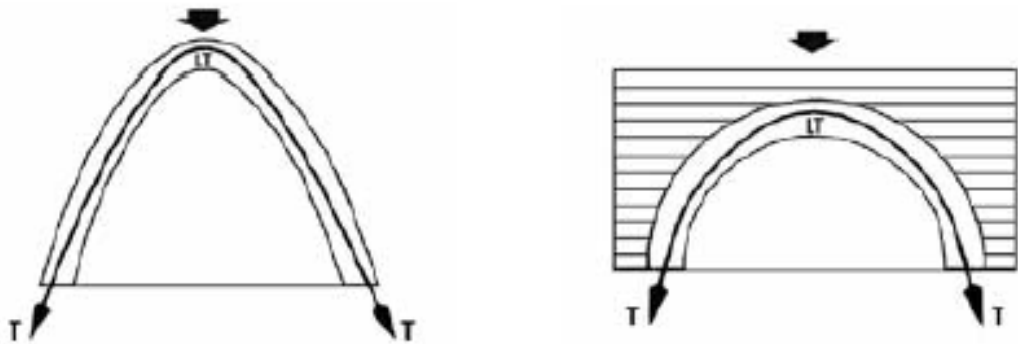
Şekil 2.5. Ters çevrilmiş zincir eğrileri biçimindeki kemerler.

Kemerin stabil olma durumu kemerin oturduğu duvar ya da sütunun genişliği, kemer açıklığı, kullanılan harcın kalitesi, kemerin ağırlığı, kemer eğrisinin biçimi ve kemer kesitinin kalınlığı gibi bazı değişkenlere bağlıdır.

Kemer üzerine yükleme yapılması ile kimerde stabilitenin bozulmaması için ağırlık arttırılması ve kemer şekli değiştirilerek stabilite korunur. Şekil 2.6’da kemerin kilit noktasına merkezi yük uygulandığında itki çizgisi iç kısımdan geçtiği için kimerde hasar oluşumu gözlenir. Şekil 2.7’deki birinci şekilde yükleme aynı olmasına rağmen, kemerin formu ters zincir eğrisiyle örtüştüğü için hasar meydana gelmemiştir. Şekil 2.7’deki ikinci şekilde kemer üzerine duvar yapılması durumunda yük aynı olduğu halde itki çizgisi kemerin iç kısmında kaldığı için hasar oluşmamaktadır.



Şekil 2.6. Tepe noktasından yüklenen kimerdeki hasarlar.



Şekil 2.7. Kimerdeki hasarları önlemek için öneriler.

2.2 Kemerlerde Onarım ve Güçlendirme

Yapılar süreç içerisinde farklı etkilere maruz kalabilmekte veya malzeme bozunmaya başlayabilmektedir. Kısa sürede gözle görülebilen herhangi bir hasar oluşmamasına karşın önlem alınmaz ise uzun sürede yapıda kısmi veya bütün göçmeler oluşabilmektedir. Göçme seviyesine ulaşmadan alınan önlemler ile yapı ayakta kalabilmektedir.

Kemerlerde oluşan çatlaklar uygun harçla doldurulur, ezilen, düşen ya da bozulan elemanlar kemer ya da tonoz askıya alınarak yenileri ile değiştirilir. Şekil 2.8’de Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii’nde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden sonra kible ana kemeri dış cephesinde bulunan kemer taşının yerinden düştüğü ve yapının askıya alınmış hali görülmektedir. Kemerlerde görülen mesnet noktalarının birbirinden uzaklaşması ile oluşacak hasarları önleyebilmek için gerilme alacak şekilde gergiler düzenlenir. Şekil 2.9’da Roma eseri olan yapılarda duvar ve kemer gergi düzenlemesi görülmektedir.



Şekil 2.8. Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii kemerinde oluşan hasar ve yapının askıya alınmış hali.



Şekil 2.9. Kemerlerde ve duvarlarda gergi düzenlenmesi (Sesigür vd., 2007).

Kubbe ile örtülü yapılarda kubbe kasnağından gelen yükü ayaklara iletilmesinde rol oynayan kemerlerden bir kısmının zayıf olması yapıda farklı oturmaların oluşmasına neden olabilmektedir. Kesitlerde zorlanmalara neden olan farklı oturmaların oluşmaması için kemerlerde itki kuvvetini karşılayacak şekilde güçlendirme yapılması gerekmektedir. Kemerin altına yeni bir kemer eklemek ile bu durum sağlanabilmektedir. Böylece kemerlerde meydana gelecek sehim azaltılmış olacaktır. Bu duruma örnek olarak II. Beyazid Camii'nin zayıf olan kemerinin altına 16. yy da Mimar Sinan'ın yeni bir sivri kemer inşa ederek güçlendirmesi verilebilir. Şekil 2.10'da Mimar Sinan tarafından II. Beyazid Camii kemerinde yapılan güçlendirme görülmektedir (Aköz, 2008).



Şekil 2.10. Mimar Sinan'ın II. Beyazid Camii kemerinde yaptığı güçlendirme.

Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte özel olarak üretilen yeni nesil malzemeler de onarım ve güçlendirmede kullanılagelmiştir. Bu tezin konusu olan fiber takviyeli polimerlerin yapılarda kullanılması ile ilgili detaylı bilgiye Giriş kısmında yer verilmiştir.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Deneyssel çalışma kapsamında kullanılan malzeme özelliklerini belirleme amaçlı olarak ilgili Türk Standartlarında belirtildiği şekilde testleri yapılmıştır. Tuğlaların birleştirilmesinde kullanılan harç için basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testleri, kagir birim olan tuğla için tuğla deliğine dik ve tuğla deliği doğrultusunda basınç dayanımı ve üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Ayrıca tuğla ve harçtan ilgili standartın belirttiği ölçülerde imalatı yapılmış kagir duvarların basınç dayanımı testleride yapılmıştır. Malzeme deneyleri Aksaray Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.1 Harcın Özellikleri

Kemer numunelerinde kullanılan harç, tarihi yapılardaki harca benzer olacak şekilde kireç esaslı düşük dayanımlı olarak imal edilmiştir. Çimento, kireç ve kumdan oluşan harç yatay ve düşey derzlerde kullanılmış, harcın karışım oranı ise hacimsel olarak sırasıyla 1/2/7 alınmıştır (Oymael, 2003). Numunelerde kullanılan harcın mekanik özelliklerini belirlemek üzere TS EN 12390-6'ya göre ise çekme dayanımı, TS EN 12390-3'e göre ise basınç dayanımı testleri yapılmıştır.

3.1.1 Harcın basınç dayanımı deneyleri

Derzlerde kullanılan harcın basınç dayanımının belirlenebilmesi için boyutları 150x150x150 mm³ olan küp kalıplara hazırlanan harçtan alınmış ve 28 günlük kürün ardından deneyi yapılmıştır. TS EN 12390-3 (2010) standardına göre deneyi yapılan harcın basınç dayanımları (σ), kırılma anında ulaşılan en büyük yükün (F) uygulandığı en kesit alanına (A_c) bölünmesiyle elde edilmiştir. Harç numuneleri basınç deneyi düzeneği Şekil 3.1'de verilmektedir. Basınç deneylerinden elde edilen test sonuçlarına (Çizelge 3.1) göre harç numunesi ortalama 39,40 kN luk kuvvete ve 1,75 MPa basınç dayanımına ulaştığı görülmüştür. Ortalama basınç dayanımı standart sapması ise 0,05 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. Harcın basınç dayanımı testi.

Çizelge 3.1. Harcın küp basınç dayanımı sonuçları.

Numune No	F (kN)	σ (MPa)
HKB-1	40,60	1,80
HKB-2	39,50	1,76
HKB-3	38,10	1,69
Ortalama	39,40	1,75

HKB: Harcın küp basınç dayanımı.

3.1.2 Harcın çekme dayanımı deneyleri

Harç numunelerinin çekme dayanımını belirlemek amacıyla TS EN 12390-6 (2010) standardına göre silindir yarma deneyleri yapılmıştır. Çekme dayanımı Denklem (3.1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f_{cst,m} = \frac{2P_s}{\pi h_c l_c} \quad (3.1)$$

Denklemde P_s ; uygulanan maksimum yükü, h_c ; silindir numunenin yüksekliğini, l_c ; silindir numunenin uzunluğunu ifade etmektedir. Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımlarına göre üç adet numune ortalama 10,47 kN yüke 0,34 MPa çekme dayanımına ulaştığı görülmüştür. Ortalama yarmada çekme dayanımı standart sapması ise 0,04 MPa olarak hesaplanmıştır. Yarmada çekme deney düzeneği Şekil 3.2’de ve harcın çekme dayanımı test sonuçları Çizelge 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2. Harcın çekme dayanımı testi.

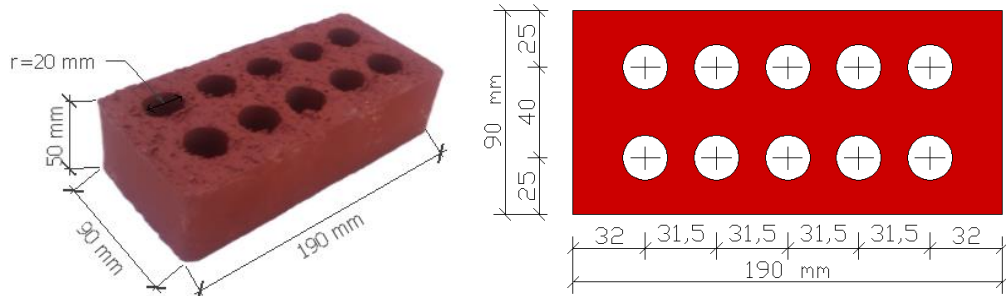
Çizelge 3.2. Harcın çekme dayanımı deneyi sonuçları.

Numune No	P_s (kN)	$f_{cst,m}$ (MPa)
HÇD-1	12,11	0,39
HÇD-2	9,69	0,31
HÇD-3	9,63	0,31
Ortalama	10,47	0,34

HÇD: Harcın çekme dayanımı.

3.2 Pres Tuğla Özellikleri

Deneylerde yığma birim elemanı olarak düşey delikli pres tuğla kullanılmıştır. 190x90x50 mm³ boyutlarına sahip tuğlanın ağırlığı 1,360 kg dır. Kullanılan düşey delikli pres tuğlaya ait görünüş ve ölçüleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Numunelerde kullanılan tuğlaların mekanik özelliklerini belirlemek üzere TS EN 772-1'e göre basınç dayanımı, TS EN 772-6'ya göre ise eğilmede çekme dayanımı testleri yapılmıştır.

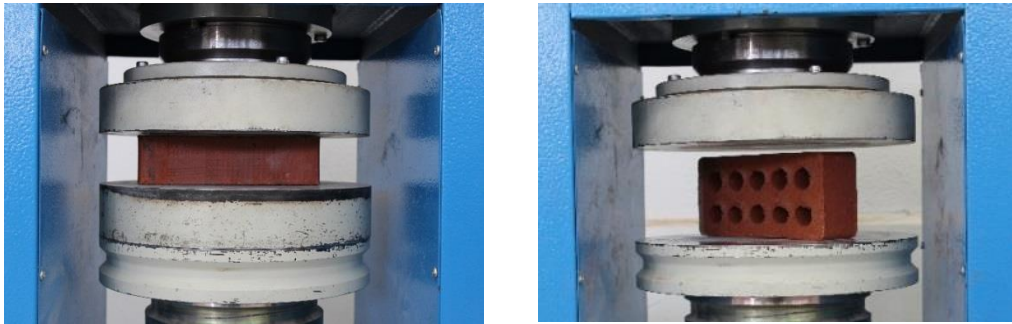


Şekil 3.3. Yığma birim elemanı ölçüleri ve kesiti.

3.2.1 Tuğla basınç dayanımı deneyleri

Numune imalatında kullanılan pres tuğlaların düşey delikli olması nedeniyle yükleme yönüne göre tuğlada farklı dayanımlar görülür. Tuğla basınç yüklemesi TS EN 772-1 (2012) standardına göre yapılmıştır. Pres tuğlanın basınç dayanımı için yüklemelerin 6 tanesi delik yönünde, 6 tanesi ise deliğe dik yönde uygulanmak üzere toplamda 12 adet deney yapılmıştır. Basınç deneyi testleri Şekil 3.4'te görülmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ise Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Standartlaştırılmış basınç dayanımı (σ) sonuçları olarak verilen değerleri elde etmek için uygulanan maksimum yükün yüzey alanına bölünmesi ile elde edilen dayanım TS EN 772-1 (2012)'de verilen δ şekil katsayısıyla çarpılmıştır. Tuğla boyutlarına göre çizelgeden alınan δ katsayısı doğrusal oranlama ile 0,777 olarak hesaplanmıştır. Düşey delik yönünde uygulanan yüke karşılık gelen yüzey alanındaki deliklerin alanları çıkarılarak net alan hesaplanmış ve dayanım hesabında net alan kullanılmıştır. Delik doğrultusuna dik olarak yapılan yüklemelerde ise herhangi bir boşluk olmadığından direk yüzey alanı dikkate alınarak dayanım sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Tuğla düşey delik yönünde ve deliğe dik yönde basınç dayanımı testleri.

Çizelge 3.3. Pres tuğla delik yönünde yapılan basınç deneyi sonuçları.

Numune No	σ (MPa)
DYB-1	43,08
DYB-2	51,87
DYB-3	38,84
DYB-4	45,19
DYB-5	58,32
DYB-6	61,03
Ortalama	49,72

DYB: Pres tuğla delik yönünde basınç dayanımı.

Çizelge 3.4. Pres tuğla deliğine dik yapılan basınç deneyi sonuçları.

Numune No	σ (MPa)
DDB-1	15,95
DDB-2	19,00
DDB-3	15,44
DDB-4	19,18
DDB-5	15,92
DDB-6	19,56
Ortalama	17,51

DDB: Pres tuğla deliğine dik doğrultuda basınç dayanımı.

Pres tuğla üzerinde yapılan basınç dayanımı sonuçlarına göre delik doğrultusunda yapılan altı numunenin ortalama 49,72 MPa dayanıma ulaştığı görülmüş ve bu ortalama dayanıma göre standart sapması 8,05 MPa olarak hesaplanmıştır. Tuğla delik doğrultusuna dik yönde yapılan altı numunenin ortalama 17,51 MPa dayanıma ulaştığı görülmüş ve standart sapması 1,75 MPa olarak hesaplanmıştır.

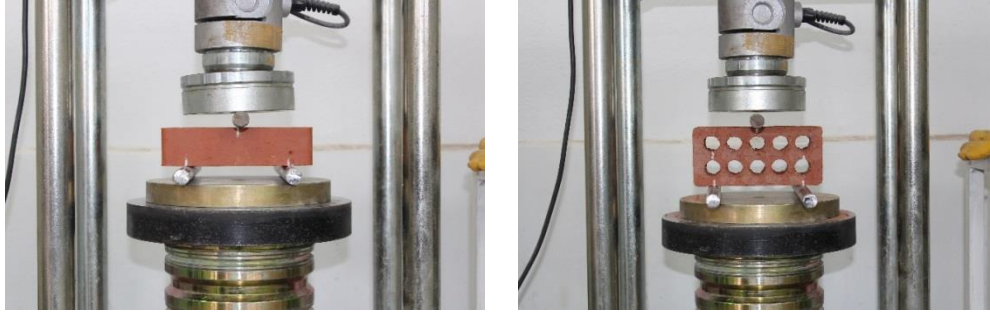
3.2.2 Tuğla eğilmede çekme dayanımı deneyleri

Tuğla numunelerin eğilmede çekme dayanım testleri yine düşey delik yönünde ve deliğe dik yönde olmak üzere konumlandırılarak TS EN 772-6 (2004) standardına göre yapılmıştır. Her bir konumda 6 adet olmak üzere toplamda 12 tuğla üzerinde deney yapılmıştır. Uygulanan maksimum yüklemeye göre tuğla eğilmede çekme dayanımı Denklem (3.2) ile hesaplanmıştır.

$$R_{tf} = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.2)$$

Bu denklemde R_{tf} ; eğilmede çekme dayanımını (N/mm^2), P; maksimum yükü (N), b; (mm) tuğlanın genişliğini, d; (mm) tuğlanın yüksekliğini, L; (mm) ise tuğlanın boyunu temsil etmektedir.

Tuğla eğilmede çekme dayanım testleri Şekil 3.5'te görülmektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ise Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilmiştir. Deney sonuçlarına göre; tuğla delik yönünde yapılan yüklemelerde ortalama 7,79 kN kuvvete ve 6,58 MPa dayanıma ulaştığı, tuğla deliğine dik doğrultuda yapılan yüklemelerde ise ortalama 10,68 kN kuvvete ve 4,99 MPa dayanıma ulaştığı görülmüştür.



Şekil 3.5. Tuğla delik yönünde ve tuğla deliğine dik yönde yapılan eğilmede çekme dayanımı testleri.

Çizelge 3.5. Tuğla delik yönünde eğilmede çekme dayanımı sonuçları.

Numune No	P (kN)	b (mm)	d (mm)	L (mm)	R _{tf} (MPa)
DYE-1	6,79	90,0	50,0	190,0	5,73
DYE-2	6,80				5,74
DYE-3	8,33				7,03
DYE-4	8,91				7,52
DYE-5	8,34				7,04
DYE-6	7,57				6,39
Ortalama	7,79				6,58

DYE: Pres tuğla delik yönünde eğilmede çekme dayanımı.

Çizelge 3.6. Tuğla deliğe dik yönde eğilmede çekme dayanımı sonuçları.

Numune No	P (kN)	b (mm)	d (mm)	L (mm)	R _{tf} (MPa)
DDE-1	7,60	50,0	90,0	190,0	3,57
DDE-2	11,50				5,40
DDE-3	11,09				5,20
DDE-4	12,38				5,81
DDE-5	11,25				5,28
DDE-6	9,96				4,67
Ortalama	10,63				4,99

DDE: Pres tuğla deliğine dik doğrultuda eğilmede çekme dayanımı.

3.3 Kagir Basınç Dayanımı

Boyutları 390x90x190 mm³ olacak şekilde TS EN 1052-1 (2000) standardına göre üretilen üç adet duvar numunesi için basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Uygulamada duvarda oluşan gerilme maksimum yükün (V) uygulama alanına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Numunelerde oluşan yer değiştirme miktarları yerleştirilen iki adet LVDT ile ölçülmüştür. Şekil 3.6’da kagir basınç dayanımı testi görülmektedir. Testlere ait sonuçlar Çizelge 3.7’de verilmiş olup ortalama basınç

dayanımı 11,7 MPa hesaplanmıştır. Çizelgede verilen elastisite modülü/basınç dayanımı (E/f) oranı ortalama 382 hesaplanmış olup TS EN 1996-1-1 (2013) (Donatılı ve donatısız kagir yapılar için genel kurallar)’te belirtildiği gibi 1000 oranından düşük çıkmıştır. Numunelere ait gerilme – şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.7’de verilmiştir.

