



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

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİMDALI**

**DÜŞEY YÜKLENEN TUĞLA KEMERLERDEKİ GERGİ
ÇUBUKLARIN DAVRANIŞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şükran TUĞRULELÇİ

TEZ DANIŞMANI

Yrd. Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

AKSARAY, 2014

DOĞRULUK BEYANI

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

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

Şükran TUĞRULELÇİ

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana her konuda destek olan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT'a, tez çalışmamın her safhasında desteğini esirgemeyen ve bana yol gösteren Yrd. Doç. Dr. Ali URAL'a ve İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç. Dr. Mehmet Emin KARA'ya, deneysel çalışmalarda yardımcı olan Uzman Yakup BÖLÜKBAŞ'a ve Tekniker Fatih ÇELİK'e, tez çalışmam boyunca bana yardımcı olan ve destek olan İnşaat Mühendisliği Bölümünde görev yapan hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma, İnş. Müh. Derya KOÇ ve İnş. Müh. Mehtap KAYABAŞI'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteği gösteren aileme ve çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen İnş. Müh. Cihan TANRIVERDİ'ye tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu çalışmayı destekleyen Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne de teşekkürü bir borç bilirim.

Şükran TUĞRULELÇİ

Aksaray, Aralık 2014

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOĞRULUK BEYANI.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ.....	ix
KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	4
1.1.1 Kemerli yapılarda kullanılan gergi çubuğunun incelendiği çalışmalar.....	5
1.1.2 Kemerli yapıların davranışının incelendiği çalışmalar.....	5
1.1.3 Kemerli yapıların güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar.....	6
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	7
2. MALZEME ÖZELLİKLERİ.....	9
2.1 Tuğla Özellikleri.....	9
2.2 Harcın Özellikleri.....	12
2.3 Gergi Çubuğunun Özellikleri.....	14
2.4 Kagir Birimlerin Basınç Dayanımı.....	16
3. KEMER NUMUNE DENEYLERİ.....	18
3.1 Kemer Numunelerin Hazırlanması.....	18
3.1.1 Yer değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi.....	21
3.1.2 Şekil değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi.....	22
3.2 Kontrol Deney Elemanı.....	23
3.3 Model-1.....	27
3.4 Model-2.....	32
3.5 Model-3.....	36
3.6 Model-4.....	39
3.7 Model-5.....	43
3.8 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	47
3.9 Gergi Çubuğu Davranışının İncelenmesi.....	53
4. KEMER NUMUNELERİNİN SAYISAL ANALİZİ.....	56
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	

ÖZET

DÜŞEY YÜKLENEN TUĞLA KEMERLERDEKİ GERGİ ÇUBUKLARIN DAVRANIŞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Kemerler yüzyıllar boyunca büyük açıklıkları geçmek amacıyla kullanılmış yapı türleridir. Anadolu’da özellikle Osmanlılardan kalan cami, medrese, han ve ev türü yapılarda ahşap veya demirden gergilerin kullanıldığı görülmektedir. Gergiler düşey yük altında kalan kemerlerin stabilitesinin korunmasında büyük öneme sahiptirler. Bu çalışmada, düşey yüke maruz kalan kemerlerde kullanılan gergilerin, genel davranışa etkisi araştırılmıştır. Araştırma kapsamında 1’i gergisiz, 5 tanesi farklı tasarımlardaki gergiye sahip toplam 6 adet tuğla kemer deney numuneleri düşey yük altında teste tabi tutulmuştur. Deneye tabi tutulan numunelerin nümerik olarak da hesaplaması yapılmıştır. Deney sonuçları nümerik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuş, sonuçlar hakkında yorumlar yapılmıştır. Ayrıca restorasyon çalışmalarında gergi uygulamalarında karşılaşılan sorunlar değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gergi çubuğunun etkileri, Kagir kemerler, Sonlu elemanlar yöntemi, Lusas , Drucker-Prager kriteri.

ABSTRACT

THE EXAMINATION OF BEHAVIOUR OF VERTICAL LOADED BRICK MASONRY ARCH HAVING TIE RODS

For centuries, arch structures have been used to span large openings. In Anatolia, wood or iron tie rods have been used in the arches of historical buildings such as mosques, madrases, houses and khans which are especially from the Ottoman period. These tie rods are of great importance for the protection of the stability of arches under vertical load. In this study, tie rods are examined in terms of the influence on the general structural behavior, a total of six experimental models were tested under vertical load; one model with no tie rod and five models with different tie rods. The tested models were also evaluated by using the Finite Element Method. Consequently, the experimental results are presented in comparison with these numerical results and comments on the tie rods used on the arches are discussed based the obtained results. Furthermore, recommendations are offered to resolve the problems of tie rod applications encountered in restoration works.

Keywords: Tie-rod effects, Masonry arches, Finite element analysis, Lusas software, Drucker-prager criterion.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1: Kemerin kısımları.....	1
Şekil 1.2: Tarihi yapılardaki gergi çubukları	2
Şekil 1.2 (devam): Tarihi yapılardaki gergi çubukları	3
Şekil 1.3: Dikdörtgen bileziklerin her bir kenarının ortasına kaynaklanan gergi çubukları.	4
Şekil 1.4: Kemerde yük aktarım şeması.....	8
Şekil 2.1: Kagir tuğla ve boyutları.....	10
Şekil 2.2: Kagir tuğla birimlerin basınç ve eğilmede çekme dayanımı testleri	12
Şekil 2.3: Harcın basınç dayanımı testi	13
Şekil 2.4: Harcın çekme dayanımı testi	14
Şekil 2.5: a) Gergi çubuğu için hazırlanan deney düzeneği, b) gerilme-şekil değiştirme grafiği, c) şekil değiştirme kalibrasyon grafiği	16
Şekil 2.6: a) Kagir duvarın basınç dayanım deney düzeneği, b) gerilme-şekil değiştirme grafiği	17
Şekil 3.1: Kemerin oturtulduğu kolonların altındaki U220 profili üzerinde açılan delikler	18
Şekil 3.2: Kemer modellerinin genel geometrisi	19
Şekil 3.3: Kemer modellerine ait çizimler	20
Şekil 3.4: Deney numunelerine LVDT'lerin yerleştirilmesi	21
Şekil 3.5: Deney numunelerine strain- gaugelerin yerleştirilmesi	22
Şekil 3.6: Deney düzeneğindeki yük hücresinin, strain- gaugelerin ve LVDT'lerin veri toplama ünitesine bağlanması	22
Şekil 3.7: Deney ve ölçüm düzeneği	23
Şekil 3.8: Kemer örümünde kullanılan kemer kalıbı.....	24
Şekil 3.9: Kemer örümü.....	24
Şekil 3.10: Kemer üzerine beton dökümü	25
Şekil 3.11: Kontrol deney elemanının deney düzeneğindeki görünümü	25
Şekil 3.12: Kontrol deney elemanının göçme sonucundaki hali	26
Şekil 3.13: Kontrol deney elemanına ait yük- yer değiştirme grafiği.....	26
Şekil 3.13 (devam): Kontrol deney elemanına ait yük- yer değiştirme grafiği.....	27
Şekil 3.14: Kemerde kullanılan gergi çubuğu	28
Şekil 3.15: Gergi çubuğunun kemere yerleştirilmesi.....	28
Şekil 3.16: Model-1'e örnek tarihi yapılardaki gergi çubukları.	29