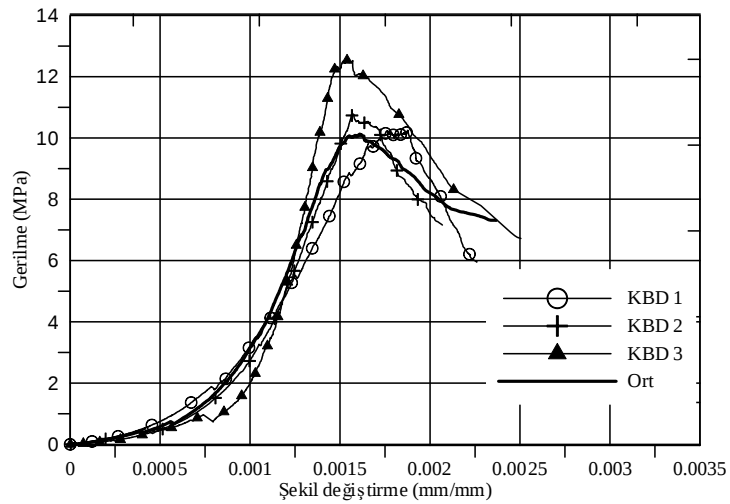


Şekil 3.6. Kagir duvar basınç dayanımı testleri.

Çizelge 3.7. Kagir duvarların basınç dayanımları.

Numune No	V (kN)	b (mm)	d (mm)	f (MPa)	E (MPa)	E/f
KBD-1	378	390,0	90,0	10,8	3419	379
KBD-2	414			11,8	3737	380
KBD-3	441			12,6	4073	388
Ortalama	411			11,7	3743	382
$f_k = f/1,2$				9,8		

KBD: Kagir duvar basınç dayanımı.



Şekil 3.7. Kagir duvar gerilme-şekil değiştirme grafiği.

3.4 CFRP Malzeme Özellikleri

Hasarlı numuneler üzerinde güçlendirme amaçlı uygulanan karbon lif takviyeli polimere (Sikawrap 230-C) ait karakteristik özellikler Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Lifli polimer uygulaması yapılan yüzeyler önce, toz ve gevşek malzemelerden arındırılmıştır. CFRP’nin duvar yüzeyine yapışması için iki bileşenli epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcı olan Sikadur-330 sürülmüştür. Epoksi reçinesine ait özellikler Çizelge 3.9’da görülmektedir.

Çizelge 3.8. CFRP malzeme özellikleri (URL-1).

Lif Tipi	Orta dayanımlı karbon fiber						
Dokuma Yapısı	Lif doğrultusu: 0° (tek doğrultulu). Çözü dokuması: Siyah karbon fiberler (toplam ağırlığın %99'u). Atkı dokuması: Beyaz termoplastik ısıl işleme tabi tutulmuş fiberler (toplam ağırlığın %1'i).						
Boyutları	<table><tr><td></td><td><u>Uzunluk</u></td><td><u>Kalınlık</u></td></tr><tr><td>1 Rulo</td><td>≥50 m</td><td>300 mm</td></tr></table>		<u>Uzunluk</u>	<u>Kalınlık</u>	1 Rulo	≥50 m	300 mm
	<u>Uzunluk</u>	<u>Kalınlık</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).						

Çizelge 3.9. Epoksi reçinesi malzeme özellikleri (URL-2).

Görünüm/ renk	Reçine A Bileşeni : macun kıvamlı Sertleştirici B Bileşeni: macun kıvamlı Renk: A Bileşeni : beyaz B Bileşeni : gri A+B bileşenleri: açık gri
---------------	--

Çizelge 3.9 (devam). Epoksi reçinesi malzeme özellikleri (URL-2).

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	$45 \times 10^6 / ^\circ\text{C}$ (-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. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Yapılan Deneyler

Deneysel çalışma kapsamında 1 tanesi referans numune olmak üzere toplamda 7 adet pres tuğladan örülmüş kemer numunesi eksenel kuvvet etkisi altında deneye tabi tutulmuştur. Kemerlerin eksenel kuvvet etkisine tabi tutulmasındaki amaç; kemer ayaklarında açılmaların meydana gelmesi ile oluşan hasarların yerlerini tespit ederek FRP uygulaması yapmaktır.

190 x 90 x 50 mm³ düşey delikli pres tuğla yığma birimlerinden oluşan kemer iki sütun üzerine oturtularak açıklığı 1020 mm olacak şekilde örülmüştür. U profil üzerine açılmış deliklerin alt ucundan cıvata ile sabitlenen 10 mm çapındaki nervürlü donatılar pres tuğla düşey deliklerinden geçirilerek kemer ayakları sabitlenmiştir. Bu şekilde deplasman ve dönmeler mesnetlerde sıfırlanmıştır. 190x190 mm² olan sütunların 350 mm yüksekliğine kadar yatay derzleri 10 mm iken, sütunun üstünde kalan kısımda ise yatay derzler 8 mm civarındadır. Düşey derzler ise 10 mm olacak şekilde imalat yapılmıştır. Derzlerde kullanılan harç karışımında çimento, kireç, kum ve su kullanılmış ve hacimsel olarak çimento, kireç, kum oranları sırasıyla 1/2/7 olarak imalat yapılmıştır.

Örme işlemi devam ederken kemerimizi ayakta tutabilmek için oluşturulmuş ahşap kalıbın üzerine dört tarafından sürgü kaynatılmış eğrisel çelik kalıp sürgüler kapalı olacak şekilde oturtularak kemerin örümü yapılmıştır (Şekil 4.1.a). Kemer numunesinin kilit taşına kadar olan net yüksekliği 670 mm iken pres tuğladan oluşan toplam yüksekliği 820 mm'dir. Pres tuğla ile örülmüş kısım Şekil 4.1.b'de görülmektedir. Yükleme kilit taşı hizası en üst noktasından düşey olarak yapılacağından üst sırada yer alan pres tuğlaların hasar görmemesi ve uygulanan yükün düzgün yayılması için en üst sırada yığma birimlerin üzerine 40 mm kalınlığında lento kiriş yapılmıştır (Şekil 4.1.c). İmal edilen numunelere 28 gün kür uygulandıktan sonra deneysel çalışmaya başlanmıştır. Kemer ölçülerine ait model Şekil 4.1.d'de görülmektedir.



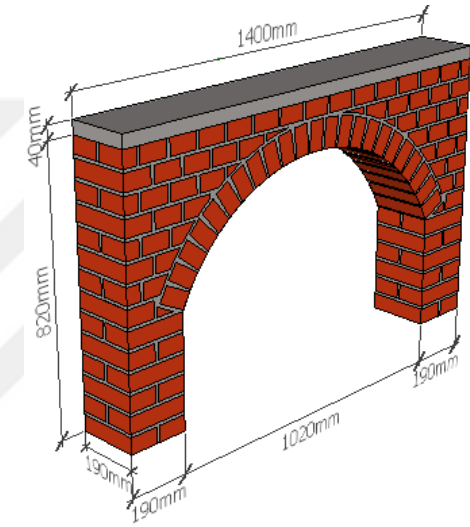
(a)



(b)



(c)



(d)

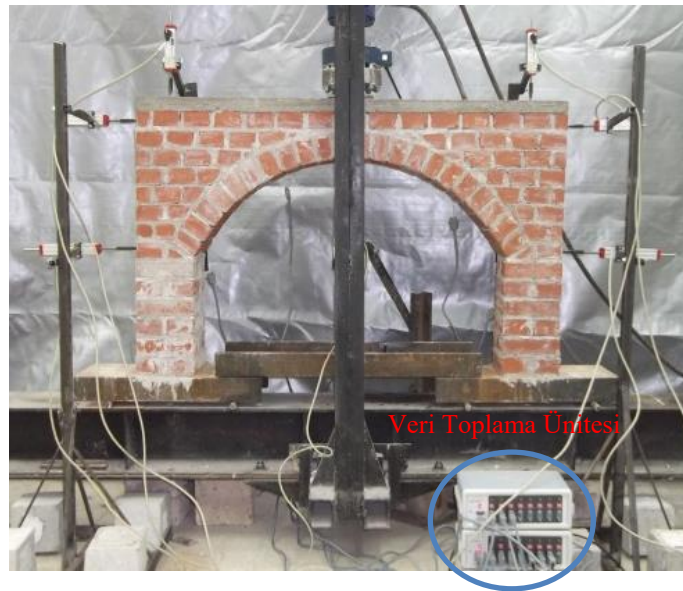
Şekil 4.1. Kemer örümü ve ölçüleri.

Deney setinde yük hücreğine iletilen 500 kN kapasiteye sahip hidrolik krika ile yapılan yükleme manuel kontrollü hidrolik pompa yardımıyla yapılmıştır. Yük hücreği üzerine takılan mekanizma ile iletilen yük miktarı bilgisayarda ölçülebilmektedir. Kuvvet ve yer değiştirme kontrollü olarak ayarlanabilen deney ölçüm düzeneğinde yapılan deneyler kuvvet kontrollü olarak ortalama 0,3 kN/sn oranı ile yapılmıştır. Numunelerin taşıyabileceği maksimum yük değerine ulaşılmasının ardından yer değiştirme kontrollü olarak yapılmış ve ortalama yer değiştirme miktarı 5 mm/sn olarak yüklemeye devam edilmiştir. Numunelerde uygulanan yük ile oluşacak düşey ve yatay deplasman değerleri bütün kemerlerde aynı geometrik yerlere sabitlenen 7 adet LVDT (Linear Variable Diferential Transformer) yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 4.2’de deney düzeneği ve meydana gelecek deplasmanları ölçmek amacıyla kullanılan LVDT yerleşim düzeni görülmektedir.

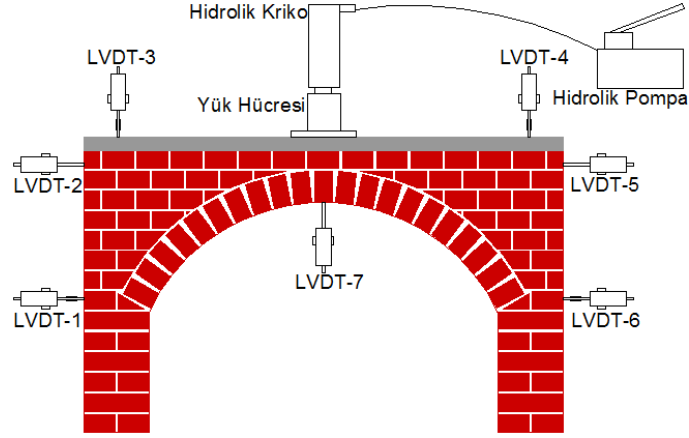
Numunelerde düşey yönde yerleştirilen LVDT-3 ve LVDT-4 kemer sütunlarında meydana gelen deplasmanları, LVDT-7 ise kilit taşı hizasındaki deplasmanları ölçebilmek içindir. Yatay yöndeki deplasmanları ölçebilmek için ise üzengi taşı hizasına LVDT-1 ve LVDT-6, kemerlerin en üst bölgesine LVDT-2 ve LVDT-5 yerleştirilmiştir.

Ayrıca farklı yerlere yerleştirilen şekil değiştirme ölçerler (strain gauge) 120 Ohm dirençli ve 10 mm boyunda olup deformasyon ölçümü için kullanılmıştır. İnce bir telin ince şerit üzerinde tekrarlı sarılması ile oluşan strain gaugeler üzerine yapıştırılan malzemeye etkiyen yük ile şekil değişikliğine uğrarlar. Tellerde şekil değişikliği nedeniyle meydana gelen çap değişimiyle tellerin üzerinden geçen akımın voltajını değiştirir. Bu voltaj değişimi ölçülerek tellerdeki ve dolayısıyla üzerine yapıştırılan parçadaki şekil değişimi ölçülmüş olur. Kemer üzerine yerleştirilen strain gaugelerden anlamlı değerler ölçülememiştir.

Deney düzeneğinde yük hücresi, deplasman ölçerler (LVDT) ve strain-gaugeler veri toplama ünitesine bağlanmıştır. Böylece yükleme neticesinde oluşan değişimler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Veri toplama ünitesi Şekil 4.2’de görülmektedir.

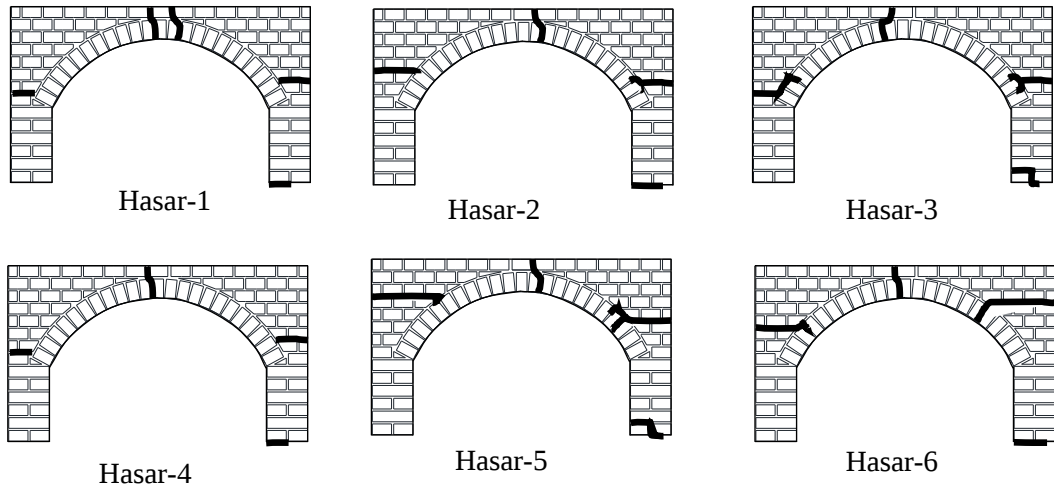


Şekil 4.2. Deney düzeneği ve LVDT yerleşim düzeni.



Şekil 4.2 (devam). Deney düzeneği ve LVDT yerleşim düzeni.

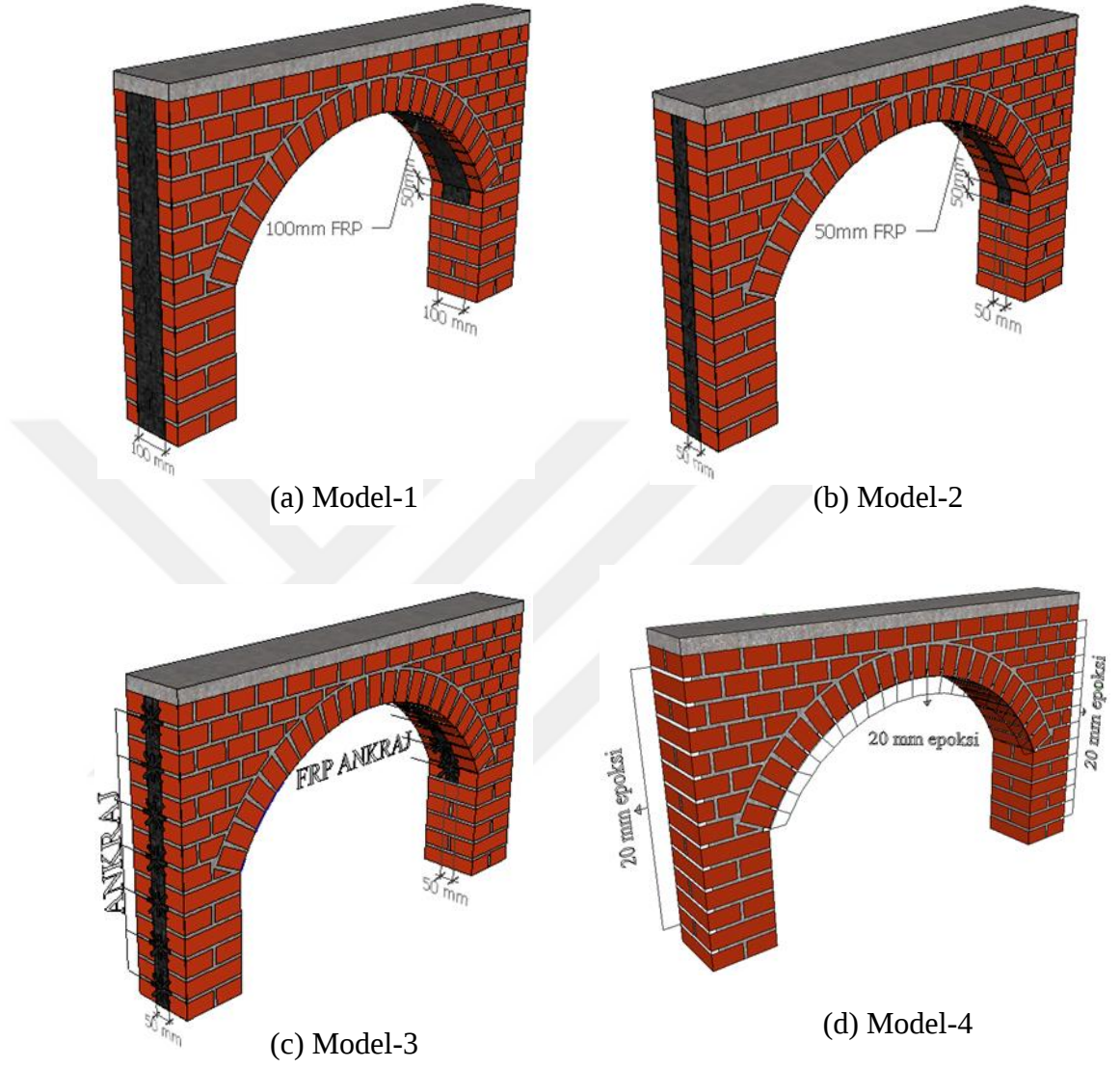
Örülen ilk kemer referans numune olarak isimlendirilmiş ve numune üzerinde hiçbir onarım uygulaması yapılmadan 28 gün bekletilerek deneye tabi tutulmuştur. Referans numunenin taşıdığı yük ve yatay-düşey yer değiştirmeler ana kriter olarak kabul edilmiştir. Diğer numunelerde benzer şekilde örülüp 28 gün bekletildikten sonra referans numunesi göçme yükünün %75'ine denk gelen yükleme yapılarak (9,24 kN) numunelere belirli oranlarda çatlaklar verilmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi numunelerde aynı yük değerlerinde benzer çatlak oluşumları gözlenmiştir. Numunelerin maksimum taşıma gücüne kadar yükleme uygulanmadığından taşıma kapasitelerinden ziyade oluşan çatlaklar dikkate alınmıştır. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere her bir kemerde meydana gelen çatlak formları birbirine oldukça yakındır.



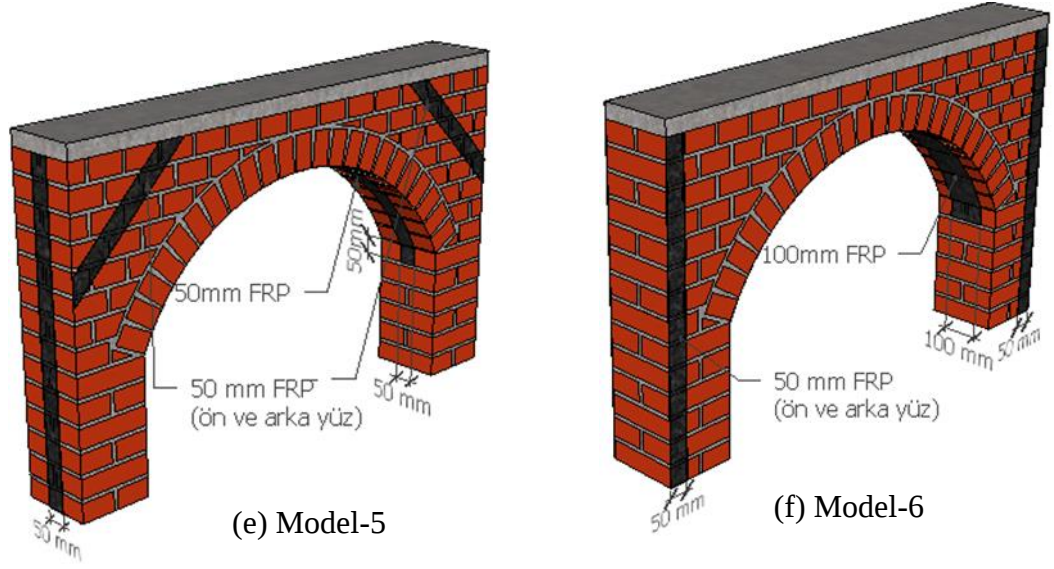
Şekil 4.3. Hasar verilmiş numune çatlakları.

Hasar verilmiş numuneler üzerinde epoksi ve FRP uygulamaları yapılmıştır. Bu numunelerin 5'inde farklı yerleşim düzenleri ve şerit kalınlıklarına sahip FRP uygulamaları yapılmışken, 1 tanesinde ise derzlerdeki harcın oyulması ile yerine

epoksi doldurularak onarımı yapılmıştır. Şekil 4.4'te bu araştırmada incelenen FRP ve epoksi uygulamaları görülmektedir.



Şekil 4.4. Kemer üzerinde FRP ve epoksi uygulamaları.



Şekil 4.4 (devam). Kemer üzerinde FRP ve epoksi uygulamaları.

4.1.1 Referans numune

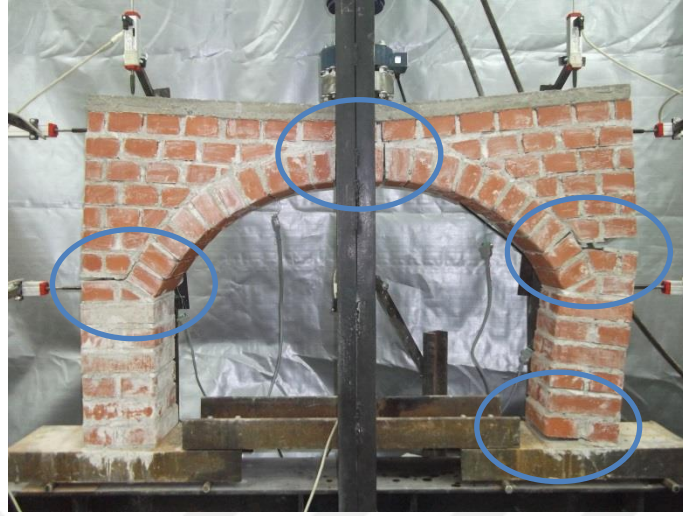
Hasarlı numuneler üzerinde yapılan uygulamalar öncesinde ilk olarak referans numune örülmüştür. Bu numune 28 gün bekletilmesinin ardından deney düzeneğinde düşey tekil kuvvet etkisi altında yükleme yapılmıştır. Referans numunenin deney düzeneğinde yükleme öncesi hali Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Referans numune yükleme öncesi hali.

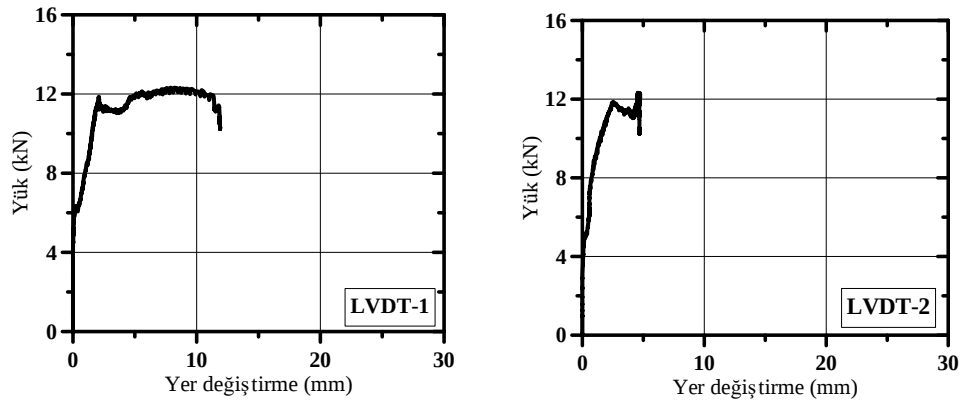
Referans olarak örülen numunenin kilit taşı hizasından uygulanan yüklemeye 8 kN yük mertebesinde sonra sağ ve sol sütunda yer alan LVDT-1 ve LVDT-6 üst kısmındaki yatay derzlerde açılmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde ise kilit taşının düşey derzlerinde ve sağ mesnette ayrılma

meydana gelmiştir. Referans olarak örülen numunenin en fazla 12,32 kN yük taşıdığı görülmüştür. Şekil 4.6’da numunenin göçmeden sonraki hali görülmektedir.

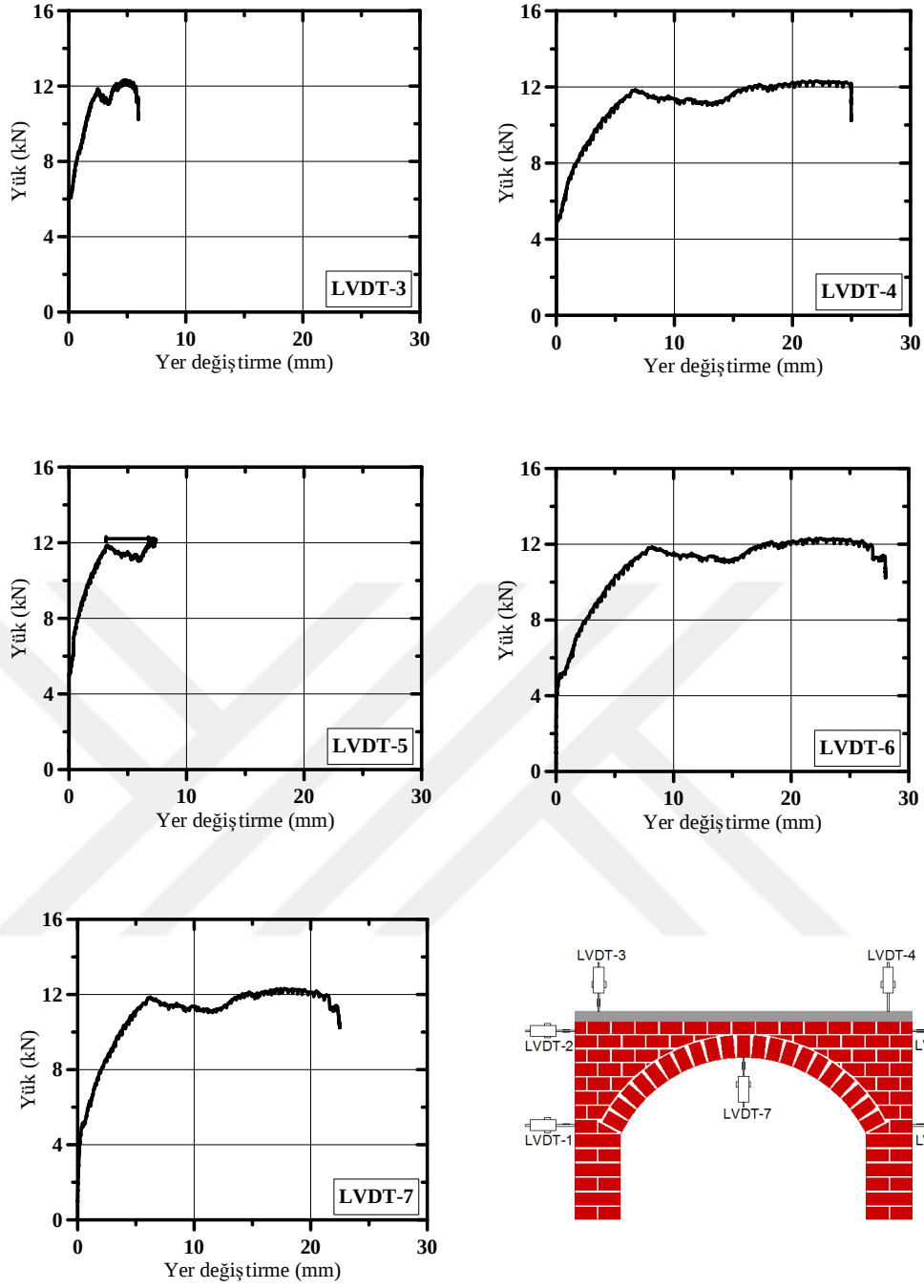


Şekil 4.6. Referans numune yükleme sonrası hali.

Numune üzerine yapılan yükleme ve yerleştirilen deplasman ölçerlerden (LVDT) alınan verilerden yük – yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.7). Bu grafiklere maksimum yük kapasitesinde kemerde en fazla açılmaların meydana geldiği sağ tarafta LVDT-6’da 22,14 mm yer değiştirme meydana gelmiştir. Kemer kilit taşı alt hizasındaki LVDT-7’de meydana gelen deplasman ise 17,41 mm ölçülmüştür.



Şekil 4.7. Referans numune yük- yer değiştirme grafiği.



şekil 4.7 (devam). Referans numune yük- yer değiştirme grafiği.

4.1.2 Model-1

Model-1’de önceden hasar verilmiş kemerin üzerinde FRP uygulaması yapılacak kısımları öncelikle toz, parça vb. şeylerden temizlenmiş ardından FRP’nin yüzeye yapışmasını sağlayan 2 bileşenli Sikadur-330 epoksi reçinesi sürülmüştür. Tasarımı şekil 4.4.a’da verilen Model-1 kemerinin iç kısmında 50 mm üzengi taşı hizası altından başlayacak şekilde 100 mm genişliğinde şerit FRP, numunenin yan yüzeylerinde ise mesnetlerden kemerin en üst noktasına kadar yine 100 mm

genişliğinde şerit FRP uygulaması yapılmıştır. FRP uygulaması öncesi hasarlı kemer numunesi ve FRP uygulanmış hali Şekil 4.8’de görülmektedir.



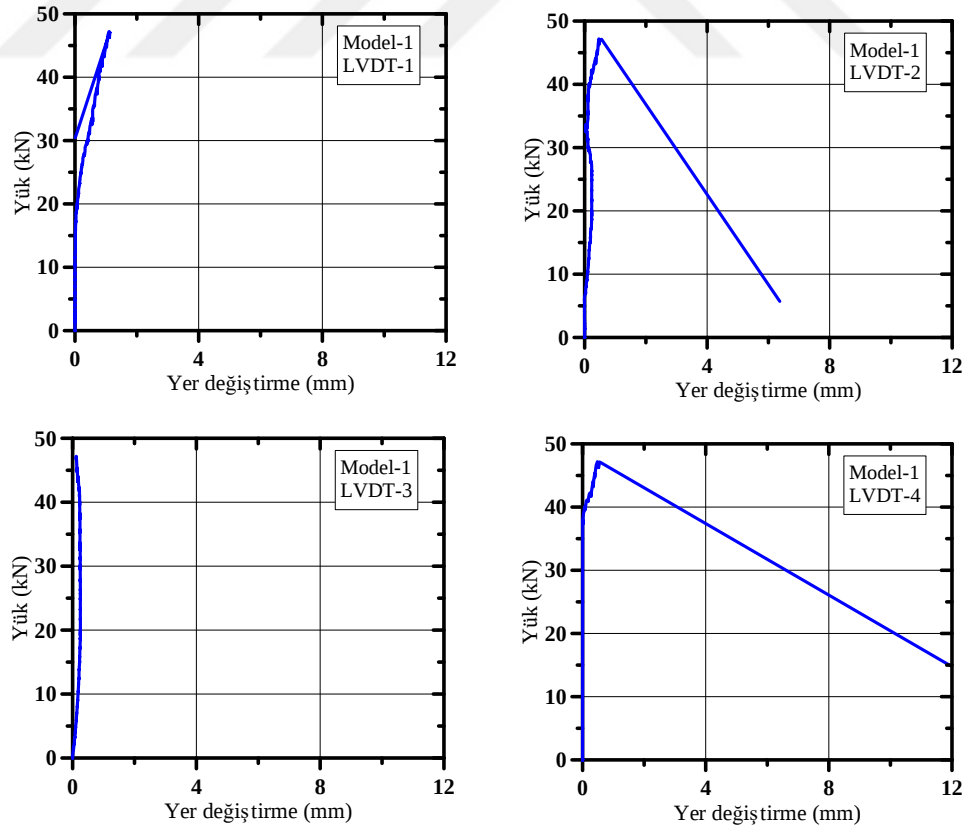
Şekil 4.8. FRP uygulaması öncesi hasarlı hali ve FRP uygulanmış hali.

Model-1’e yapılan yüklemede referans numunesinin yaklaşık 4 katı kadar yük taşıdığı ve ani kırılma meydana geldiği görülmüştür. Referans numunedeki üzengi taşı hizasında meydana gelen yatay derz açılmalarının yerine sağ üst noktadan kemer taşlarına ulaşana kadar gelişen diyagonal çatlaklar oluşmuştur. Kilit taşının altında kemer iç yüzeyi boyunca uygulanan şerit FRP’nin yüzeyden sıyrıldığı ve kilit taşının üst kısmında sol yüzeye doğru yatay derzlerde açılmaların olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda kemer iç yüzeyindeki sağ sütunda FRP’nin uygulanan tuğlanın alt kısmındaki yığma birimde ezilme oluşmuş ve sağ mesnetin yüzeyden ayrıldığı gözlenmiştir. Model-1 deney sonrası hali Şekil 4.9’da görülmektedir.

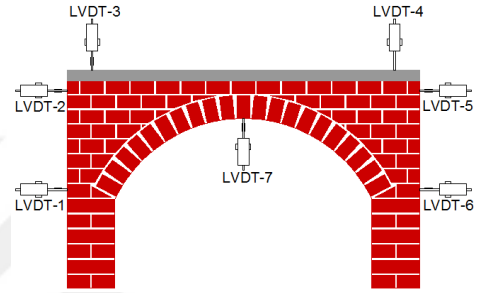
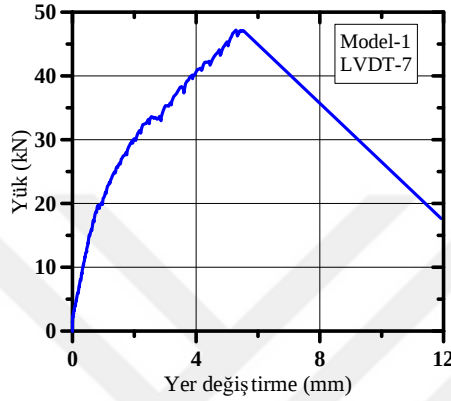
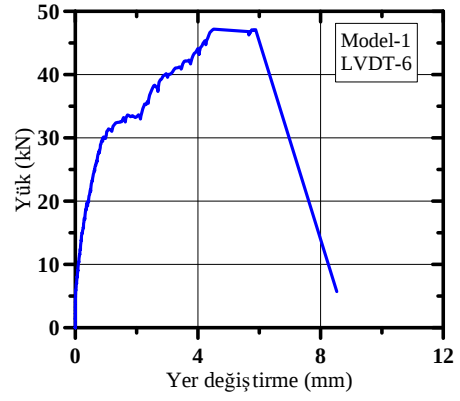
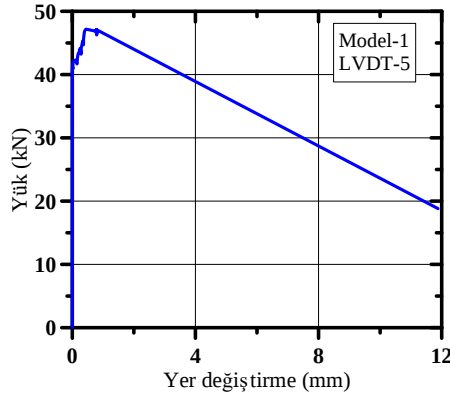
Model-1’in maksimum yük taşıma kapasitesi 47,18 kN olarak ölçülmüş olup yük bu seviyeden 5 kN yük mertebesine düşmüştür. Bu deneye ait yük – değiştirme grafikleri incelendiğinde maksimum yükte en fazla deplasmanı 5,29 mm ile kilit taşı altındaki LVDT-7 yapmıştır. Kemer duvarının sağ üst tarafında meydana gelen hasar neticesinde maksimum yüklemenin ardından sağ üstteki LVDT-4’ten 16,2 mm’ye kadar yer değiştirme değeri okunabilmişken; sol üstte yer alan LVDT-3’te ise neredeyse hiç yer değiştirme meydana gelmemiştir. Model-1’e ait yük – yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.10’da verilmektedir.



Şekil 4.9. Model-1 yükleme sonrası hali.



Şekil 4.10. Model-1 yük- yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.10 (devam). Model-1 yük- yer değiştirme grafiği.