Şekil 3.17: Model-1 deney numunesinin göçme sonucundaki hali	30
Şekil 3.18: Model-1'e ait yük- yer değiştirme grafiği	30
Şekil 3.18 (devam): Model-1'e ait yük- yer değiştirme grafiği	31
Şekil 3.19: Modelde kullanılan gergi çubuğu.....	32
Şekil 3.20: Model-2'ye örnek tarihi yapılardaki gergi çubukları	33
Şekil 3.21: Model-2 deney numunesinin görünümü.....	34
Şekil 3.22: Model-2 deney numunesinin göçme sonucundaki hali	34
Şekil 3.23: Model-2'ye ait yük- yer değiştirme grafiği	35
Şekil 3.24: Kemerde kullanılan gergi çubuğu	36
Şekil 3.25: Model-3 deney numunesinin görünümü.....	37
Şekil 3.26: Model-3 deney sonrasında gergideki kaynağın açılmış hali	37
Şekil 3.27: Model-3 deney numunesinin göçme sonucundaki hali	38
Şekil 3.28: Model-3'e ait yük- yer değiştirme grafiği	38
Şekil 3.28 (devam): Model-3'e ait yük- yer değiştirme grafiği	39
Şekil 3.29: Model-4 olarak isimlendirilen gergi çubuğu sistemi.....	40
Şekil 3.30: Model-4 deney numunesinin göçme sonucundaki hali	40
Şekil 3.31: Model-4'e ait yük- yer değiştirme grafiği	41
Şekil 3.32: (a) Model-4 için yapılabilecek uygulama örneğindeki gerginin gösterimi, (b) Model-4 için yapılabilecek uygulama örneğindeki kemer kolonları için gergi uygulamasının gösterimi	42
Şekil 3.33: (a) Model-5 deney numunesinin görünümü, (b) Model-5'de kullanılan gergi çubuğu.	44
Şekil 3.34: Model-5 deney numunesinin göçme sonucundaki hali	45
Şekil 3.35: Model-5'e ait yük- yer değiştirme grafiği	46
Şekil 3.36: Yük-yer değiştirme grafikleri	49
Şekil 3.37: Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri	51
Şekil 3.37 (devam): Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri	52
Şekil 3.38: Kemer numunelerinde meydana gelen çatlaklar	53
Şekil 3.39: Gergi çubuklarındaki şekil değiştirmelerin; gerilme, uygulanan yük ve düşey yer değiştirme ile grafiği	54
Şekil 4.1: Yığma duvarlardaki modelleme teknikleri a)Detaylı mikro modelleme, b)Basitleştirilmiş mikro modelleme, c)Makro modelleme	57
Şekil 4.2: Drucker-Prager kriteri (Chen ve Mizuno, 1990)	57
Şekil 4.3: Sonlu elemanlar modelleri ile kullanılan düğüm noktası ve sonlu eleman adetleri	59
Şekil 4.4: Sonlu elemanlar modelleriyle yapılan analizler neticesinde elde edilen yük- yer değiştirme grafiklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	63
Şekil 4.5: Deney ve analiz sonuçları	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Kagir tuğla birimlerin basınç dayanımı test sonuçları.....	10
Çizelge 2.2: Kagir tuğla birimler için eğilmede çekme dayanımları test sonuçları...	11
Çizelge 2.3: Harcın basınç dayanımı test sonuçları.....	12
Çizelge 2.4: Harcın çekme dayanımı test sonuçları	13
Çizelge 2.5: Kagir duvarların basınç dayanımları	17
Çizelge 3.1: Deney düzeneğinde kullanılan yük hücresinin, stain-gaugelerin ve LVDT'lerin veri toplama ünitesi üzerindeki yerleri	23
Çizelge 3.2: Concressive 1406'nın karışım oranları.....	43
Çizelge 3.3: Concressive 1406'nın teknik özellikleri.....	43
Çizelge 3.3 (devam): Concressive 1406'nın teknik özellikleri.....	44
Çizelge 3.4: Deney sonuçları	51
Çizelge 4.1: Modellerin malzeme özellikleri.....	60

SİMGELER DİZİNİ

b	Tuğlanın genişliği
d	Tuğlanın yüksekliği
E	Elastisite modülü
f	Basınç dayanımı
f_{cst,m}	Yarmada çekme deneyi sonucu harcın çekme dayanımı
F_m	Akma noktasından sonra deney numunesinin dayandığı en büyük yük
h_c	Silindir numunenin yüksekliği
k	Pozitif malzeme sabiti
l_c	Silindir numunenin uzunluğu
L	Tuğlanın boyu
L	Çeliğin ilk boyu
ΔL	Çeliğin boyundaki değişim
P	Maksimum yükleme
P_f	Maksimum yük
P_s	Yarmada çekme deneyinde uygulanan maksimum yük
R_m	Çelik çekme dayanımı
R_{tf}	Eğilmede çekme dayanımı
V	Maksimum yük
α	Pozitif malzeme sabiti
ε	Şekil değiştirme
σ	Gerilme
I₁	Gerilme tansörünün birinci invaryantı
J₂	Deviatorik gerilme tansörünün ikinci invaryantı
Θ	Malzemenin içsel sürtünme açısı
c	Kohezyon

KISALTMALAR DİZİNİ

FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FRP	Lif Takviyeli Polimer
HBD	Harcın Basınç Dayanımı
HÇD	Harcın Çekme Dayanımı
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
LUSAS	London University Structural Analysis System
mV	Milivolt
TDD	Tuğla Deliğine Dik Doğrultuda Basınç Dayanımı
TDY	Tuğla Delik Yönünde Basınç Dayanımı
TDEÇ	Tuğla Deliğine Dik Doğrultuda Eğilmede Çekme Dayanımı
TYEÇ	Tuğla Delik Yönünde Eğilmede Çekme Dayanımı
KBD	Kagir Duvarların Basınç Dayanımı

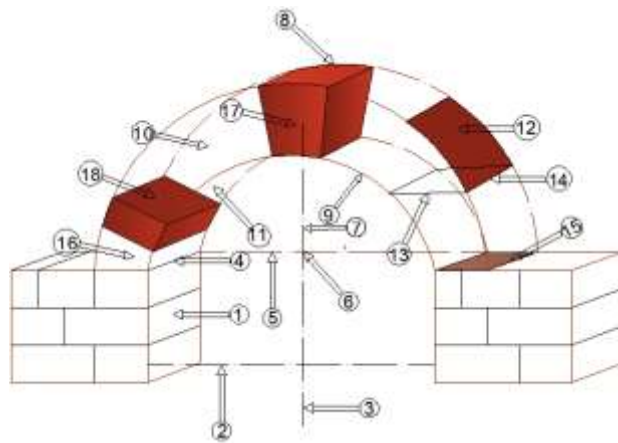
1. GİRİŞ

Tarihi yapılar da kullanılan geleneksel kemer çeşitleri, en önemli kültür miraslarımız arasında yer almaktadır. Dünyanın en eski uygarlıkları tarafından yapılmış ve günümüze kadar ulaşmış eserlerin birçoğunda açıklıklar kemerler yardımıyla geçilmiştir. Özellikle köprülerde ve su yollarında kullanılan kemerler; cami, han, hamam, kilise türü yapıların da taşıyıcı sistemine önemli katkılarda bulunmuştur.

Kemer formunun ilk örnekleri M.Ö. 3000 yıllarında Mezopotamya’da Sümerlere ait yer altı mezarlarında görülmüştür. Mısırlılara ait olan bir diğer örnekler, bu uygarlığın da aynı dönemlerde kemer formunun yapısal potansiyeli hakkında bilgi sahibi olduklarını da göstermektedir. Ancak, kemer formunu bulanlar her ne kadar Sümerler ya da Mısırlılar olsa da, en etkin ve göz alıcı şekilde kullanmayı başaranlar Romalılar olmuştur (Toker ve Ünay, 2004).

Anadolu’da özellikle Osmanlılardan kalan cami, medrese, han ve ev türü yapılarda kullanılan kemerlerde ahşap veya demirden gergilerin bulunduğu görülmektedir. Özellikle ince ve narin kolonların üzerinde yer alan kemer yapılar dikkatlice incelendiğinde kemer kolonu ile kemer yapısının kesiştiği noktalarda, ahşap veya demirden yapılmış gergi çubukları vardır. Kemerli yapılarda kullanılan taş, tuğla gibi yapılar basınca çalıştıklarından dolayı, yapıya gelen çekme kuvvetini karşılayabilmek için gergi çubukları kullanılmaktadır. Gergiler, düşey yük altında kalan kemerlerin stabilitesinin korunması açısından büyük öneme sahiptirler.