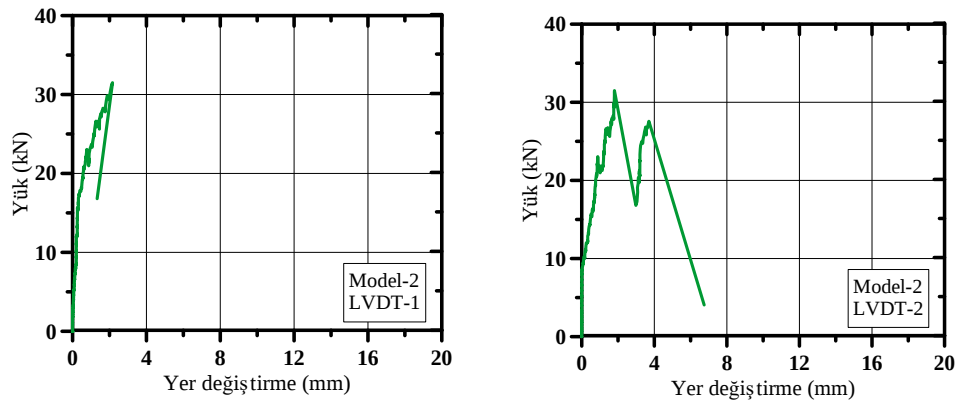
4.1.3 Model-2

Model-2’de, hasarlı kemer numunesi üzerinde şerit FRP genişliği etkisini incelemek üzere Model-1’deki FRP uygulanan yüzeyler benzer olacak şekilde yalnız şerit FRP genişliğinin yarıya düşürülerek 50 mm uygulanması ile yapılmıştır. Kemer duvara uygulanan düşey tekil kuvvet etkisinde 10 kN yük düzeyinde kilit taşı altında kemer iç yüzeyindeki FRP nin yine yüzeyden sıyrılmaya başlamıştır. 30 kN yük düzeyinde ise kemerin sağ ve sol yan yüzeylerine uygulanan şerit FRP genişliğinin yetersiz olması nedeniyle yüzeyden ayrılmaya başladığı görülmüştür. Model-2’de Model-1’deki gibi ani göçme gerçekleşmiş ve maksimum yük taşıma kapasitesi 31,49 kN yük olarak ölçülmüştür. Model-2 göçme hali Şekil 4.11’de görülmektedir.

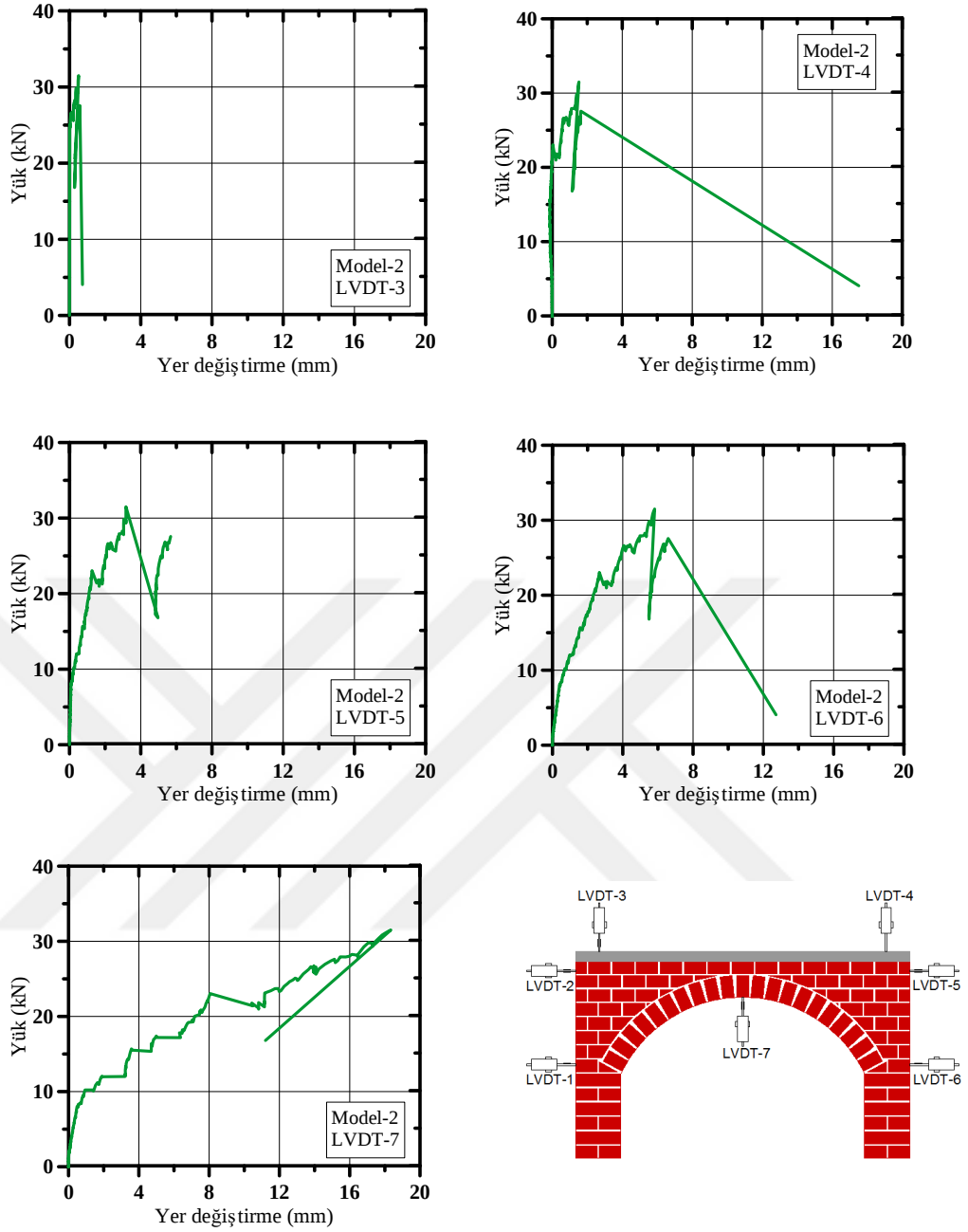


Şekil 4.11. Model-2 yükleme sonrası hali.

Maksimum yük taşıma kapasitesi olan 31,49 kN da ani kırılma sonucu yük 16,80 kN yük mertebesine düşmüştür. Yüklemeye devam edildiğinde numunenin yük almaya devam ettiği görülmüş 27,56 kN yükünde tekrar ani kırılma sonucu yükün 4 kN mertebesine düşmüştür. Kırılma şekli incelendiğinde Model-1’dekine benzer bir kırılma olmuş yalnız sağ üstte tuğlada kırılma gözlenmiştir. Ayrıca sağ mesnette diğer numunelerdeki gibi açılma olduğu görülmüştür. Yük – yer değiştirme grafiklerine bakıldığında en fazla deplasman 18,34 mm ile LVDT-7’de olmuştur. Model-2’ye ait yük – yerdeğiştirme grafiği Şekil 4.12’de verilmektedir.



Şekil 4.12. Model-2 yük- yer değiştirme grafiği.

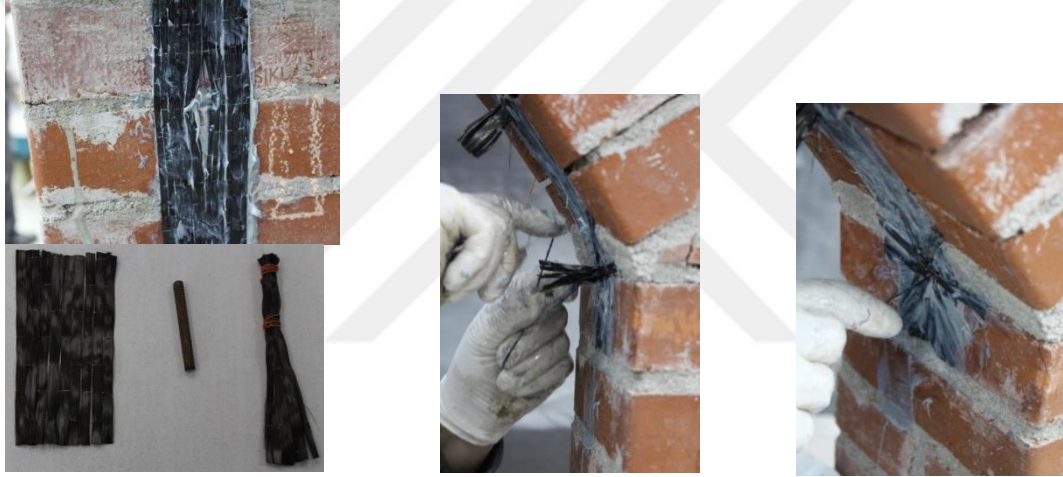


şekil 4.12 (devam). Model-2 yük- yer değiştirme grafiği.

4.1.4 Model-3

FRP ile yapılan Model-1 ve Model-2 uygulamalarında numunelerin yük taşıma kapasitelerinin FRP'nin yüzeyden sıyrılması ile sonlandığı görölmüştür. Bu nedenle FRP sıyrılmalarını engelleyebilmek adına ankraj uygulaması yapılarak taşıma gücünde ve deplasmanlarda meydana gelen değişimler Model-3 üzerinde incelenmiştir. Model-3'te FRP yerleşim düzeni ve şerit FRP genişliği Model-2 ile aynı olacak tasarımda, FRP'nin yüzeyden sıyrılmaması için şerit FRP uygulanacak

yüzeylerde iki derz aralığında bir tane olacak şekilde 10 mm çapında 50 mm derinliğinde ankraj delikleri açılmıştır. FRP uygulaması yapılan yüzey ve iki derz aralığında bir olarak açılan delikler toz vb. malzemelerden temizlenerek FRP uygulanmasına hazır hale getirilmiştir. Ankrajlar derzlere yerleştirilecek sonsuz dişli etrafına FRP sarılarak elde edilmiştir. FRP uygulanacak yüzeye epoksi reçinesi sürülmüş, üzerine şerit FRP yapıştırılmış ve ankrajların olduğu yerlerde FRP kesilerek deliklerin içersinide epoksi reçinesi doldurulmuştur. Epoksi ile doldurulan deliklere önceden hazırlanmış ankrajlar yerleştirilmiş, 50 mm delik uzunluğunun dışında kalan sadece FRP'den oluşan ankraj bölümü dairesel olarak (fan) açılmış şerit FRP üzerine yapıştırılmıştır. Şekil 4.13'te Model-3'teki ankraj uygulaması verilmektedir.

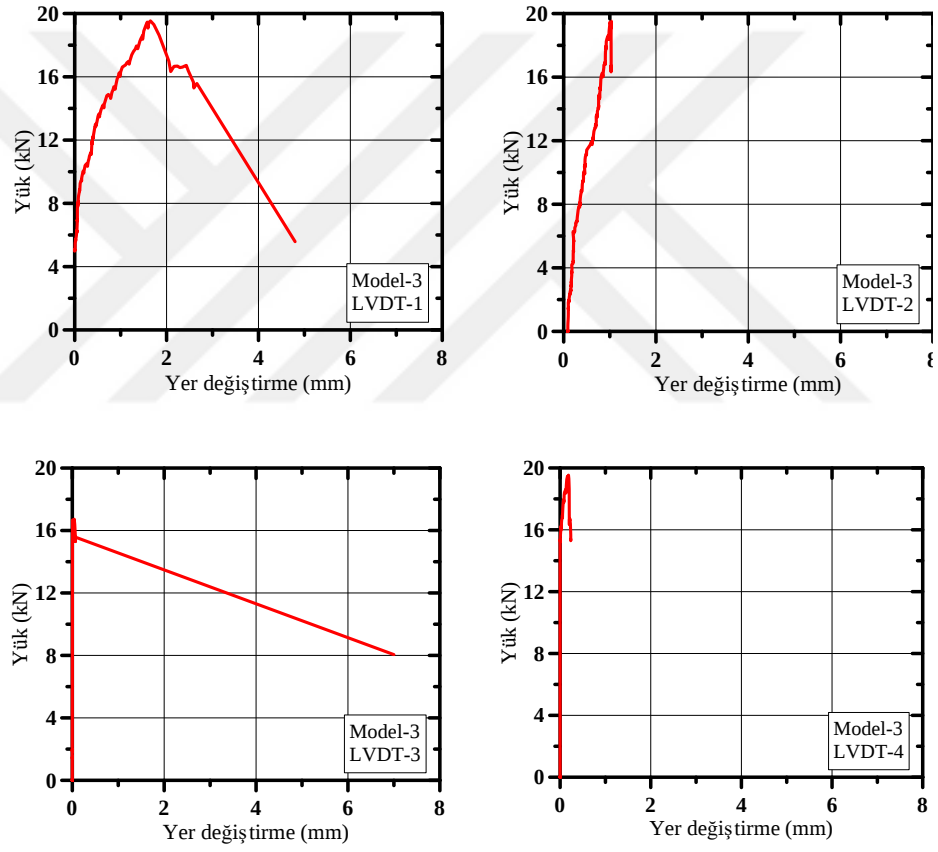


Şekil 4.13. Ankraj uygulamaları yapılan Model-3.

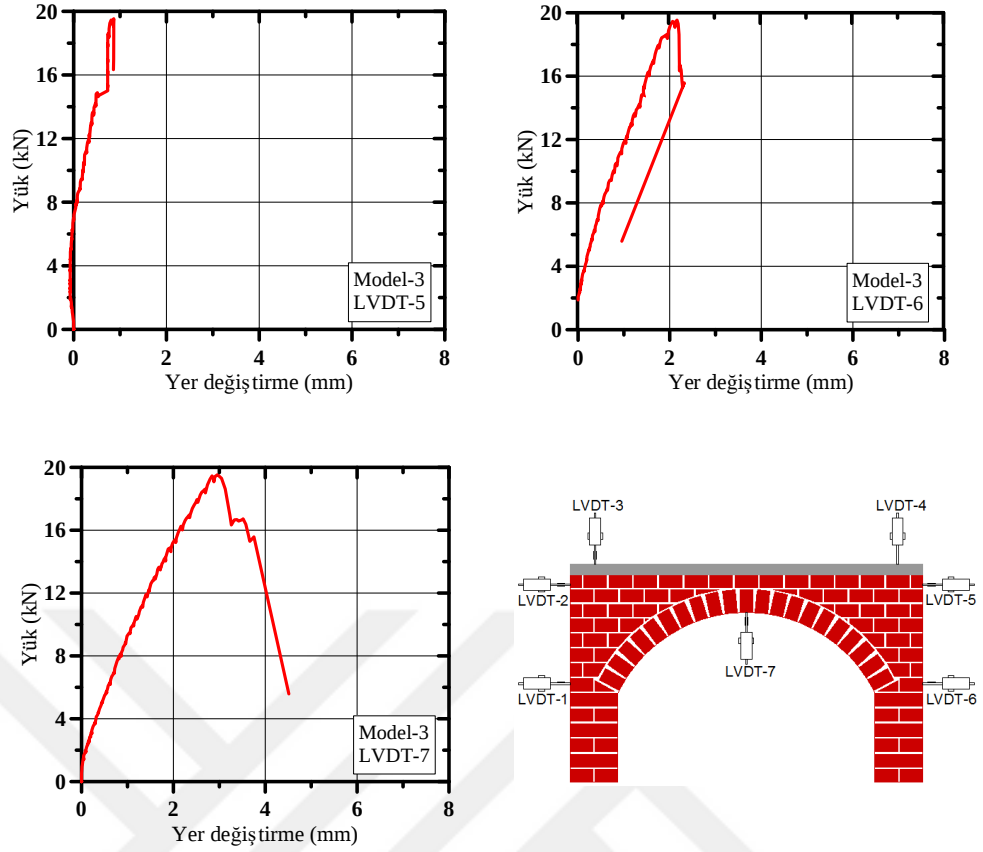
Model-3'te çatlaklar maksimum yük taşıma kapasitesi dolaylarında meydana gelmiştir. Kemer yayının sol üstündeki derzlerden başlayarak oluşan çatlakların kilit taşına kadar ilerlediği görülmüştür. Ayrıca sol üst noktadan derzler boyunca kemer yayına kadar açılmaların olduğu gözlenmiş, ani kırılma sonucunda iç sol mesnet bölgesinde harçta ezilmeler görülmüştür. Numuneye ait yükleme sonrası hali Şekil 4.14'te verilmiştir. Model-3'te yapılan ankraj uygulaması ile FRP'nin yüzeyden sıyrılmasının engellendiği görülmüş, bunun yanında Model-3'te maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirme miktarları LVDT-2, LVDT-3, LVDT-4 ve LVDT-5'te 1 mm nin altında okunmuştur. Yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Model-3 yükleme sonrası hali.



Şekil 4.15. Model-3 yük- yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.15 (devam). Model-3 yük- yer değiştirme grafiği.

Maksimum yük taşıma kapasitesi 19,53 kN çıkan Model-3'te bu yükteki en büyük deplasman 2,96 mm ile LVDT-7'de oluşmuştur.

4.1.5 Model-4

Kemer numuneleri içerisinde görünümü bozmayacak şekilde uygulama yapılan Model-4'te sütun yan yüzeylerindeki ve sadece kemer iç yüzeyindeki derzler 20 mm oyularak boşaltılmıştır. Boşaltılan derzlerin parçalar ve tozlardan temizliği yapılmış, ardından derzler epoksi esaslı iki bileşenli (Concresive 1406) harç ile doldurulmuştur. Şekil 4.16'da derzlerin epoksi harcı ile doldurulması görülmektedir. İki bileşenden oluşan harcın karışım oranları ağırlıkça Bileşen A : Bileşen B = 3 : 1 olacak şekilde B bileşeni, A bileşeni içerisine dökülmek suretiyle homojen bir karışım oluşana kadar mekanik karıştırıcılar yardımı ile yapılmış ardından uygulamaya geçilmiştir. Concresive 1406 teknik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Derzlerin epoksi harcı ile doldurulması.

Çizelge 4.1. Concessive 1406 teknik özellikleri (URL-3).