Şekil 1.1’de kemerin kısımları gösterilmiştir.



- 1) Kemer ayakları
- 2) Kemer açıklığı
- 3) Kemer eksenini
- 4) Üzeni noktası
- 5) Üzeni seviyesi
- 6) Kemer yayının merkezi
- 7) Kemer yüksekliği
- 8) Tepe noktası
- 9) Kemer kenarları
- 10) Kemer alını
- 11) Kemer altını
- 12) Kemer sırtını
- 13) Kemer kalınlığı
- 14) Kemer genişliği
- 15) Üzeni yatağı
- 16) Üzeni taşı
- 17) Kilit taşı
- 18) Kemertaşları

Şekil 1.1: Kemerin kısımları.

Şekil 1.2’de gergi çubuklarının kullanıldığı yapılara örnekler verilmiştir. Şekil 1.2a’da belirtildiği gibi İstanbul’da bulunan ve M.S. 542 yılında Bizans İmparatoru I. Justinianus tarafından yaptırılan Yerebatan Sarnıcı’nda demirden yapılmış gergi çubukları görülmektedir. Bunun yanında Osmanlılar zamanından günümüze kalmış olan birçok tarihi camide de gergi çubuğu kullanılmıştır. 1400’lü yıllardan kalma Edirne’de bulunan Şekil 1.2b’de gösterilen Üç Şerefeli Cami’de ahşap gerginin kullanıldığı görülürken, I. Süleyman adına 1551-1558 yılları arasında İstanbul’da Mimar Sinan tarafından yaptırılan Şekil 1.2c’deki Süleymaniye Cami’nde de demirden yapılmış gergi çubukları yoğun olarak kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 1.2d’de gösterilen, Üsküp’te Molla Muslidin Hoca tarafından 1550 yılında yapılmış Osmanlı Hanlarından biri olan Kurşunlu Han’da da demirden gergi çubuğu örnekleri görülmektedir.



(a) Yerebatan Sarnıcı (İstanbul).



(b) Üç Şerefeli Cami (Edirne).

Şekil 1.2: Tarihi yapılardaki gergi çubukları.



(c) Süleymaniye Cami (İstanbul).



(d) Kurşunlu Han (Üsküp).

Şekil 1.2 (devam): Tarihi yapılardaki gergi çubukları.

Tarihi yapılarda bulunan gergi çubukları zaman içerisinde başta korozyon olmak üzere bazı deformasyonlara uğramaktadır. Tarihi yapılardaki gergi çubukları genelde dövme demirden yapıldığı için korozyonun yoğun olarak görüldüğü bölgelerde tabakalaşmalar gözlemlenmekte, bu tabakalaşmalardan dolayı gergi çubuğu arzu edilen davranışı sağlayamamaktadır. Bu yüzden, bu gergi çubuklarının değiştirilmesi gerekmektedir.

Tarihi yapılarda mevcut gergiler, kemer-kolon birleşiminin içerisine yerleştirilmiştir. Oysa ki restorasyon çalışmalarında kolonu çepeçevre saran dikdörtgen bileziklerin kemer açıklığı yönündeki kenarının ortasına monte edilen gergi çubuğu uygulaması yapılmaktadır. Bu uygulamaya en uygun örneklerden birisi Şekil 1.3'te gösterilen Aksaray İlindeki Ulu Cami kemer gergileridir. Kare kesitli olan kolon başlarını

birbirine bağlayan gergiler, kolonları çepeçevre saran bileziklerin orta noktasına denk gelecek şekilde kaynaklanmıştır. Kemerlerde meydana gelebilecek olan herhangi bir deformasyonda öncelikle kare kesitli olduklarından bileziklerde açılmalar meydana gelecek, daha sonra gergi çubukları yükü almaya başlayacaktır. Gergi çubuklarının yükü taşıma aşamasına gelene kadar kemer kolonlarında açılmalar ve kemerlerde büyük deformasyonlar meydana gelecektir. Ülkemizde restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında, gergi çubukların değişiminde bu yanlış uygulama çok sık karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1.3: Dikdörtgen bileziklerin herbir kenarının ortasına kaynaklanan gergi çubukları.

1.1 Literatür Özeti

Kemerli yapılarla ilgili, günümüze kadar yapılmış bazı araştırmalar ve bilimsel yayınlar mevcuttur. Bu çalışmaların çoğu kemerlerin inşası, güçlendirilmesi ve restorasyonu üzerinedir. Tez kapsamında dikkate alınan, kemer modellerinde değişken olarak kullanılan gergi çubuğu, çok eski zamanlardan beri sıklıkla kullanılmasına rağmen bu konu ile ilgili çok az sayıda bilimsel çalışmalar mevcuttur.

1.1.1 Kemerli yapılarda kullanılan gergi çubuğunun incelendiği çalışmalar

Lagomarsino ve Calderini, (2005) çalışmalarında kemer ve tonozlarda kullanılan metalik gergi çubuklarının aksel çekme kuvvetini belirlemek için deneysel ve teorik olmak üzere iki farklı problem kaynağını incelemişlerdir.

Çelik vd., (2010) İstanbul'daki Yavuz Selim Camii, Isparta'daki Firdevs Bey Bedesteni ve Edirne'deki Tütünsüz Baba Türbesi'ni incelemişlerdir. Bu çalışmalar ile deprem etkisi altında kalmış ve hasar görmüş tarihi yığma yapılarda, demir ve ahşap gergi çubukları kullanılarak bu elemanların önemini belirtmişlerdir.

Lagomarsino ve Calderini, (2014) yaptıkları çalışmada gergi çubuklarıyla desteklenmiş kemer kolonlarının, sismik davranışları üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır.

1.1.2 Kemerli yapıların davranışının incelendiği çalışmalar

Hradil vd., (2001) çalışmalarında Çek Cumhuriyeti'nde 1737 de yığma olarak inşa edilmiş tarihi bir köprüyü modellemişlerdir. Bu modelde yapının davranışını incelemek amacıyla hem deterministik hem de stokastik analizleri ANSYS bilgisayar programı yardımıyla yapmışlardır. Stokastik analizde farklı davranışlar göstermesi beklenen iki nokta incelenmiş, aralarındaki sıcaklık farkları (yaklaşık 60°C) göz önüne alınarak çözüme gidilmiştir. Bu çalışmadan elde ettikleri en önemli sonuç, özellikle sıcaklık farklılıklarında betonarme döşeme örtüsü ile yığma yapı arasında farklı davranışların olmasıdır.

Kanıt ve Işık, (2006) çalışmalarında tuğla kemerlerin deneysel sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada kemerlerin eşdeğer sürekli ortam parametreleri, deneysel çalışmada elde edilen şekil değiştirmeler ile sonlu elemanlar yöntemi sonuçları birleştirilerek elde edilmiştir. Ayrık elemanlar yönteminin sonlu elemanlar yöntemine göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bayraktar vd., (2007) çalışmalarında Trabzon'un Akçaabat ilçesinde bulunan Şinik Köprüsü'nü modelleyerek, köprünün deneysel ölçümleri, analiz sonucu ve dinamik karakteristikleri dikkate alınarak, sonlu eleman model iyileştirilmesi gerçekleştirilmiş, deprem davranışının tarihi köprünün üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel olarak elde edilen dinamik karakteristiğin, teorik olarak elde edilenden daha büyük olduğu ve bu yüzden bu farklılığın giderilmesi için sonlu eleman model iyileştirilmesi gerekliliği ortaya konmuştur.

Ocak, (2009) çalışmasında Batı Anadolu’da sıkça rastlanan kemer ve su yollarının inşası üzerinde durmuş, daha çok kentlere su getirmek amacıyla yapılan kemerlerin sanatsal önemini vurgulamıştır.

Birinci, (2010) yaptığı çalışmada taş kemer köprülerde sorunları gidermek amacıyla oluşturulan sonlu elemanlar modellemelerinde görülen, veri eksiklikleri nedeniyle ortaya çıkan bazı kabullerin deneysel yöntem kullanılarak doğruluğu araştırılmıştır. Yapının gerçek davranışını gösterecek en iyi sonlu eleman modeli belirlenmiştir.

Orhan, (2010) çalışmasında kemer köprülerin yük taşıma kapasitesini hesaplamak için kullanılan yöntemler irdelenmiştir. Kemerin göçme yükünün hesaplanmasında limit analiz yöntemine yönelik algoritma geliştirilmiş ve bu yöntemle elde edilen sonuç literatürdeki sonuçlara yakın çıkmıştır.

1.1.3 Kemerli yapıların güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar

Elmalich ve Rabinovitch, (2009) çalışmalarında kompozit malzemelerle güçlendirilmiş dairesel kemerlerin, gerilme analizini belirlemek amacıyla bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir.

Milani ve Bucchini, (2010) yaptıkları çalışmada fiber takviyeli polimer (FRP) şeritler ile güçlendirilmiş kemer, kubbe gibi eğrisel tuğla yapı elemanlarının göçme mekanizması ve göçme yükünü belirlemek için bir kinematik sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modelin göçme yükü ve göçme mekanizmasının güvenli sınırlar içerisinde kaldığını ve geliştirilen bu modelin uygulamada kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Garmendia vd., (2011) çalışmalarında taş kemerlerin onarım ve güçlendirilmesi için uygulanabilecek bir alternatif güçlendirme yöntemi önermişlerdir. Güçlendirme malzemesi olarak BTRM bazalt tekstil malzemesi kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda BTRM ile taş yapı arasında iyi oranda fiziksel ve kimyasal uyumluluk sağlandığı görülmüş, bu malzemenin yük taşıma kapasitesi ve yapının sünekliğine olumlu yönde katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Tao vd., (2011) çalışmalarında FRP kullanılarak güçlendirilmiş büyük bir taş kemer köprü modeli davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada FRP ile güçlendirilmiş kemerli taş köprüünün, yapısal performansını artırmak için etkili bir teknik olduğunu göstermiştir.

Caporale vd., (2012) yaptıkları çalışmada FRP ile güçlendirilmiş değişik özelliklerdeki kemerlerin göçme yükünü belirlemişlerdir. Bu çalışmada doğrusal ve doğrusal olmayan olmak üzere 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 formunun etrafına FRP sarılmış beton yapı elemanının eğilme davranışını değerlendirmiş, analitik bir model ile deney sonuçlarını karşılaştırmış ve bu teknoloji alanında uygulamasını göstermek istemişlerdir. Bu amaçlara ulaşmak için, FRP sarılmış kemer formundaki yapı elemanının eğilme yükü-deformasyon ilişkisi ve moment eğrilik ilişkisini üç kiriş ve dört kemer üzerinde yapılan deneylerle incelemişlerdir.

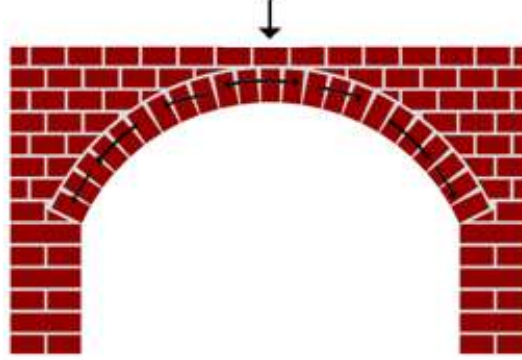
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

İnsanoğlu, on binlerce yıl öncesinden günümüze kadar, ihtiyaçlarını karşılamak için mevcut imkânlar ve günün teknolojisini kullanarak yaşamak amacıyla binalar, nehirleri geçmek için kemer köprüler, suları iletmek için kanallar, suları toplamak için sarnıçlar inşa etmiştir. Tarihi süreç içerisinde taşıyıcı sistemi taş ve benzeri malzeme ile inşa edilen bu yapılar yığma yapıdır. Her ne kadar günümüzde betonarme ve çelik yapılar en yaygın yapı türleri olsa da, dünyanın çeşitli ülkelerinde ve ülkemizin de birçok bölgesinde yığma yapılar hala inşa edilmektedir (Çöğür, 2007).

Ülkemizde özellikle kırsal kesimlerde yapılar yığma olup, gerek ekonomik açıdan uygun olmasından gerekse yığma yapılarda kullanılan malzemelerin kolay temin edilmesi nedeniyle gelecekte de yığma yapıların inşasının devam edeceği görülmektedir. Yığma yapı denildiğinde sadece günümüzde yapılan yapıları değil tarihi yapıları da dikkate almak gerekir. Tarihi yapıların gelecekte de önemini kaybetmemesi için bu yapıların korunması ve kemer formlarının yapısal davranışlarının bilinmesi gerekir.

Geometrik şeklinden dolayı kemer tipi yapı elemanları genelde basınca çalışmaktadır. Kemerli yapılar genelde düşey yükler etkisi altında olsa da bazen yatay yüklere de maruz kalmaktadırlar. Bu yapı elemanlarında oluşabilecek nispeten küçük çekme kuvveti bile, çekme kuvvetine karşı oldukça zayıf olan taş ve tuğlaların çatlamasına sebep olabilecektir. Bu konuda en büyük problem, mesnetlerin açıklık

doğrultusunda açılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, kemerin geometrik şekline bağlı olarak üzerine gelen düşey yük, üzengi yatağından geçerek kemerin mesnetlerine kadar iletilmektedir.



Şekil 1.4: Kemerde yük aktarım şeması.

Mesnetlerin açıklık doğrultusunda açılmasına engel olabilmek için, çoğu tarihi köprülerde, kemer açıklığı içerisinde üzengi taşının hemen üzerinden, taşlara ya da tuğlalara gergi çubuğu yerleştirilmiştir. Gergi çubuğu sayesinde kemerlerin mesnetlerinde oluşacak yanıl kuvvet alınacak ve böylece kemer ayakları bu yanıl kuvvetlerden belli bir oranda kurtulacaktır.

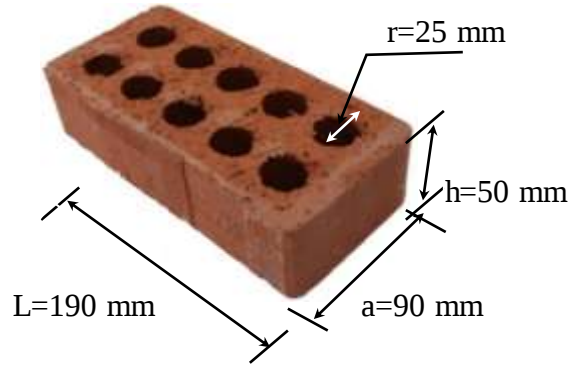
Bu tez de düşey yük kuvvetine maruz kalan kemerlerde kullanılan gergilerin, genel davranışa etkisi araştırılmıştır. Bu tezin esas amacı, kemer yapı formlarında gergi çubuğunun etkisini incelemek ve bu etkinin bilimsel bir dayanağa oturtulmasını sağlamaktır. Tez kapsamında 1'i gergisiz 5 tanesi farklı tasarımlardaki gergiye sahip toplam 6 adet tuğla kemer deney numuneleri düşey yük altında teste tabi tutulmuştur. Deneye tabi tutulan numunelerin sonlu elemanlar analizide yapılmıştır. Deney sonuçları, sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sonuçlar doğrultusunda gerginin kullanılmasıyla, gergili kemerlerin kontrol deney elemanına göre daha fazla yük taşıdığı gözlemlenmiştir. Günümüzde yapılan restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında gergi uygulamalarında karşılaşılan sorunlar ve yanlış uygulamalar değerlendirilmiş, gergi çubuklarının nasıl yapılması gerektiği hususunda bir takım öneriler sunulmuştur. Bu tez, bu alanda çok büyük bir eksikliği giderecek, restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında kullanılan gergi çubukları uygulamasının ne şekilde yapılması konusunda yol gösterecektir.

2. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu deneysel çalışmada kullanılan tuğla ve harcın mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik deneyler Türk Standartlarında belirtildiği şekilde Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kemer modellerinde kullanılan kagir tuğlalar ile ilgili basınç dayanımı testleri ve üç nokta eğilme testi, tuğlaları birleştirmek için kullanılan harç için basınç testleri ve yarmada çekme testleri, bunların yanında söz konusu malzemeler kullanılarak yapılan prototip duvarlar için basınç testleri gerçekleştirilmiştir.

2.1 Tuğla Özellikleri

Deneylerde kagir birim olarak boşluk oranı %22,9 olan düşey delikli tuğla kullanılmıştır. Türk Deprem Yönetmeliği, Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelikte (TDY, 2007) kagir yapılarda kullanılacak olan tuğlaların maksimum boşluk oranı %35 olarak belirtilmektedir. Tuğla boyutları 190x90x50 mm³'dür. Deney numunelerinde kullanılan tuğlaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Kullanılan tuğlanın delikli olması nedeniyle yükleme yönüne bağlı olarak tuğla farklı malzeme özellikleri gösterebilir. Bu nedenle tuğlaların basınç yüklemesi, deliğe dik ve delik yönünde olmak üzere iki farklı doğrultuda TS EN 772-1 (2012) (Kagir birimlerin basınç dayanımının tayini)'de belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Her bir yönde 6 adet olmak üzere toplam 12 adet tuğlanın basınç deneyleri yapılmıştır. Deliğe dik yönde test edilen numuneler TDD ile delik yönünde test edilen numuneler ise TDY ile sembolize edilmiştir. Deneylerde kullanılan kagir tuğla ve boyutları Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1: Kagir tuğla ve boyutları.

Tuğlaların basınç dayanım test sonuçları Çizelge 2.1’de topluca verilmektedir. Çizelge 2.1’e göre TDY1-TDY6 arasındaki tuğla numunelerindeki delikler basınç doğrultusunda yani düşey, TDD1-TDD6 arasındaki tuğla numunelerindeki delikler ise basınç doğrultusuna dik doğrultuda yani yatay olarak teste tabi tutulmuştur. Elde edilen basınç dayanım değerleri (σ), maksimum yükün (F_{maks}) uygulanan alana bölünmesiyle elde edilen değer TS EN 772-1 (2012)’de belirtilen δ katsayısı ile çarpılarak standart dayanım haline çevrilmiş değeridir. Deneylerde kullanılan tuğlaların boyutlarına göre TS EN 772-1 (2012)’de dikkate alınan δ katsayısı 0,777 olarak hesaplanmıştır. TDY1-TDY6 serisinde basınç yüzeyi hesaplanırken deliklerin boşlukları toplam alandan çıkarılmıştır. TDD1-TDD6 serisinde basınç yüzeyinde herhangi bir delik olmadığından doğrudan yüzey alanı hesaba katılmıştır. Tuğla delikleri düşey doğrultuda olduğu zaman tuğla basınç dayanımı (TDY), 38,84 MPa ile 61,03 MPa arasında değişirken, ortalama basınç değeri 49,72 MPa olarak hesaplanmıştır. Tuğla delikleri yatay doğrultuda olduğunda ise basınç dayanımı (TDD), 15,44 MPa ile 19,56 MPa arasında değişmiş ve ortalama basınç dayanımı 17,51 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 2.1: Kagir tuğla birimlerin basınç dayanımı test sonuçları.

Numune No	σ (MPa)	Numune No	σ (MPa)
TDY1	43,08	TDD1	15,95
TDY2	51,87	TDD2	19,00
TDY3	38,84	TDD3	15,44
TDY4	45,19	TDD4	19,18
TDY5	58,32	TDD5	15,92
TDY6	61,03	TDD6	19,56
Ortalama	49,72		17,51
Standart Sapma	8,05		1,75

TDY: Tuğla delik yönünde basınç dayanımı, TDD: Tuğla deliğine dik doğrultuda basınç dayanımı

Kagir birimlerin eğilmede çekme testleri TS EN 772-6 (2004) (Beton kagir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini)'te belirtildiği şekilde 6 adet tuğla numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tuğla numunelerin eğilmede çekme dayanımları Denklem (2.1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R_{tf} = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.1)$$

Burada R_{tf} ; eğilmede çekme dayanımı (N/mm^2), P; maksimum yükleme (N), b; (mm) tuğlanın genişliği, d; (mm) tuğlanın yüksekliğini, L; (mm) ise tuğlanın boyunu temsil etmektedir.

Delğe dik yönde test edilen numuneler TDEÇ ile delik yönünde test edilen numuneler ise TYEÇ ile gösterilmiştir. TDEÇ ve TYEÇ serisi için eğilmede çekme dayanımları test sonuçları Çizelge 2.2'de verilmektedir. TYEÇ numuneleri için eğilmede çekme dayanımı 5,73 MPa ile 7,52 MPa arasında değişirken, TDEÇ numuneleri için test sonuçları 3,57 MPa ile 5,81 MPa arasında değişmektedir. TYEÇ numunelerinin ortalama çekme dayanımı 6,58 MPa iken, TDEÇ numuneleri için ortalama çekme dayanımı 4,99 MPa'dır. Gerek basınç dayanımına gerekse eğilmede çekme deneyine ait fotoğraflar Şekil 2.2'de topluca verilmektedir.

Çizelge 2.2: Kagir tuğla birimler için eğilmede çekme dayanımları test sonuçları.

Numune No	P (kN)	R_{tf} (MPa)	Numune No	P (kN)	R_{tf} (MPa)
TYEÇ1	6,79	5,73	TDEÇ 1	7,60	3,57
TYEÇ2	6,80	5,74	TDEÇ 2	11,5	5,40
TYEÇ3	8,33	7,03	TDEÇ 3	11,09	5,20
TYEÇ4	8,91	7,52	TDEÇ 4	12,38	5,81
TYEÇ5	8,34	7,04	TDEÇ 5	11,25	5,28
TYEÇ6	7,57	6,39	TDEÇ 6	9,96	4,67
Ortalama	7,79	6,58		10,63	4,99

TYEÇ: Tuğla delik yönünde eğilmede çekme dayanımı, TDEÇ: Tuğla deliğine dik doğrultuda eğilmede çekme dayanımı



(a) TDY1-6 Numune



(b) TDD1-6 Numune



(c) TYEÇ1-6 Numune



(d) TDEÇ1-6 Numune

Şekil 2.2: Kagir tuğla birimlerin basınç ve eğilmede çekme dayanımı testleri.

2.2 Harcın Özellikleri

Deneylerde düşey ve yatay derzleri doldurmak amacıyla çimento esaslı harç kullanılmıştır. Kullanılan harcın çimento/kireç/kum karışım oranı hacimsel olarak 1/2/7'dir (Oymael, 2003). Deney numuneleri hazırlanırken 150x150x 150 mm³'lük küp kalıplarına dökülen harcın 28 günlük basınç dayanım testleri TS EN 12390-3 (2010) (Beton deney numunelerinde basınç dayanımının tayini) dikkat alınarak yapılmıştır. Söz konusu standarda göre numunelerin basınç dayanımları (σ), uygulanan yükün (F) uygulama alanına (A) bölümüyle elde edilen değerdir. Harç numuneleri standart küp basınç deney düzeneği Şekil 2.3'te, harcın basınç dayanım sonuçları Çizelge 2.3'te verilmiştir. Kemer numunelerinin örümünde kullanılan harcın, ortalama basınç dayanımı 1,75 MPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 2.3: Harcın basınç dayanımı test sonuçları.

Numune No	F (kN)	σ (MPa)
HBD1	40,6	1,81
HBD2	39,5	1,76
HBD3	38,1	1,69
Ortalama	39,4	1,75
Standart Sapma		0,05

HBD: Harcın basınç dayanımı.