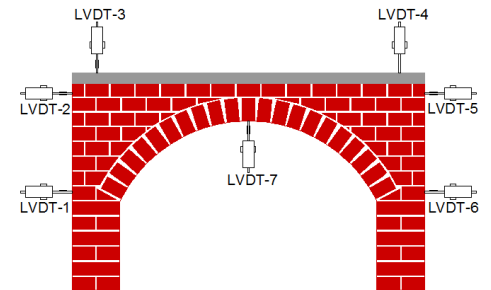
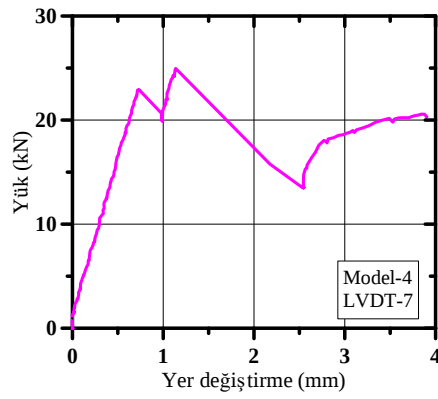
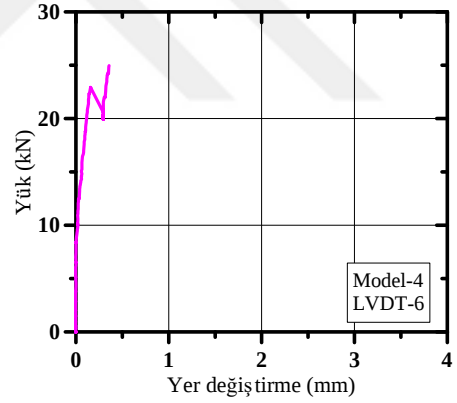
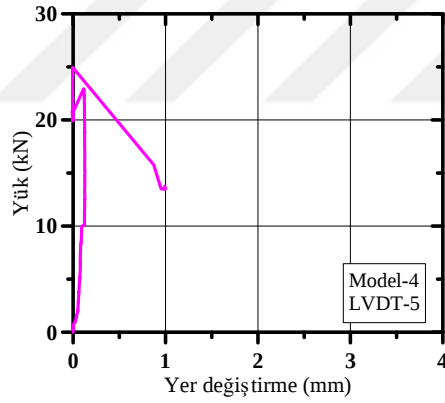
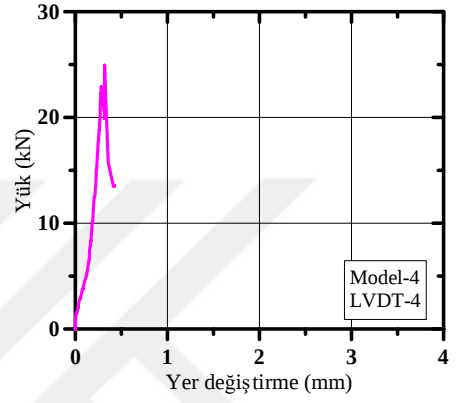
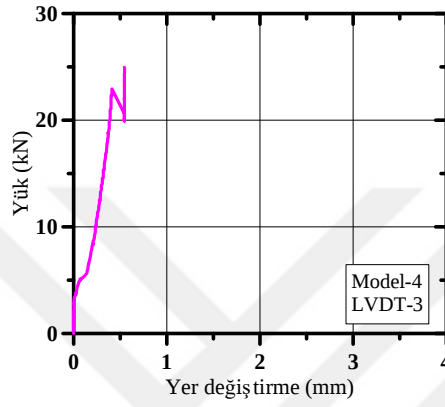
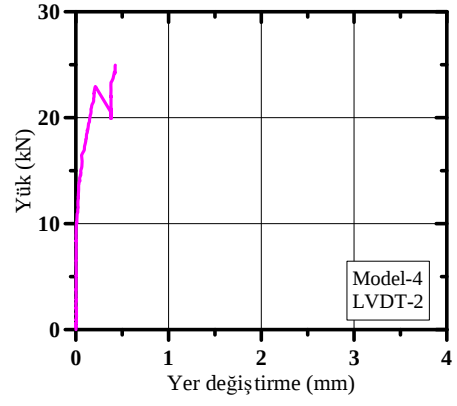
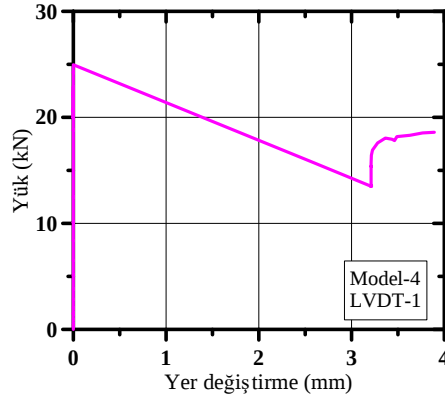
Malzemenin Yapısı Concessive 1406 Bileşen A Concessive 1406 Bileşen B	Epoksi Reçine Epoksi Sertleştirici
Renk	Gri
Karışım Yoğunluğu	1,70+0,05 kg/litre
Basınç Dayanımı (TS EN 196) 1 gün 7 gün	30 N/mm ² 75 N/mm ²
Eğilme Dayanımı (TS EN 196) 1 gün 7 gün	17 N/mm ² 25 N/mm ²
Yapışma Dayanımı (28 gün) Betona Çeliğe	3,0 N/mm ² 3,5 N/mm ²
Uygulama Kalınlığı	Min. 2 mm 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 Kürlenme Süresi (+20 °C)	7 gün

Model-4'e uygulanan düşey yüklemde 20 kN yük mertebesinde duvarın sol üst kısmında çatlaklar olduğu gözlenmiştir. Devam edilen yükleme neticesinde 24,95 kN yükte kemerde ani kırılma gerçekleştiği, sol üstten kemer yayına doğru diyagonal derz çatlağının geliştiği ve sol mesnet birleşim yerinden ayrılma olduğu görülmüştür. 13,5 kN yük mertebesine düşen yüke rağmen yüklemeye devam edilmiş 22,94 kN

yük düzeyinde kilit taşının sağ tarafında derzden ayrılma ile sağ mesnette açılma görülmüştür. Bunun yanında sağ taraf üzengi taşı iç kısmında yığma birimde kırılma, dış kısmında ise yatay derzde sıyrılma oluşmuştur. Epoksi esaslı harcın derzlerde çatlamlar oluşmasına engel olması nedeniyle tuğla elemanlarda kırılmalar gözlenmiştir. Şekil 4.17’de Model-4’ün yükleme sonrası hali görülmektedir. Bunun yanında maksimum yük kapasitesinde gerek yatay gerekse düşey yer değiştirme miktarları göz önüne alındığında olarak en az değeri Model-4 verdiği Şekil 4.18’de görülmektedir. Maksimum yükteki yer değiştirme miktarları LVDT-7’de 1,13 mm mertebesinde okunurken diğer LVDT’lerde okunan değerler 1 mm’in altında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.17. Model-4 yükleme sonrası hali.



şekil 4.18. Model-4 yük- yer değiştirme grafiği.

4.1.6 Model-5

Model-5, Model 2'deki FRP uygulamasına ek olarak duvarın arka ve ön yüzeylerine diyagonal biçimde FRP uygulamasının yapılması ile imal edilmiştir. Diyagonal şerit FRP genişliği diğer yüzeylere uygulanan şerit genişlikleri ile aynı olup 50 mm dir. Yapılan uygulama ile diyagonal yönde oluşabilecek çatlakların önlenmesi düşünülerek düşey yük taşıma kapasitesinde artış olacağı öngörülmüştür. Numuneye uygulanan yüklemede 27 kN yük düzeyinde kemer orta kısmı olan kilit taşı bölgesinde açılma görülmüş, 30 kN yük seviyesinde ise kemer alt kısmındaki FRP tuğladan sıyrılmaya başlamıştır. 36 kN yük düzeyinden itibaren kemerin sağ ayak kısmında derzlerde açılma ve tuğlalarda meydana gelen hasarlar görülmeye başlanmıştır. Maksimum yük olan 40,11 kN yük düzeyinde ise ani kırılma görülmüş, sol sütun kısmının kemer yayı ile birleşim kısmından derzde açılma olmuştur. Yapılan yüklemede Model-2'ye göre yük taşıma kapasitesinde ciddi artış sağlanmıştır. Göçme anında oluşabilecek diyagonal çatlaklara ön ve arka yüze yapıştırılan FRP engel olmuştur. Şekil 4.19'da Model-5'in yükleme sonraki hali verilmiştir. Sol yan yüzeye uygulanan şerit FRP'nin üzengi taşı hizasında koptuğu görülmüş ve diğer modellerde görülmeyen bir kırılma şekli meydana gelmiştir. Sağ sütun dış tarafında FRP üzerinde çatlakların olduğu ve pres tuğlalarda kırılmalar görülmüştür.

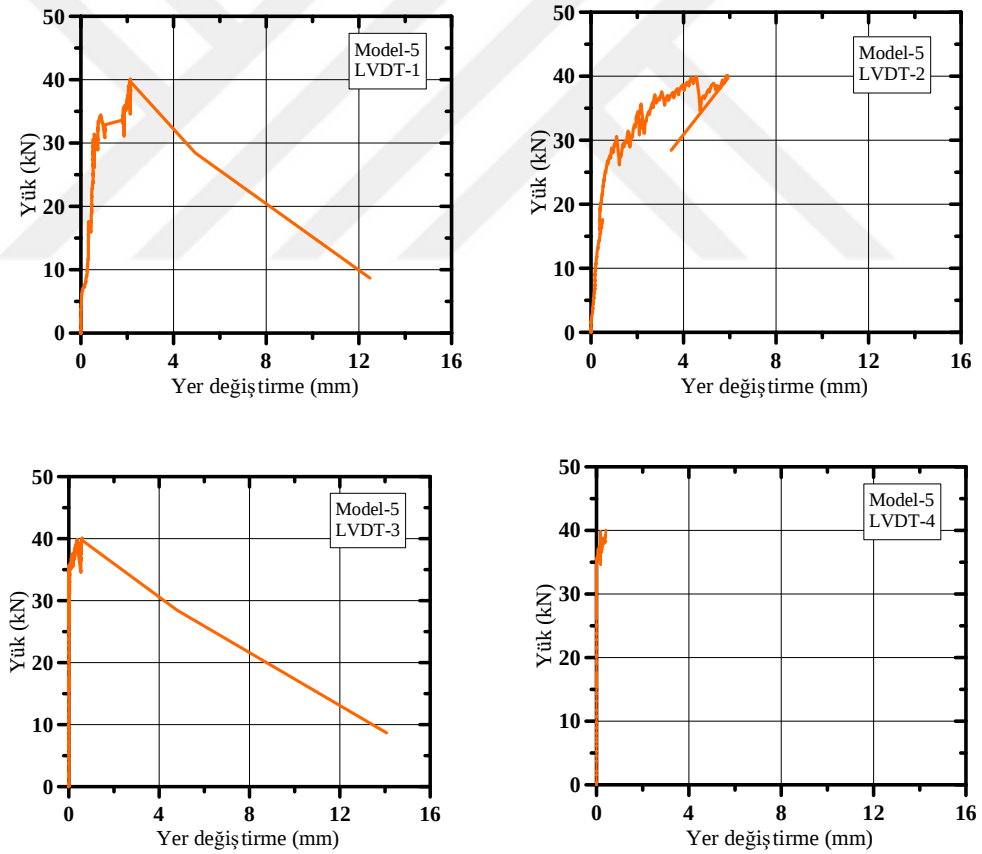


Şekil 4.19. Model-5 yükleme sonrası hali.

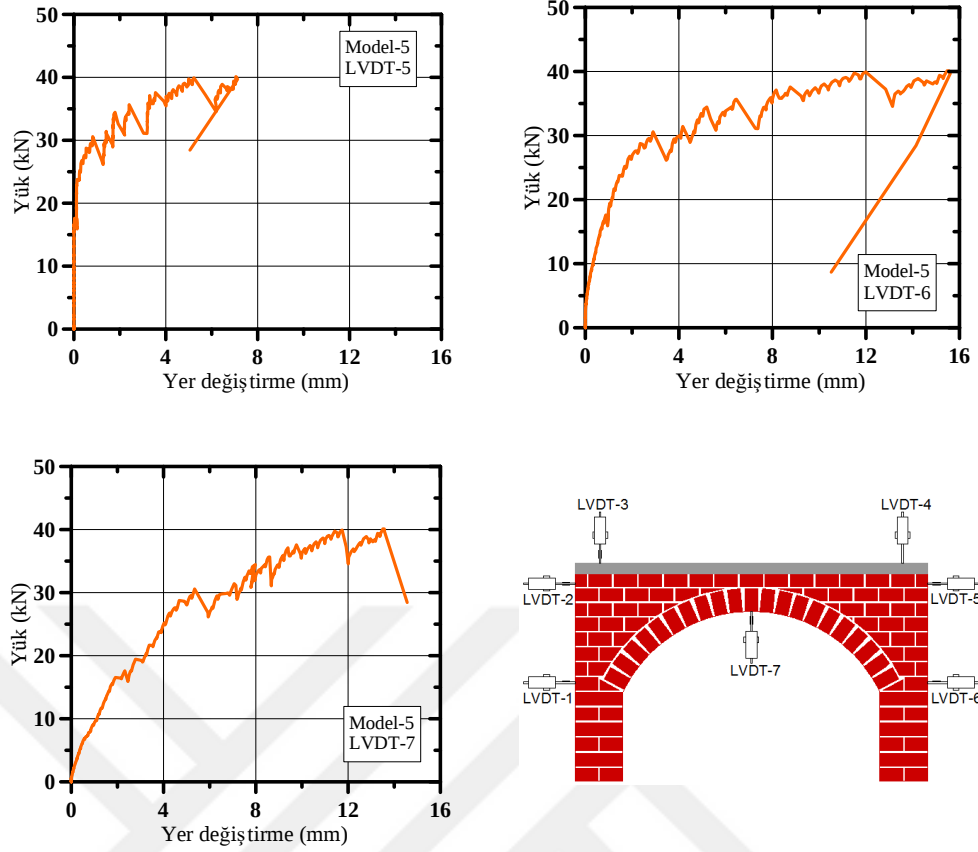


Şekil 4.19 (devam). Model-5 yükleme sonrası hali.

Etkiyen yüke göre yer değiştirme miktarları Şekil 4.20’de verilmiştir. Bu grafiklere göre en büyük deplasmanı sağ tarafta üzengi taşı hizasında yer alan LVDT-6 yapmıştır. Kilit taşı hizasında yerleştirilen LVDT-7’de ise maksimum yükte 13,51 mm deplasman meydana gelmiştir.



Şekil 4.20. Model-5 yük- yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.20 (devam). Model-5 yük- yer değiştirme grafiği.

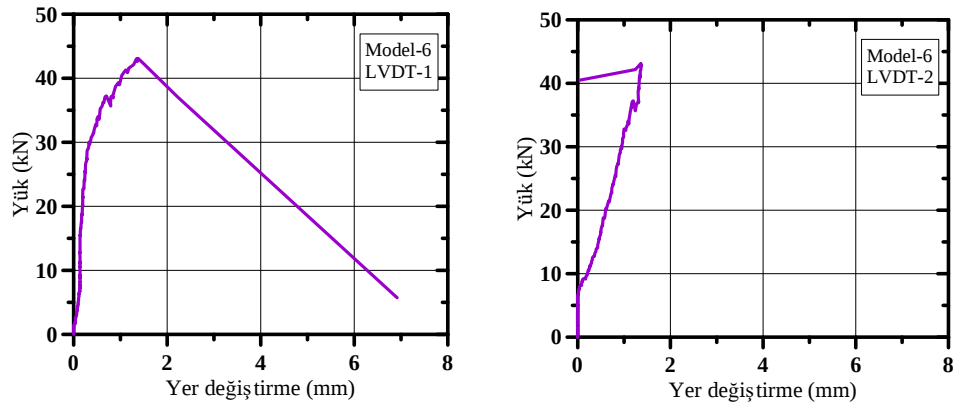
4.1.7 Model-6

Birbiri ardınca devam eden kemer sistemlerde kemer yan yüzeylerine şerit FRP uygulaması yapmak imkânsız olmaktadır. Bu durum gözönüne alınarak düşünülen Model-6'da özellikle üzengi taşı hizasında meydana gelebilecek çatlakları önleyebilmek için duvar ön ve arka yüzeyine yükseklik boyunca şerit FRP 50 mm genişliğinde uygulanırken, kemer iç yüzeyindeki eğri boyunca 100 mm şerit FRP uygulanmıştır. Kilit taşı hizasından uygulanan düşey yüklemede 15 kN yük mertebesinde kilit taşı üstünde yatay derzde çatlak gelişimi gözlenmiş, 32 kN yük düzeyinde ise çatlakların yığma birimlerde hasar oluşturduğu görülmüştür. Ani kırılmanın gerçekleştiği 43,11 kN yükte duvarın sol tarafından kemer eğrisine doğru gelişen diyagonal çatlak ile kemer eğrisi iç yüzeyinde FRP yüzeyden yığma birim parçası kopararak sıyrılmıştır. Şekil 4.21'de Model-6'nın yükleme sonrası hali görülmektedir.

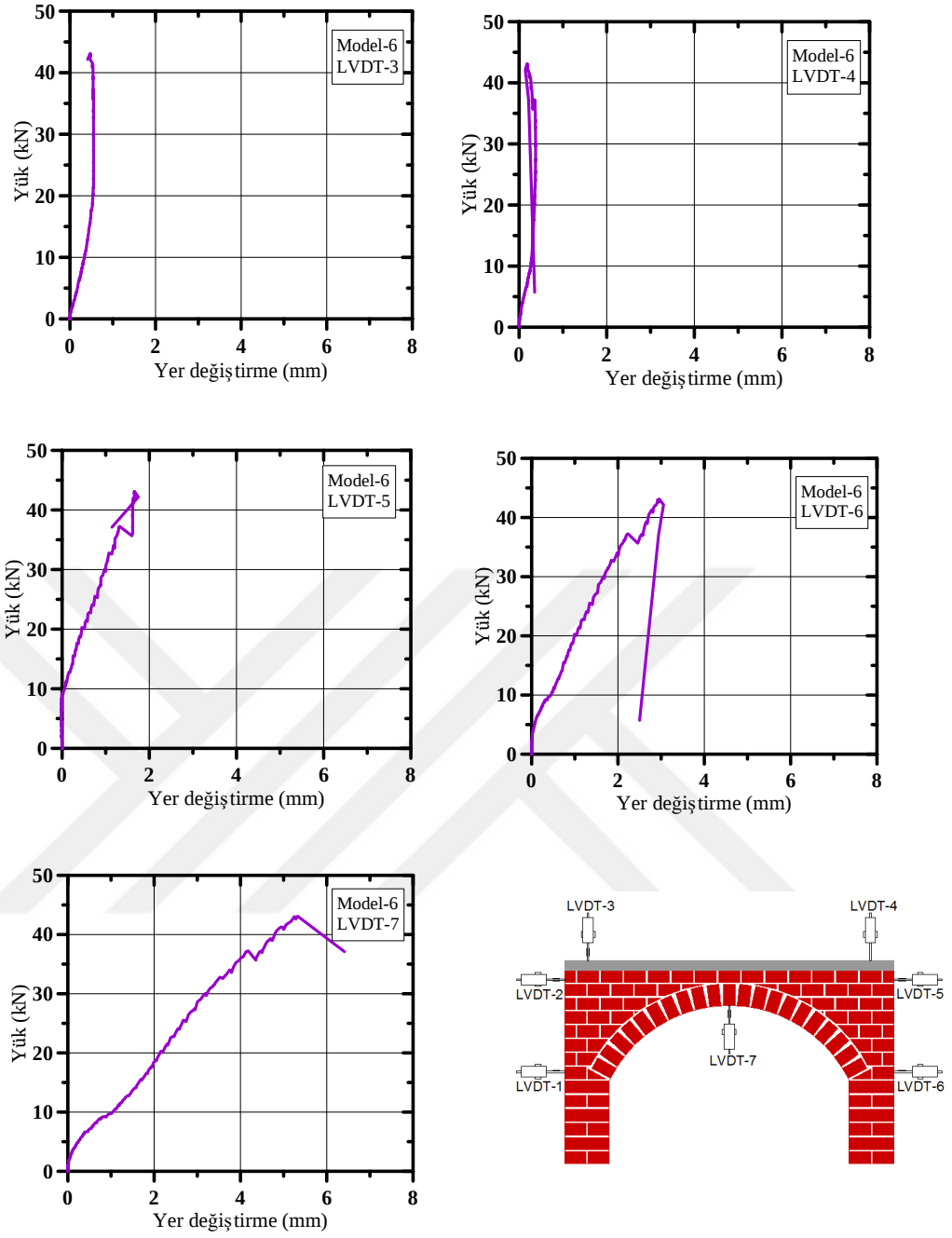


Şekil 4.21. Model-6 yükleme sonrası hali.