Şekil 2.3: Harcın basınç dayanımı testi.

Harç numunelerinin çekme dayanımını belirlemek amacıyla silindir yarma deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen maksimum yükler TS EN 12390-6 (2010) (Beton deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini)'da belirtildiği şekilde Denklem (2.2) yardımıyla hesaplanmıştır. Yarmada çekme deney düzeneği Şekil 2.4'te ve harcın çekme dayanımı test sonuçları Çizelge 2.4'te verilmektedir.

$$f_{cst'm} = \frac{2P_s}{\pi h_c l_c} \quad (2.2)$$

Burada P_s , uygulanan maksimum yükü, h_c , silindir numunenin yüksekliğini, l_c ise silindir numunenin uzunluğunu ifade etmektedir. Yapılan yarmada çekme deneyi sonucunda çimento harcının ortalama dayanımı 0,34 MPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 2.4: Harcın çekme dayanımı test sonuçları.

Numune No	P_s (kN)	$f_{cst'm}$ (MPa)
HÇD1	12,11	0,39
HÇD2	9,69	0,31
HÇD3	9,63	0,31
Ortalama	10,47	0,34
Standart Sapma		0,04

HÇD: Harcın çekme dayanımı.



Şekil 2.4: Harcın çekme dayanımı testi.

2.3 Gergi Çubuğunun Özellikleri

Deneylerde kullanılan gergi, S235 (St-37) sınıfında $3 \times 10 \text{ mm}^2$ dikdörtgen kesit alanına sahip çelik çubuktur. Gergi çubuğu ile ilgili çekme testleri TS EN ISO 6892-1 (2011) (Metalik malzemeler-çekme deneyi) standardında belirtilen şekilde Denklem (2.3) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R_m = F_m \quad (2.3)$$

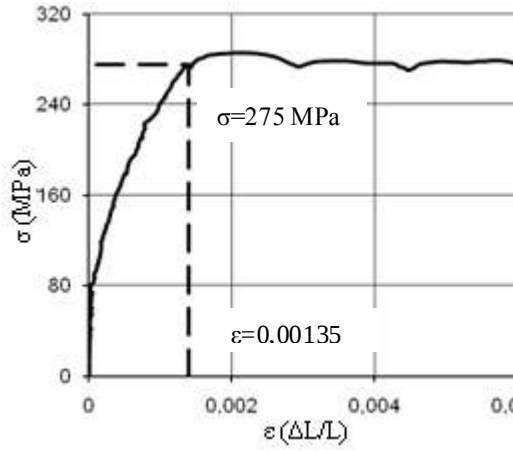
Burada; R_m çekme dayanımı (MPa), F_m deney sırasında akma noktası geçildikten sonra deney numunesinin dayandığı en büyük yüküdür.

Gergi çubuğunun gerilme, şekil değiştirme grafiğini çizmek için gerekli değerlerin elde edilebilmesi amacıyla 2 mm kalınlığında 100 mm genişliğinde ve St-37 sınıfında deney numunesi kullanılmıştır. Şekil 2.5'te gösterilen düzeneğe yardımıyla milivolt (mV) olarak ölçülen şekil değiştirmeler kalibre edilerek mm/mm cinsinden birim şekil değiştirmelere dönüştürülmüştür. Deney numunesi, 250 mm boyunca kesiti $2 \times 20 \text{ mm}^2$ olacak şekilde inceltirilmiştir. İnceltelen levha boyunca 5 adet strain-gauge (şekil değiştirme ölçer) yapıştırılmıştır. Levhanın iki kenarından ise iki adet LVDT (Linear Variable Differential Transformer) kullanılarak uzama ölçülmüştür. Böylece test sırasında ölçülen boy uzaması ilk boya bölünerek birim uzama hesaplanmıştır. LVDT'lerden elde edilen ölçümlere dayalı gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 2.5b'de verilmiştir. Bu grafikten görüleceği üzere deney numunesinin akma gerilmesi 275 MPa, akma gerilmesine karşılık gelen şekil değiştirme 0,00135 mm/mm ve elastisite modülü 203704 MPa ölçülmüştür. Numune kopma şekil değiştirmesinden daha az bir değer olan 0,013 şekil değiştirme değerine kadar uzamış fakat kopma olmamıştır.

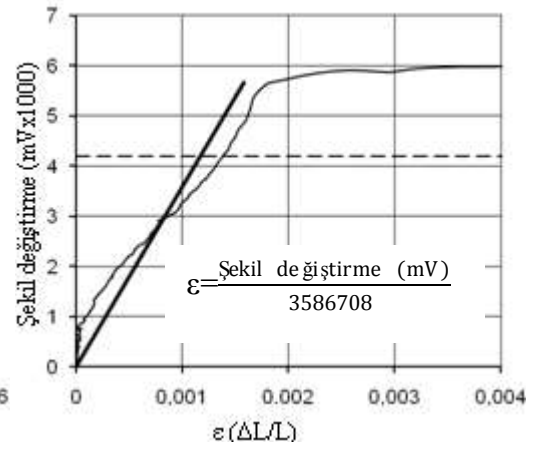
10 mm uzunluğunda ve 120 ohm dirence sahip 5 adet strain-gaugeler yine şekil değiştirmeleri ölçmek için deney numunesine yapıştırılmıştır. Strain-gaugelerden elde edilen 5 adet milivolt cinsinden ölçümün ortalaması LVDT'lerden elde edilen birim şekil değiştirmeler ile eşleştirilmiştir. Bu eşleştirme grafiği Şekil 2.5c'de gösterilmiştir. Bu şekilden görüleceği üzere yaklaşık 5667 mV ve bu değere karşılık gelen 0,00156 birim uzama değerine kadar grafik doğrusal bir davranış sergilemektedir. Bu farklılık bazı strain-gaugelerin yüzeyden ayrılmasından ve levhanın her bölgesinde eşit uzamamasından kaynaklanmıştır. Yinede numunenin akma dayanımı Şekil 2.5b'de açıkça görülmektedir. Şekil 2.5c incelendiğinde akmaya karşılık gelen şekil değiştirme doğrusal davranış sergileyen bölgede görülmektedir. Sonuç olarak 4200 mV strain-gauge ölçümü ve yine 0,00135 şekil değiştirme değeri çekme testi uygulanan numunenin akma değerlerini göstermektedir. Akma şekil değiştirmesinden daha küçük şekil değiştirmeler için LVDT'den elde edilen şekil değiştirmeler ve strain-gaugelerden elde edilen mV cinsinden ölçümler arasında doğrusal bir ilişki (doğru eğimi=3586708) kurulabilir. Gergi çubuğu üzerine yapıştırılan strain-gaugelerden okunan değerler, 3586708 değerine bölünerek birim şekil değiştirmeler mm/mm cinsinden hesaplanmıştır. Çekme testlerinin yapıldığı deney düzeneği, gerilme-şekil değiştirme ve şekil değiştirme kalibrasyon grafikleri Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.5: (a) Gergi çubuğu için hazırlanan deney düzeneği, (b) gerilme-şekil değiştirme grafiği, (c) şekil değiştirme kalibrasyon grafiği.

2.4 Kagir Birimlerin Basınç Dayanımı

Kemer numunelerinin basınç dayanımlarını bulmak amacıyla TS EN 1052-1 (2000) (Deney metodları basınç dayanım tayini) standartına göre uygun olarak üretilmiş üç adet 390x290x90 mm³'lük duvar numuneleri basınç testine tabi tutulmuştur. Duvar numunelerine Şekil 2.6b'de gösterildiği gibi iki adet LVDT yerleştirilmiştir. Bu LVDT'lerden duvar numunesinde meydana gelen yer değiştirmeler ölçülmüştür. Elde edilen yer değiştirmelerin, duvar numunelerinin ilk boyuna bölünmesiyle duvar numunelerinde meydana gelen şekil değiştirme hesaplanmıştır. Uygulanan yükün, duvar numunesinin alanına oranıyla da gerilme elde edilmiştir. Kagir duvarların basınç dayanımı testi ve bu teste ait gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 2.6'da, test sonuçları Çizelge 2.5'te topluca verilmektedir. Elastisite modülü-basınç dayanımı

oranı TS EN 1996-1-1 (2013) (Donatılı ve donatısız kagir yapılar için genel kurallar)’te belirtildiği gibi 1000 oranından düşük çıkmıştır.

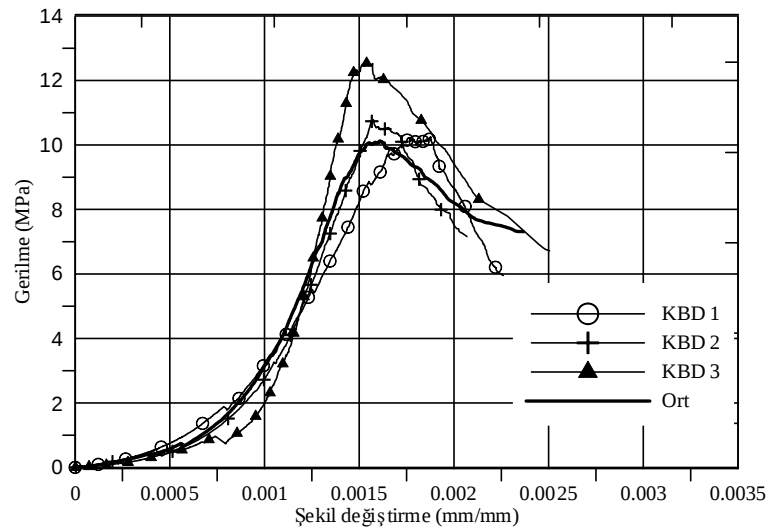
Çizelge 2.5: Kagir duvarların basınç dayanımları.

Numune No	Maksimum yük V (kN)	Basınç dayanımı f (MPa)	Elastisite modülü E (MPa)	Oran E/f
KBD1	378,0	10,8	3419	379
KBD2	414,0	11,8	3737	380
KBD3	441,0	12,6	4073	388
Ortalama	411,0	11,7	3743	382
$f_k = f/1,2$		9,8		

KBD: Kagir duvarların basınç dayanımı



(a)



(b)

Şekil 2.6: (a) Kagir duvarın basınç dayanım deney düzeneği, (b) gerilme-şekil değiştirme grafiği.

3. KEMER NUMUNE DENEYLERİ

3.1 Kemer Numunelerinin Hazırlanması

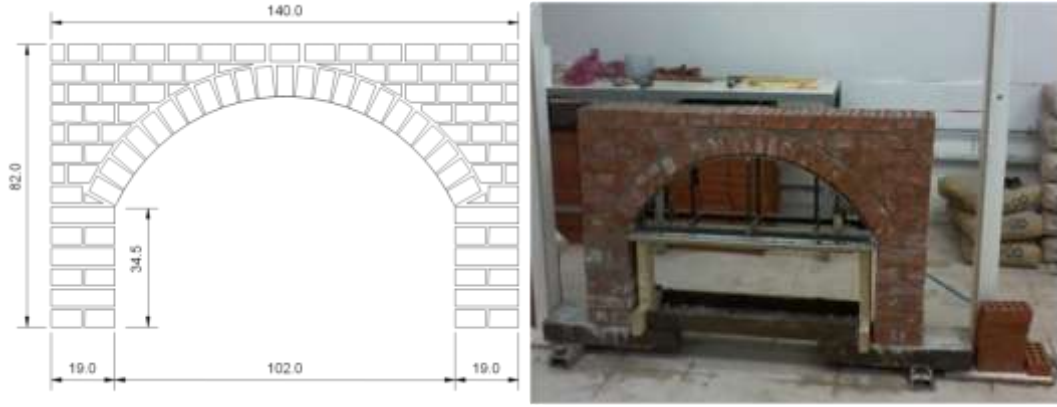
Ankastre mesnet tipini yansıtmak ve kemeri deney düzeneğine taşımak için U220 profilinin üzerine kemerler örülmüştür. Profillerin üzerine açtırılan deliklerden geçirilen donatılar, bulon yardımıyla sabitlenerek tuğla deliklerinden geçirilmiştir. Tuğla örümü sırasında, delikler ile donatı arasındaki boşluklar harç ile doldurularak, donatıların sabitlenmesiyle oluşturulan ankastre mesnet sayesinde kolonların alt uçlarındaki yer değiştirme ve dönme sıfırlanmıştır. Şekil 3.1’de U220 profili ve üzerine açılan deliklerden geçirilen donatılar gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Kemerin oturtulduğu kolonların altındaki U220 profili üzerinde açılan delikler.

Toplamda 6 adet olmak üzere $190 \times 90 \times 50 \text{ mm}^3$ ’lük düşey delikli tuğlalardan örülmüş kemer modelleri üzerinde deneyler yapılmıştır. $190 \times 190 \text{ mm}^2$ ’lik iki adet kolonun üzerine oturan kemer yapısının açıklığı 1020 mm, yüksekliği 475 mm ve kemer kolonlarının yüksekliği 345 mm’dir. Kemer yayının yarıçapı 566 mm’dir. Kemer numunelerinin bu boyutta yapılmasının sebebi kemer kolonlardaki açılmanın daha rahat fark edilmesi ve Aksaray Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarındaki deney düzeneğinin boyutlarına da uygun olma zorunluluğundandır. Kolonlardaki yatay ve

düşey derz aralıkları 10 mm iken, kolonların üstünde kalan yatay derz aralıkları 8 mm'dir. Kemer modellerinin genel geometrisi aşağıdaki Şekil 3.2'de verilmektedir.

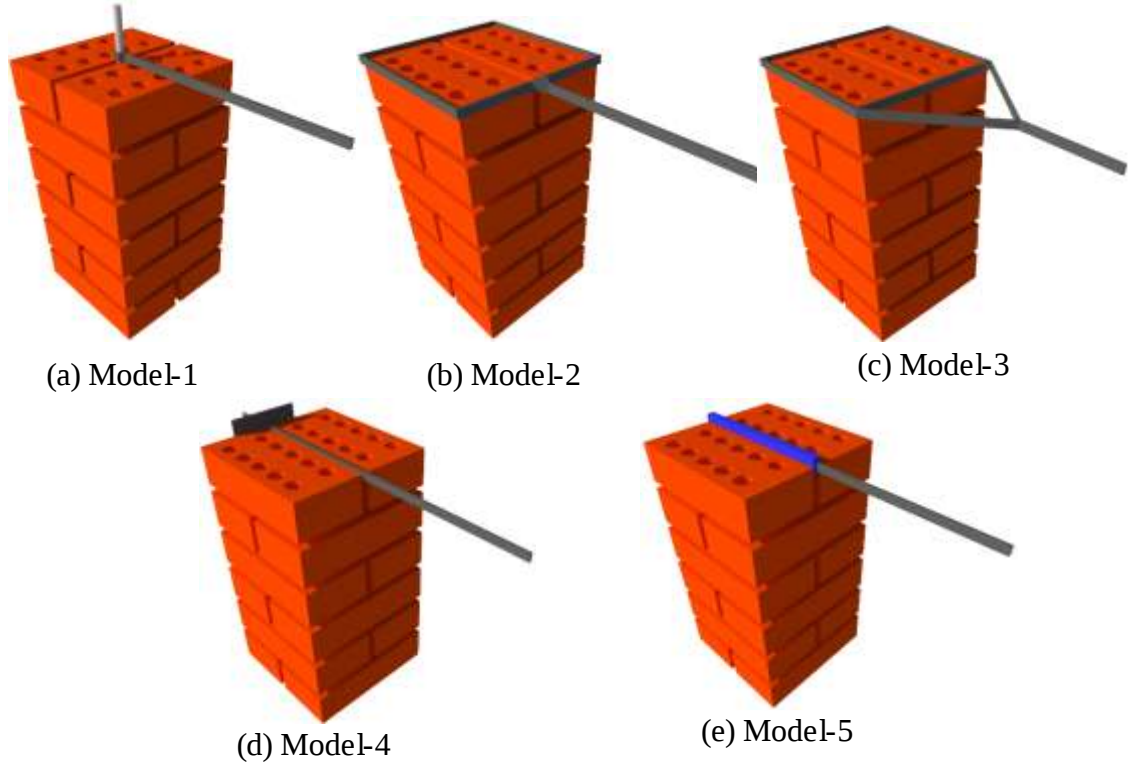


Şekil 3.2: Kemer modellerinin genel geometrisi.