Yük – yer değiştirme grafikleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu grafiklerde maksimum yükteki yer değiştirme miktarı en fazla olan 5,32 mm ile LVDT-7’dir. Duvar üzerinde yer alan LVDT-4’te neredeyse hiç yer değiştirme yoktur. Grafikler Model-1 ile kıyaslandığında sistem olarak düşey deplasman miktarını azaltmasa da yatay deplasmana olumlu katkı sağladığı görülmektedir.



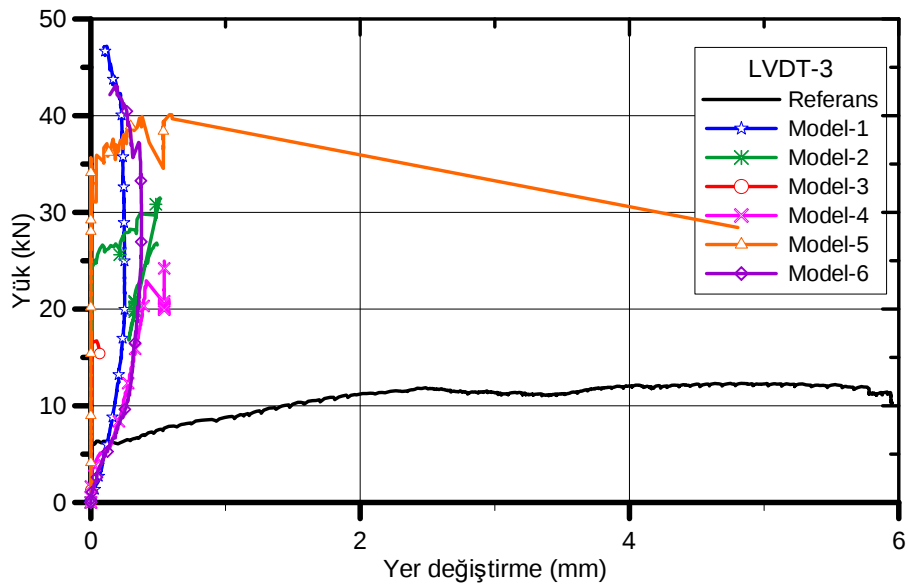
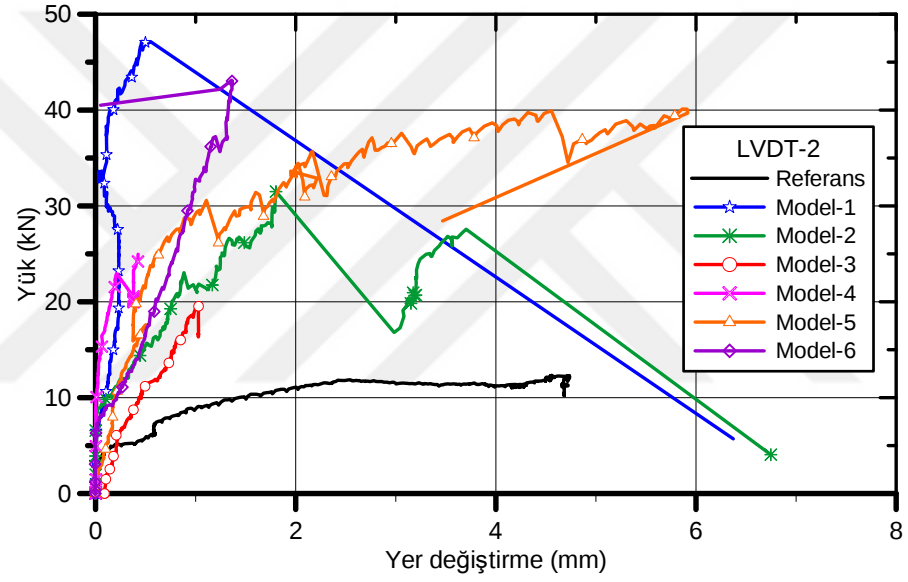
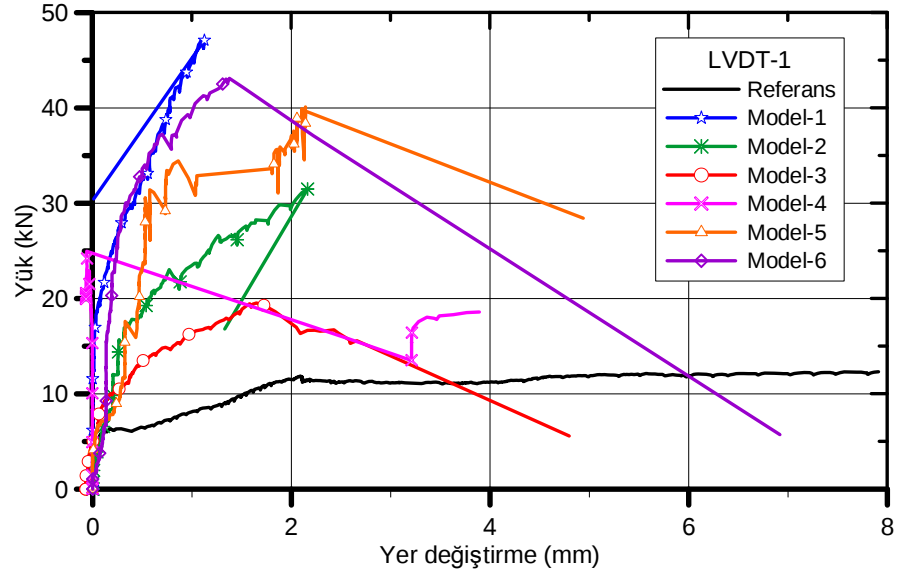
Şekil 4.22. Model-6 yük- yer değiştirme grafiği.



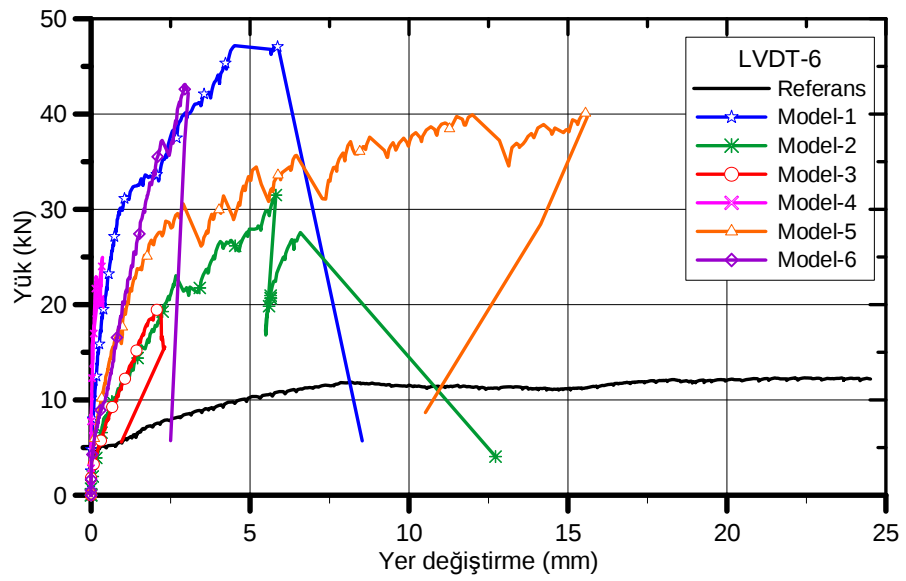
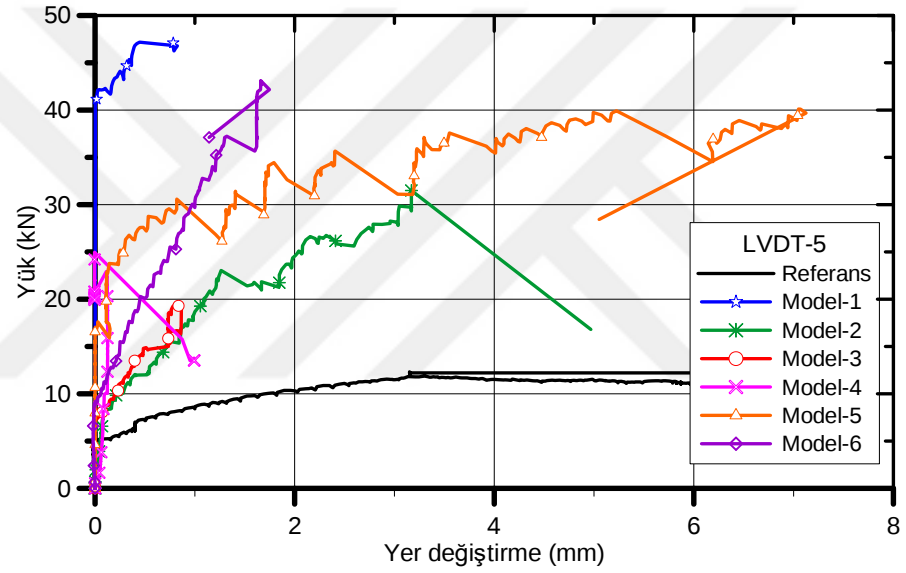
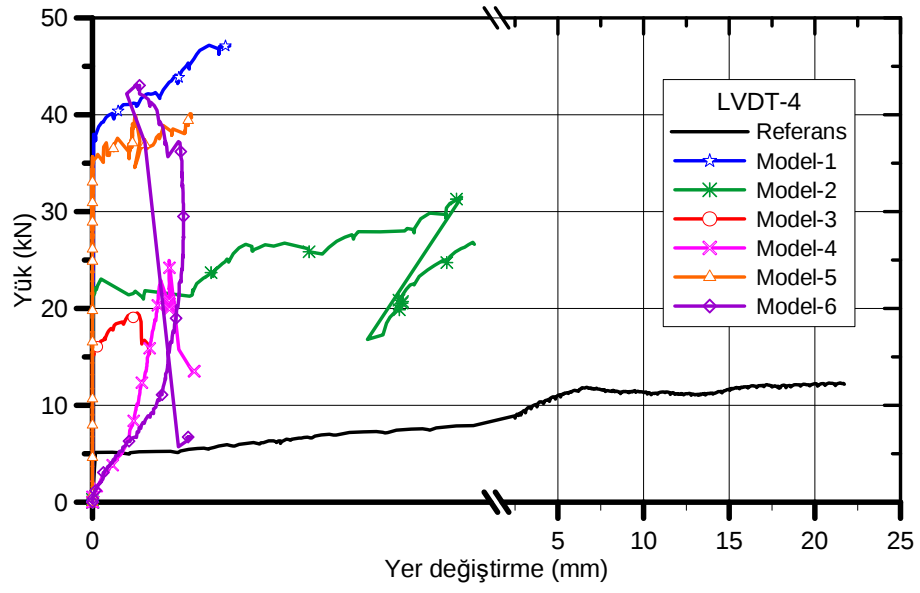
Şekil 4.22 (devam). Model-6 yük- yer değiştirme grafiği.

4.2 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

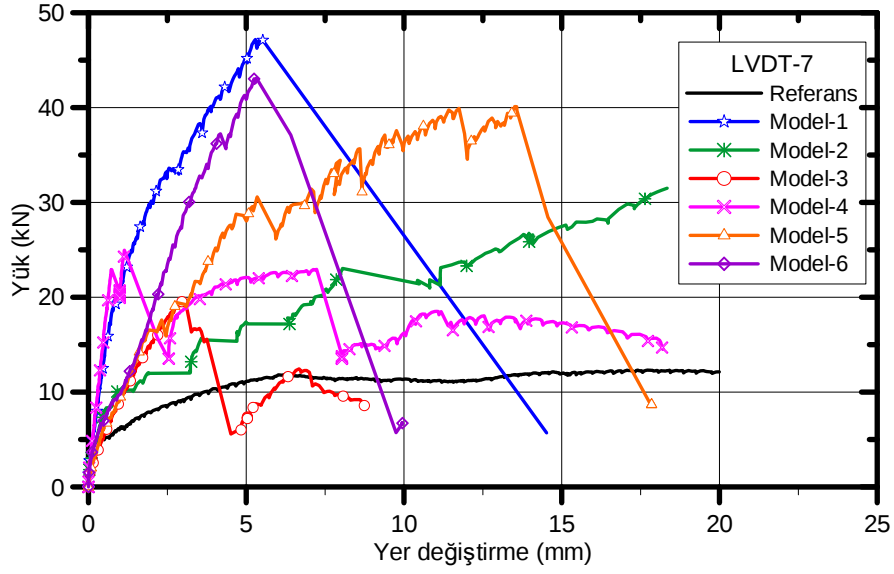
Deneyler kilit taşı hizasından eksenel yük uygulanarak yapılmış olup, bütün numunelerde LVDT'lerin yerleşim düzeni aynıdır. Uygulanan yüke bağlı olarak referans ve her bir model için aynı LVDT'lere ait yük-yer değiştirme grafik kıyaslamaları Şekil 4.23'te detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 4.23. Yük – Yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.23 (devam). Yük –Yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.23 (devam). Yük – Yer değiştirme grafikleri.

Şekil 4.23'e göre LVDT-1'de maksimum yüke karşılık gelen yatay yerdeğiştirme en fazla referans numunede 7,91 mm olarak meydana gelirken, en az yatay yerdeğiştirme ise kemer görünümünü bozmayacak bir tasarım olan sütun yan yüzeylerinden ve sadece kemer iç yüzeyinden boşaltılan derzlere epoksi uygulaması yapılan Model-4'te meydana gelmiştir.

LVDT-2'nin bulunduğu bölgede en fazla yer değiştirme kemer sırtından kilit taşına doğru derzde açılmanın ve kemer taşlarından düşey yönde derzde ayrılmanın görüldüğü Model-5'te olmuştur. Model-5'teki yer değiştirme 5,86 mm olarak okunmuş iken, LVDT-2 değerinin en az okunduğu numune 0,42 mm ile Model-4 tür.

Sütunlardaki düşey yer değiştirme değerlerini okuyabilmek için sütun üst kısımlarına sol tarafa LVDT-3, sağ tarafa LVDT-4 yerleştirilmiştir. Sütunlarda referans numunede meydana gelen yer değiştirmeler FRP ve epoksi harcı uygulamalarının yapıldığı model numunelere göre oldukça fazla çıkmıştır. Referans numunede LVDT-3 için okunan değer 4,75 mm iken LVDT-4 için okunan değer 21,48 mm olmuştur. LVDT-3 için en az düşey yer değiştirme 0,11 mm mertebelerinde Model-1'de ve Model-3'te meydana gelmiştir. LVDT-4 için en az yerdeğiştirme ise 0,18 mm ile Model-3 ve Model-6'da olmuştur.

LVDT-5'te meydana gelen en büyük yatay yer değiştirme 7,05 mm ile Model-5'te meydana gelmiş iken en az yatay yer değiştirme 0,005 mm mertebesinde Model-4'te olmuştur.

Üzengi taşı hizasında kemerin sağ tarafında yer alan LVDT-6'da meydana gelen yatay yer değiştirme LVDT-1 de olduğu gibi en fazla referans numunede 22,14 mm olarak meydana gelirken, en az 0,36 mm mertebesinde Model-4'te meydana gelmiştir.

LVDT-7 için en fazla düşey yer değiştirme 18,34 mm ile Model-2'de, en az yer değiştirme ise Model-4'te 1,14 mm olarak meydana gelmiştir. Model-2 uygulanan yük ile ilk başta kemer altında yer alan FRP şeritin yüzeyden sıyrılması yüklemenin ilerleyen aşamalarında ise sağ ve sol sütun bölgesindeki FRP şeritlerin sıyrılması düşey deplasman değerinin önemli derecede arttırmıştır.

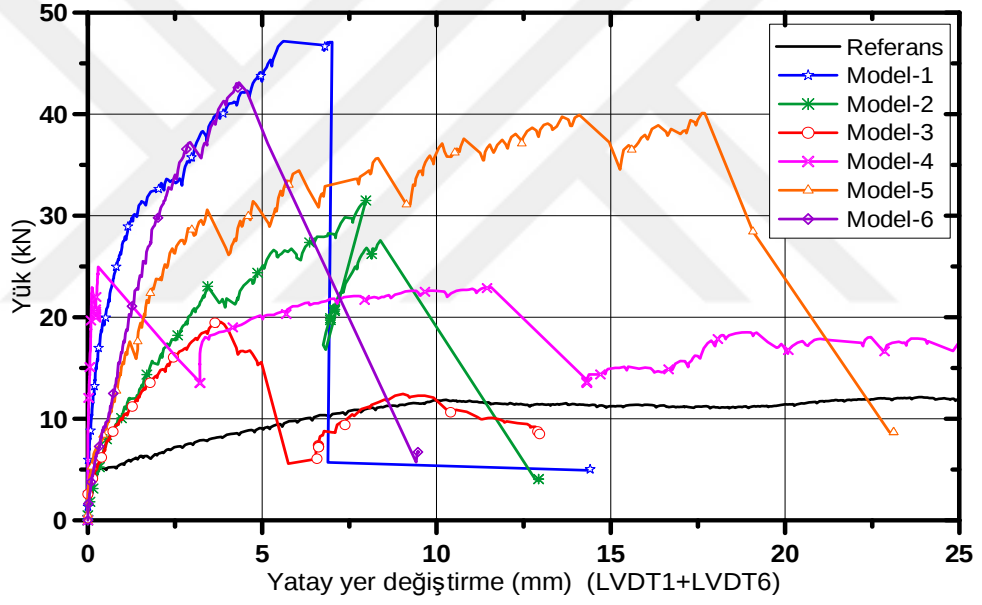
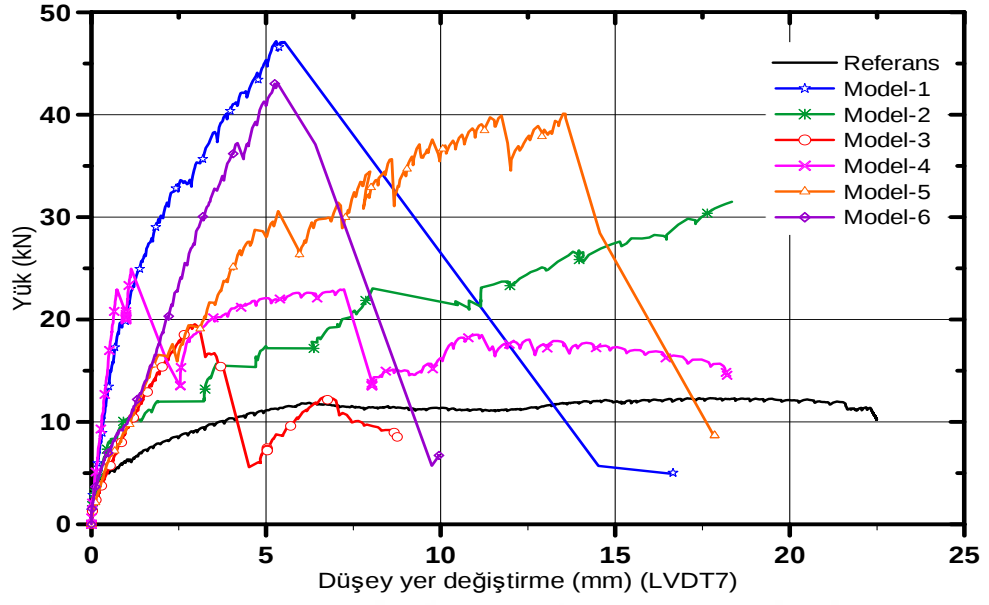
Çizelge 4.2'de maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirme miktarları deney sonuçları olarak gösterilmiştir. Kemerin kilit taşı altına yerleştirilen LVDT-7'den okunan değerler numunelerdeki düşey yer değiştirme miktarı olarak kullanılmıştır. Yatay yer değiştirme için üzengi taşı hizasında numune yan taraflarına yerleştirilen ve yük altında maksimum deplasman olacağı tahmin edilen bölgelerdeki LVDT-1 ve LVDT-6'dan elde edilen değerlerin toplamı alınmıştır. Kemer ayaklarında meydana gelen düşey yer değiştirmeler için ise numunedeki beton bloğun üstüne yerleştirilen LVDT-3 ve LVDT-4'den elde edilen değerlerin ortalaması esas alınmıştır. Ayrıca düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri şekil 4.24'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney sonuçları.

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 (%)	0	282,9	155,6	58,5	102,5	225,5	249,9
Kilit taşındaki düşey yer değiştirme (mm)	17,41	5,29	18,34	2,96	1,14	13,51	5,32
Yatay yer değiştirme (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

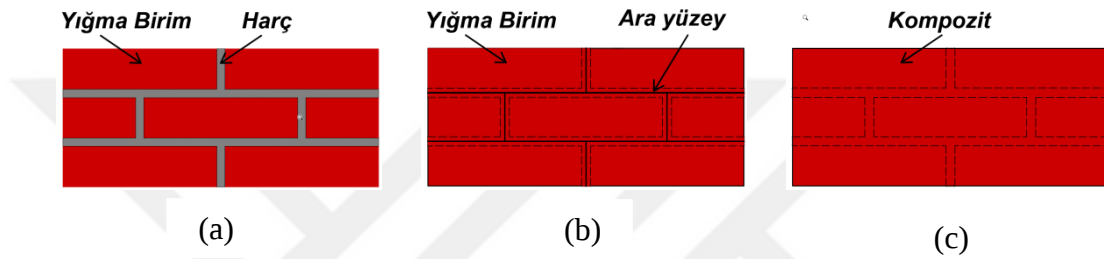
Deneysel çalışma sonuçlarına göre referans numunesinin düşey yük taşıma kapasitesi 12,32 kN olarak ölçülmüşken, güçlendirme yapılmış modeller içerisinde en fazla yükü 47,18 kN ile Model-1 taşımıştır. Şekil 4.24'te ve Şekil 4.25'te referans numune dışındaki modellerde yükleme neticesinde ani kırılmalar ve göçmeler sonucu grafiklerde ani düşüşler görülmektedir. En fazla yükü taşıyan Model-1'de maksimum yükteki düşey yer değiştirme miktarı 5,29 mm olarak ölçülmüşken, FRP düzeninin aynı olduğu fakat şerit FRP genişliğinin yarısı olarak tasarlanan Model-2'de maksimum yük olan 31,49 kN da düşey deplasman değeri 18,34 mm olarak ölçülmüştür. FRP'nin yüzeyden sıyrılmasına engel olacak şekilde ankraj uygulaması yapılan Model-3 güçlendirilen modeller içerisinde 19,53 kN ile en az düşey taşıma kapasitesine sahip olmakla birlikte maksimum yükte meydana gelen yer değiştirme miktarı 2,96 mm olarak ölçülmüştür. FRP uygulamalarından farklı olarak kemer görünümünde bir değişikliğe neden olmayacak şekilde bir tasarım olan Model-4'te düşey yük taşıma kapasitesi 24,95 kN olarak okunmuşken, yapılan deneyler arasında yanal ve düşey deplasman miktarları en az olan değerler okunmuştur. Model-2 tasarımına ek olarak ön ve arka yüzeylerine diyagonal şeklinde şerit FRP uygulaması yapılmış olan Model-5'te yük taşıma kapasitesi 40,11 kN ölçülmüştür. Bunun yanında Model-5'te numuneler arasında maksimum yükteki en fazla yatay deplasman değeri 17,62 mm olarak okunmuşken, düşey deplasmanı 13,51 mm olarak ölçülmüştür. Birbiri ardınca takip eden kemerler için düşünülen Model-6 yük taşıma kapasitesi 43,11 kN ile Model-1'den sonra en fazla düşey yükü taşıyan ikinci numunedir. Model-1 ile kıyaslandığında yatay yer değiştirmede 1,28 mm kadar azalma olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.24. Yük – yer değiştirme grafikleri.

5. SAYISAL ANALİZ

Düşey yükleme ile deney numunelerinin doğrusal olamayan davranış sergiledikleri deneysel olarak yapılan çalışmanın grafiklerinden görülmektedir. Bundan dolayı malzemelerin doğrusal olmayan parametreleri dikkate alınarak sonlu elemanlar metodu kullanılarak modelleme yapılmıştır. Yığma yapıların analizi sistemin büyüklüğüne göre 3 farklı modelleme tekniği kullanılarak yapılır. Bunlar; Detaylı Mikro Modelleme, Basitleştirilmiş Mikro Modelleme ve Makro Modelleme teknikleridir. Şekil 5.1’de modelleme teknikleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Yığma duvarlarda modellemeler a) Detaylı mikro, b) Basitleştirilmiş mikro, c) Makro modelleme.

Detaylı mikro modellemede çatlakların tuğla birim ve harcın arasındaki ara yüzeylerde olacağı varsayılmaktadır. Yığma birim ve harcın mekanik özellikleri (Poisson oranları, elastisite modülleri, ve elastik olmayan özellikleri) dikkate alınarak modelleme yapılmaktadır.

Basitleştirilmiş mikro modellemede, harç tabakası ihmal edilmekte yığma birimin boyutları arada bulunan harç tabakası kalınlığının yarısı kadar artırılarak yığma birimlerin arası ortalama yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır. Meydana gelebilecek çatlakların ortalama ara yüzey çizgisinde oluşacağı kabul edilmektedir.

Makro modellemede yığma duvarı meydana getiren harcın ve yığma birimin özellikleri homojenleştirme işlemine tabi tutularak duvar kompozit olarak varsayılmaktadır (Ural, 2009).

Modellemelerin LUSAS analiz programında harcın ve yığma birimin homojen olarak bir eleman gibi düşünüldüğü makro modelleme tekniğine uygun olarak yapıldığı bu çalışmada; malzemelerin özellikleri Çizelge 5.1’deki lineer ve nonlineer özellikleri esas alınarak tasarım yapılmıştır.

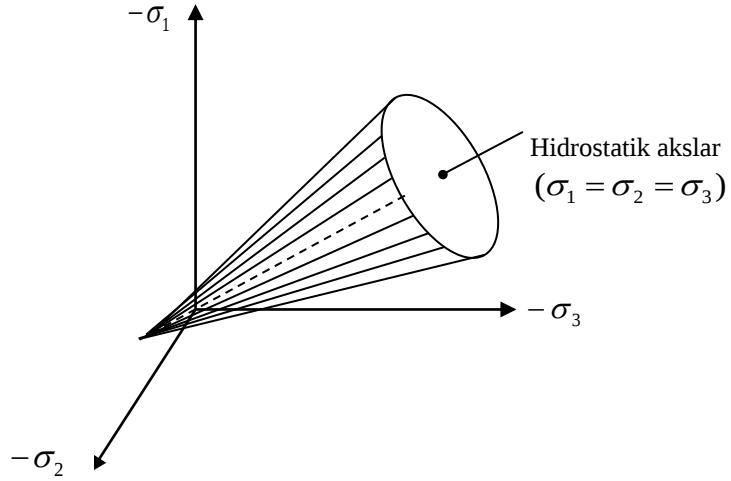
Çizelge 5.1. Malzeme özellikleri.

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

Lineer olmayan davranışta Drucker-Prager kriteri gözönüne alınarak analizler yapılmıştır. Drucker ve Prager genellikle çelik türü malzemelerde kullanılan Von-Mises kriterine ek bir terimin eklenmesi ile hidrostatik duruma daha duyarlı hale getirilerek, beton, yığma gibi gevrek davranış gösteren malzemeler için de kullanılabilen bir kriter haline getirmişlerdir (Jafarov, 2012). Drucker-Prager kriteri Denklem (5.1) ile ifade edilmektedir.

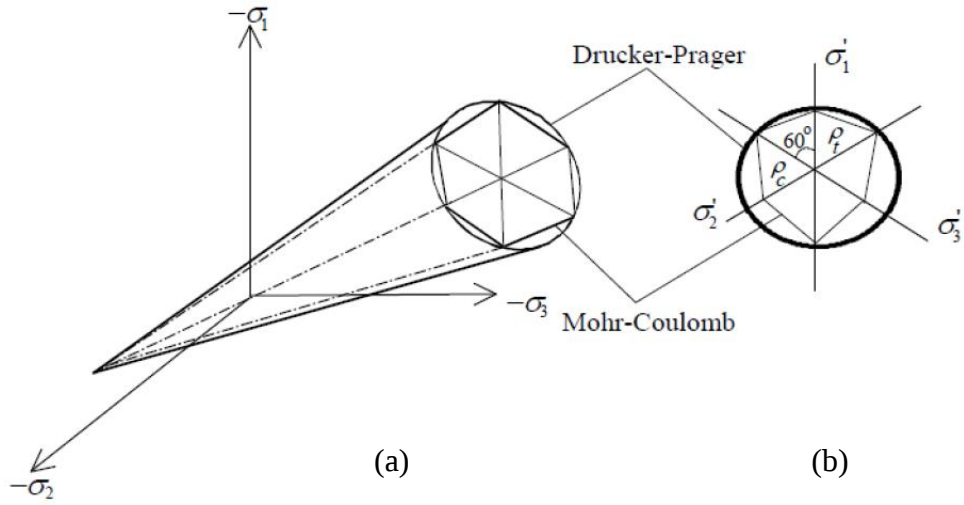
$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (5.1)$$

Denklemdeki α ve k pozitif malzeme parametreleri olmakla birlikte $\alpha = 0$ olduğunda denklem Von-Mises denklemi bağıntısını vermektedir. I_1 ; gerilme tansörünün birinci invariantını, J_2 ; deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantını ifade etmektedir. Şekil 5.2’de üç boyutlu gerilme durumu için Drucker-Prager kırılma yüzeyi görülmektedir.



Şekil 5.2. Drucker-Prager kriteri (Chen ve Mizuno, 1990).

Drucker-Prager kriteri Şekil 5.3'te görüldüğü gibi Mohr-Coulomb kriterine oldukça yakındır. Drucker-Prager kriterinin dairesi, Mohr-Coulomb altıgenine dıştan çizilen bir sınır daire olarak düşünülürse, iki yüzey $\theta = 60^\circ$, α ve k ve ile belirlenecek basınç meridyenine uygun olarak Denklem (5.2) ile ifade edilir (Chen ve Mizuno, 1990).



Şekil 5.3. Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması (a) Asal gerilme uzayında, (b) Deviatör düzleminde (Chen ve Han, 1988).

$$\alpha = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{3}(3 - \sin \theta)}$$

$$k = \frac{6c \cos \theta}{\sqrt{3}(3 - \sin \theta)}$$
(5.2)

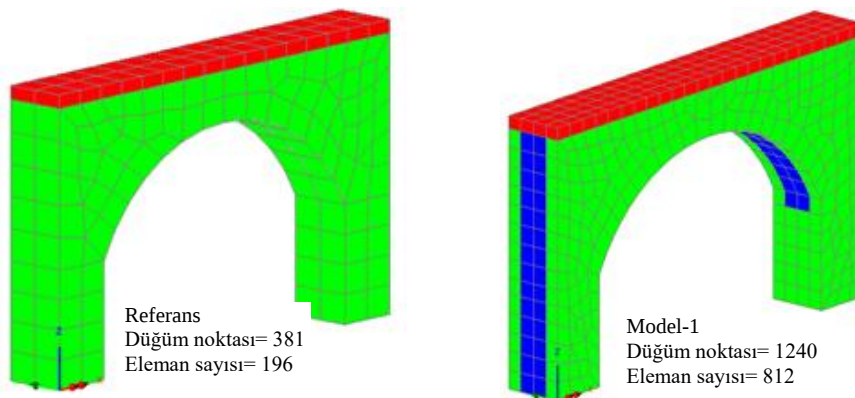
Denklem (5.2)'deki parametrelerle belirlenen koni, Mohr-Coulomb kırılma yüzeyindeki altıgen piramidi çevreleyen bir dış sınır görünümündedir (Şekil 5.3). Ayrıca çekme meridyeninden geçen $\theta = 0^\circ$ ile belirlenecek iç koniyi belirleyecek olan parametreler Denklem (5.3) ile hesaplanabilmektedir.

$$\alpha = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{3}(3 + \sin \theta)}$$

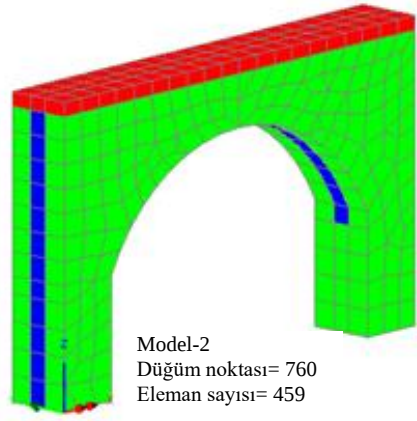
$$k = \frac{6c \cos \theta}{\sqrt{3}(3 + \sin \theta)}$$
(5.3)

Bu çalışmada, θ ve c parametreleri için $c=2,50-3,70$ MPa ve $\theta=25^\circ-35^\circ$ değerleri kullanılmıştır (Doran, 2003). Sonlu elemanlar modellerinde yığma duvar ve üst sırada yer alan yığma birimlerinin ezilmemesi için dökülen beton için üç boyutlu katı elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların 8 düğüm noktası ve her düğüm noktasının da 3'er adet yer değiştirme serbestlikleri vardır. Deney elemanları için oluşturulmuş sonlu elemanlar modelleri ile kullanılan düğüm noktası ve sonlu eleman adetleri Şekil 5.4'te görülmektedir.

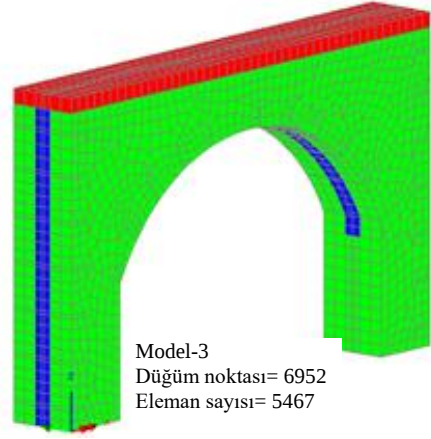
SEY ve deneysel sonuçlara ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 5.5'te verilmiştir. Hem deneysel hem de analitik olarak kemer kilit taşı altındaki yer değiştirmelere karşılık düşey yük verileri grafiksel olarak incelendiğinde iki davranışın birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



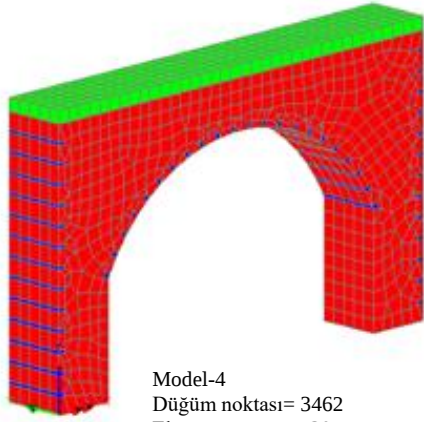
Şekil 5.4. Sonlu eleman modellemeleri.



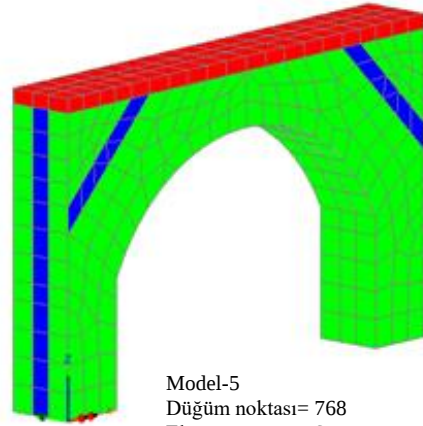
Model-2
Düğüm noktası= 760
Eleman sayısı= 459



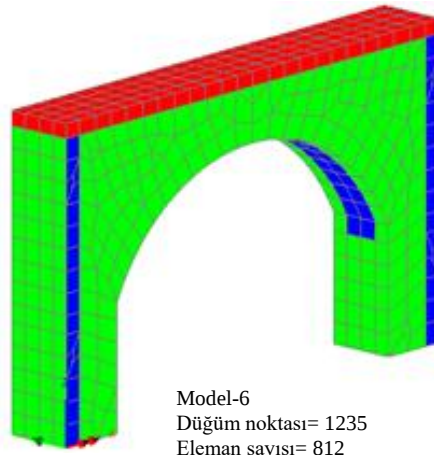
Model-3
Düğüm noktası= 6952
Eleman sayısı= 5467



Model-4
Düğüm noktası= 3462
Eleman sayısı= 2730

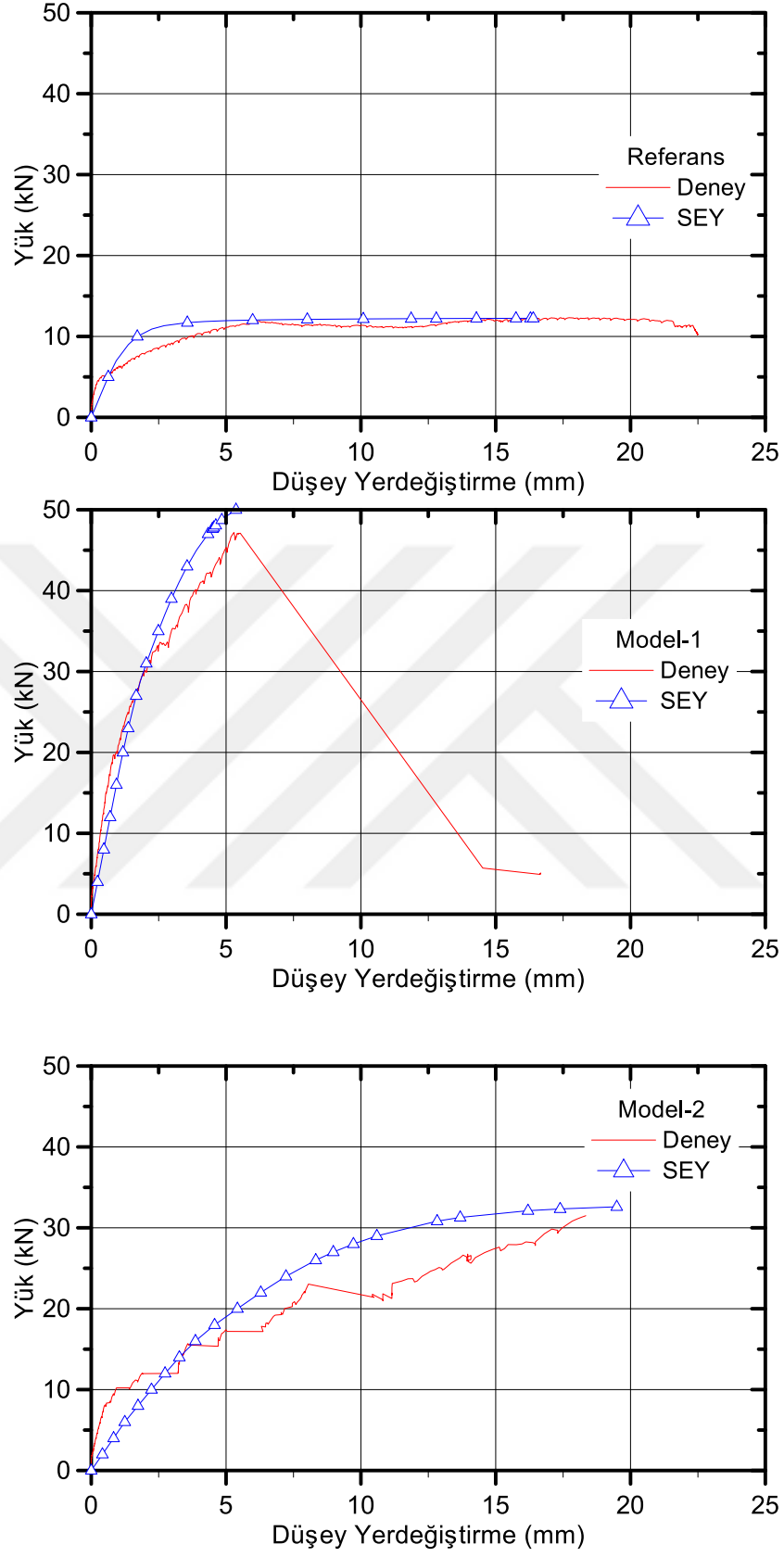


Model-5
Düğüm noktası= 768
Eleman sayısı= 461

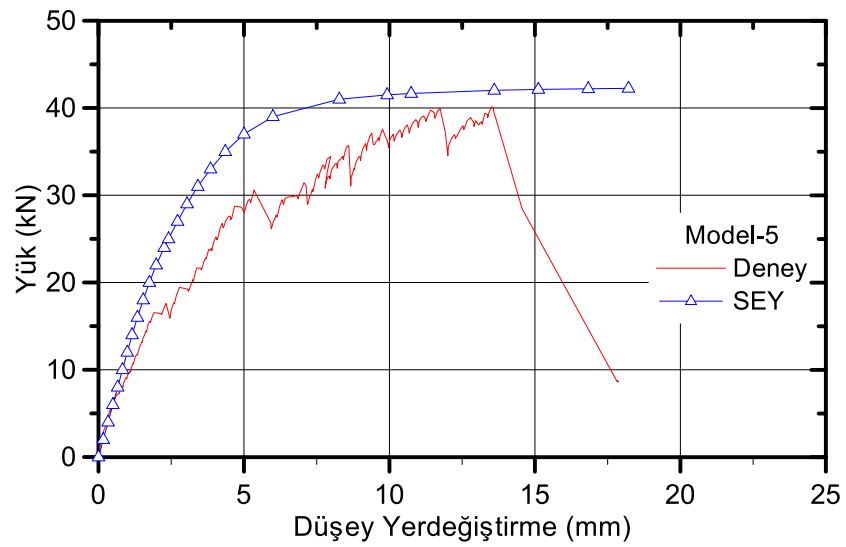
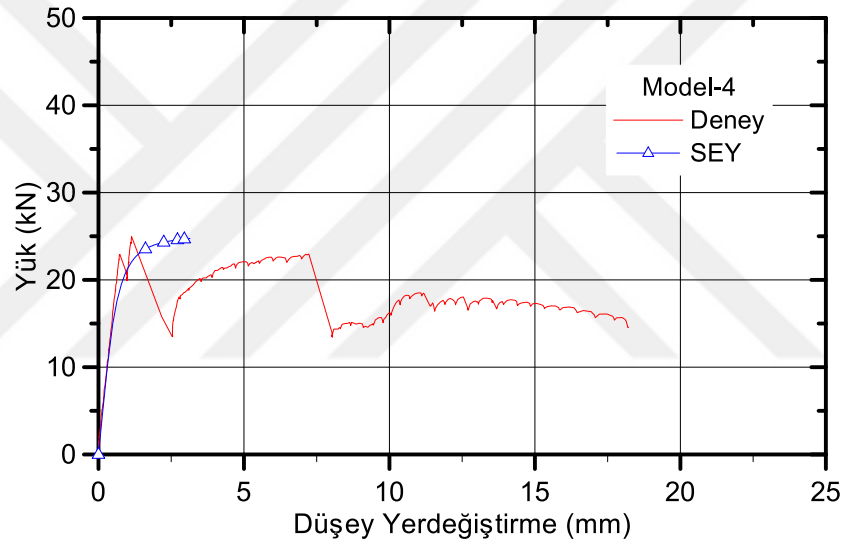
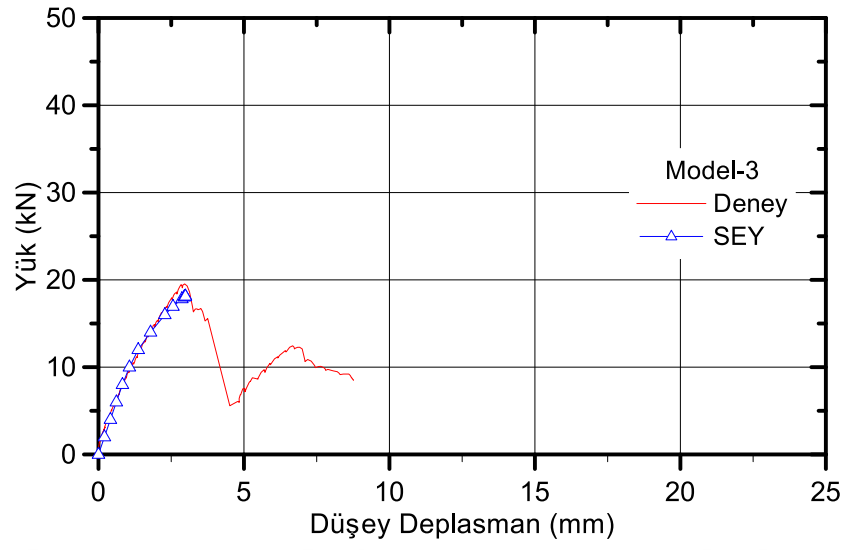


Model-6
Düğüm noktası= 1235
Eleman sayısı= 812

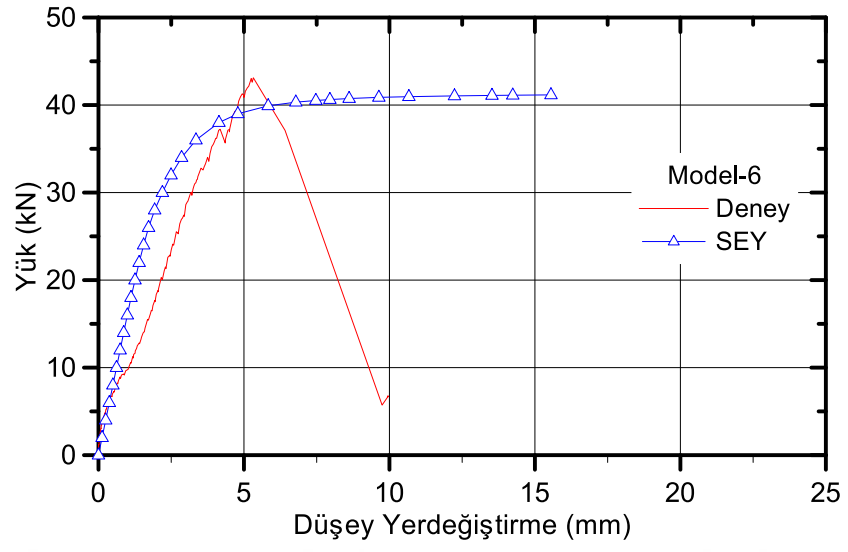
Şekil 5.4 (devam). Sonlu eleman modellemeleri.



Şekil 5.5. SEY ve deney sonuçlarının yük - düşey yer değıştirme grafikleri kıyaslaması.



Şekil 5.5 (devam). SEY ve deney sonuçlarının yük - düşey yer değiştirme grafikleri kıyaslaması.



Şekil 5.5 (devam). SEY ve deney sonuçlarının yük - düşey yer değiştirme grafikleri kıyaslaması.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hasara uğramış kemerler üzerinde farklı FRP düzen ve tekniğinin uygulandığı bu çalışmada kilit taşı hizasından düşey uygulanan yük altında kemerlerin davranışı incelenmiştir. Toplamda 7 numune üzerinde yapılan incelemede ilk numune referans kabul edilmiş, diğer 6 numune üzerinde hasar meydana gelecek şekilde belirli yük mertebesine kadar düşey yükleme yapılmıştır. Hasara uğrayan numunelerden 5 tanesi farklı tiplerde şerit FRP uygulamaları ile, 1 numune ise boşaltılan derzlerin epoksi harcı ile takviye edilmesi suretiyle onarılmıştır. Yapılan deneysel yüklemelerden ve analitik bilgisayar modellemelerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında davranışların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özet olarak verilmiştir.

Düşey yükleme yapılarak elde edilen deney sonuçlarına göre uygulanan onarım tasarımlarıyla kemerin yük taşıma kapasitesi en az %58,5 artış göstermiş, bu da ankraj uygulamasının yapıldığı Model-3'te olmuştur.

Maksimum yük taşıma kapasitesine sahip olan numune ise 47,18 kN ile Model-1 olmuştur. Model-1 ile FRP şerit genişliğinin yarıya indirildiği tasarım olan Model-2 kıyaslandığında şerit genişliğinin iki katı olması düşey yük taşıma kapasitesinin neredeyse %50 oranında artmasını sağlamıştır.

Model-2'deki uygulamanın ankrajlı hali olan Model-3 FRP'nin yüzeylerden ayrılmasına engel olmasına rağmen Model-2'ye oranla yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %38 azalma gözlenmiştir. Ankraj uygulamasının yapılması için derzlerde açılan deliklerin harca zarar vermesi bu durumun başlıca nedenidir. Model-3 tasarlanan FRP uygulamaları içerisinde düşey ve yatay deplasman miktarları yönünden en az değeri veren tasarımdır. Yığma birimlere ankraj uygulamasının yapılması yük taşıma kapasitesi açısından daha iyi sonuçlar verebilecektir.

Model-5, Model-2'nin FRP uygulamasına ilave olarak kemer ön ve arka yüzüne diyagonal biçimde şerit FRP yapılması ile oluşturulmuşken, diyagonal şerit FRP'nin Model-2'ye göre yük taşıma kapasitesinde neredeyse %27 artış sağladığı görülmektedir. Deplasman değerleri gözönüne alındığında yatay deplasman miktarında önemli bir artış gözlenirken düşey deplasman azalmıştır. Uygulanan

yüklemede kemer yan yüzeyindeki FRP'nin kopması gözönüne alındığında şerit FRP genişliğinin artırılması yük taşıma kapasitesinde artış meydana getirebilir.

Derzlerin epoksi harcı ile doldurularak yapının doğal görünümünde bir değişikliğin olmadığı tasarım olan Model-4'teki uygulama diğer onarım uygulamalarına göre pratik ve nispeten ekonomiktir. Model-4'te diğer uygulanan epoksi harcı uygulaması Model-3 ankraj uygulamasından daha fazla yük taşımış ve referans numuneye oranla yük taşımasında %102,5 artış gözlenmiştir. Ek olarak Model-4 diğer modellere göre düşey ve yanal yerdeğiştirme miktarlarının en az olduğu modeldir.

Birbiri ardınca devam eden kemer sistemleri gözönüne alındığında kemer yan yüzeylerinden ziyade kemer ön ve arka yüzeylerine FRP uygulamak daha elverişli görünmektedir. Buna örnek olarak tasarlanan Model-6 oluşturulan modellerden ikinci en fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir. Referans numuneye göre yaklaşık %250 daha fazla yük taşımakla birlikte yatay ve düşey deplasmanlarda önemli derecede azalmıştır.

KAYNAKLAR

- Aköz, A.H., 2008. Deprem etkisi altındaki tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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.
- Basilio, I., Oliveira, D. ve Lourenço, P., 2004. Optimal FRP strengthening of masonry arches, 13. International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, July 4-7.
- Bastianini, F., Corradi, M., Borri, A. ve Tommaso, A. D., 2005. Retrofit and monitoring of an historical building using “Smart” CFRP with embedded fibre optic brillouin sensors, *Construction and Building Materials*, 19, 525–535.
- 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*, 43, 2, 439-446.
- Cavicchi, A. ve Gambarotta, L., 2005. Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch–fill interaction, *Engineering Structures*, 27, 605–615.
- Chen, W.F. ve Han, D.J., 1988. *Plasticity for structural engineers*, Springer-Verlag, New York Inc, USA.
- Chen, W.F. ve Mizuno, E., 1990. *Nonlinear analysis in soil mechanics*, Elsevier Science Publishing Company, New York, NY, USA.
- Çöğürçü, M.T., 2007. Yığma yapıların yatay derz güçlendirme yöntemiyle güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Dagher, H.J., Bannion, 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.
- 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.

- Doran, B., 2003. Elastic-plastic analysis of R/C coupled shear walls: The equivalent stiffness ratio of the tie elements, *Journal of the Indian Institute of Science*, 83, 87-94.
- Felice, G.D., 2009, Assessment of the load-carrying capacity of multi-span masonry arch bridges using fibre beam elements, *Engineering Structures*, 31, 8, 1634-1647.
- Foraboschi, P., 2004. Strengthening of masonry arches with fiber-reinforced polymer strips, *Journal of Composites for Construction*, 8, 3, 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.
- Hasol, D., 2016. Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, Yem Yayın, 14. Baskı, İstanbul.
- Jafarov, O., 2012. Lifli polimerle güçlendirilmiş yığma duvarların modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kanıt, R. ve Işık, N.S., 2007. Experimental behavior of brick masonry arches and analyses by computer models, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22, 1, 13-20.
- Lorenzis, L. D., Dimitri, R. ve Tegola, A. L., 2007. Reduction of the Lateral Thrust of Masonry Arches and Vaults with FRP Composites, *Construction and Building Materials*, 21, 7, 1415–1430.
- LUSAS, 2012. Finite element analysis software products. United Kingdom: Finite Element System, FEA Ltd.
- 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.
- Milani, G., Milani, E. ve Tralli, A., 2009. Upper bound limit analysis model for FRP-reinforced masonry curved structures. Part II: Structural Analyses, *Computers and Structures*, 87, 23-24, 1534–1558.
- Oliveira, D. V., Basilio, I. ve Lourenço, P.B., 2010. Experimental behavior of FRP strengthened masonry arches, *Journal of Composites for Construction*, 14, 3, 312-322.
- Oymael, Doç. Dr. S., 2003. Yapı bilgisi temel ders kitabı, I, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.
- Özer, S.S., 2006. Geleneksel yığma yapılarda strüktürel elemanların analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- Peker, İ.Y., 2005. Yığma ve tarihi yapılarda FRP malzemeler kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamaları, Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
- 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., 2007. İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Bülten, 89, 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.
- 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 modellemesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Ankara, 17, 2, 129-139.
- TS EN 772-1, 2012. Kagir birimler-deney yöntemleri-bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-6, 2004. Kagir birimler-deney metodları-bölüm 6: Beton kagir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6, 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1052-1, 2000. Deney metodları-bölüm 1: Basınç dayanımı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1996-1-1:2005+A1, 2013. Kagir yapıların tasarımı-bölüm 1-1: Donatılı ve donatısız kagir yapılar için genel kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ural, A., 2009. Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Valuzzi, M., Valdemarca M. ve Modena, C., 2001. Behavior of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates, Journal of Composites for Construction, 5, 163–169.
- URL-1< <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6259/20/19.pdf>>, Erişim Tarihi: 10.01.2015.

URL-2< https://wiki.bath.ac.uk/download/attachments/74949791/MSDS_Sikadur%20-330.pdf >, Erişim Tarihi: 10.01.2015.

URL-3< <http://imeryapi.com.tr/wp-content/uploads/CONCRESlVE1406.pdf>>, Erişim Tarihi: 6.11.2014.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ahmet EREN
Adres : Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Alaplı MYO
İnşaat Bölümü, 67850 Alaplı/ZONGULDAK
E-posta adresi : ahmeteren65@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Erciyes Üniversitesi, 2010
Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, 2018

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Özdemir İnş. Tur. Enj. San. Tic. A.Ş. / Yaz Stajı
2. Fatihan Yapı / Yaz Stajı
3. İsad Mimarlık / Statik Proje Mühendisi
4. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Alaplı MYO / Öğretim Görevlisi

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Fırat, F.K. ve Eren, A., 2015. Tarihi Yığma Yapılardaki Hasarlı Kemerler Üzerinde FRP Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30, 4, 659-670.