Deneylerde kemerin orta noktasına düşey yük uygulanmıştır. Tekil yük uygulanmasındaki amaç, kemere yerleştirilen gergi davranışını daha belirgin şekilde gözlemlemektir. Eğer kemere yayılı yük uygulansaydı, kemer ayaklarında açılma miktarı sınırlı kalacak, kemer ayaklarında kısalmalar meydana gelecek ve gergi çubukları istenilen kuvvetleri almadan, kemer ciddi hasar görmüş olacaktı. Bu nedenle yapılan değişik tasarımlardaki gergilerin, yapı üzerindeki etkisini araştırmak ve gerginin davranışını belirleyebilmesi için yükleme durumu olarak kemer kilit taşı hizasından düşey yük tercih edilmiştir. Uygulanan yüklemenin üst sıradaki tuğlaların, özellikle kilit taşı görevi görecektir tuğlanın ezilmemesi amacıyla deney numunesinin üzerine 190x140x40 mm³ beton dökülmüştür. Örme işlemi tamamlanan kemerler 28-30 günlük sertleşme sürecine tabi tutulmuştur.

İleride ayrıntılı olarak ele alınacak olan deney numunelerinin her biri Model-1'den Model-5'e kadar sırasıyla isimlendirilmiş ve burada kısaca ana hatlarıyla özetlenmiştir. Çalışmada herhangi bir gergi uygulaması yapılmamış deney numunesi ise kontrol deney elemanı olarak isimlendirilmiştir. Kontrol deney elemanı örülmesinin amacı, gergi çubuksuz kemer ile gergi çubuğu kullanılarak örülen kemerleri karşılaştırarak gergi çubuğunun davranışını incelemektir. Model-1'de gergi çubuğu, kolonun içerisine düşey yönde yerleştirilen demir donatı ile sabitlenmiştir. Model-2'de gergi çubuğu, kolonu çepeçevre saracak şekilde bükülen 10 mm genişliğindeki bileziğe tek ve orta noktadan sabitlenmiştir. Model-3'te gergi çubuğu, kolonu çepeçevre saracak şekilde bükülen gergi çubuğu ile aynı özellikte 10 mm

genişliğindeki bileziğe iki ucundan kaynaklanmıştır. O bölgede meydana gelen üçgen, eşkenar üçgen olup her bir iç açısı 60° civarındadır. Model-4'te gergi çubuğu kolonun içerisine açılan bir delikten karşı tarafa geçirilmiş ve kare kesitli rijit bir levhaya sabitlenmiştir. Model-5'te gergi çubuğu, kolonun içerisine açılan bir delikten geçirilerek boşluklar epoksi reçinesi ile doldurulmuştur. Tüm modellere ait temsili çizimler Şekil 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.3: Kemer modellerine ait çizimler.

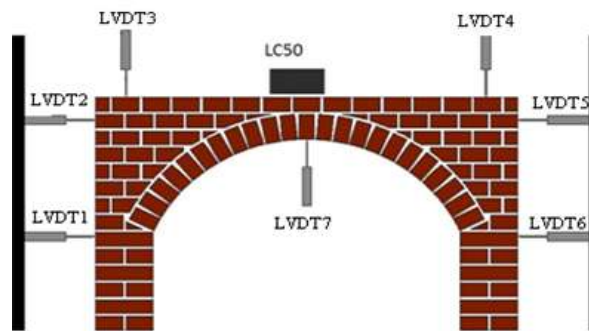
Tarihi yapılarda mevcut bulunan gergi sistemleri genellikle Model-1'e yakın sistemlerdir. Bu sebepten dolayı ilk modelde bu sistem irdelenmiştir. Model-2'deki sistem ise günümüzde yapılan bazı restorasyon çalışmalarında karşılaşılan bir durum olması nedeniyle incelenmiştir. Bu sistemde kare kesitli olan kolon, çepeçevre gergi çubuğu özelliğinde ve kalınlığında bir kare bilezik ile sarılmaktadır. Gergi çubuğu ise Şekil 3.3b'de gösterildiği şekilde kare kesitli bileziğin, kemer kolonun ortasına denk gelen noktasından kaynaklanmıştır. Model-3'te uygulanan gergi çubuğu, Model-2'de gözlemlenen yanlış uygulama sonucunda kare bileziğin açılmasını engellemek amacıyla, kare bileziğin iki ucundan kaynakla birleştirilmiştir. Diğer modeller ise bu çalışma kapsamında daha iyi davranış sergileyeceği tahmin edilerek veya uygulaması daha kolay yapılabileceği düşünülerek tasarlanan sistemlerdir.

Yükleme 500 kN kapasiteli bir hidrolik krika yardımıyla yapılmıştır. Yük hücresi, tatbik edilen yük durumunda basınca maruz kalmakta ve bu surette çıkış ucundan belirli bir gerilme vermek suretiyle çalışmaktadır. Yük hücresinden alınan gerilme kurulan mekanizma sayesinde bilgisayara aktarılmaktadır. Deney seti yer değiştirme ve kuvvet kontrollü yükleme sistemine sahiptir. Bu çalışmada deneyler kuvvet kontrollü yapılmış, ortalama yükleme oranı 0,3 kN/sn olarak uygulanmıştır. Maksimum yükten sonra yer değiştirme kontrollü moda geçilmiş ve ortalama yer değiştirme değeri 5 mm/sn olarak devam ettirilmiştir. Deney süresince kemerde meydana gelen boy kısalma ve uzamalarının ölçümleri strain-gaugeler, yatay ve düşey doğrultudaki yer değiştirme miktarları LVDT dönüştürücüleri yardımıyla elde edilmiştir.

LVDT'ler merkez milinin ileri geri hareketi sonucu belirli bir gerilim üretmektedir. LVDT'ler sayesinde 0,01 mm hassasiyetinde okuma yapmak mümkün olabilmektedir. LVDT'ler iki ana bölümden oluşmaktadır. Transformatör olan dış bölümünün içinde bobinler vardır ve bu bobinler hareket etmemektedir, iç kısmında ise hareket edebilen çekirdek bulunmaktadır. Yapı yer değiştirmeye başlayınca hareket eden çekirdek bobinin uçları arasında elektriksel bir potansiyel farkı oluşturmaktadır. Böylelikle yer değiştirme değişimi modelden okunmakta ve kayıt yapılmaktadır (Baran, 2008).

3.1.1 Yer değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi

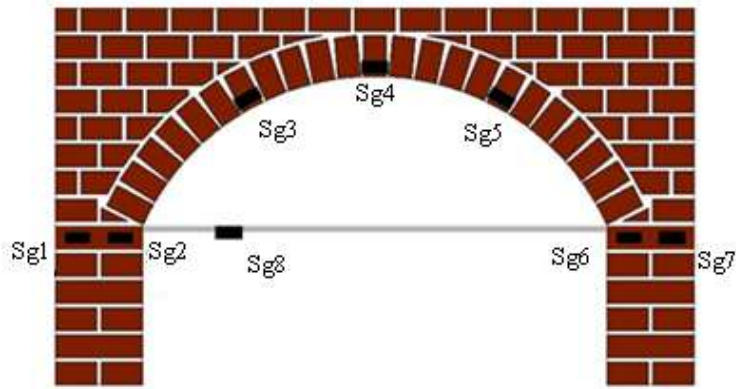
Deneyler sırasında meydana gelen uzama ve kısaltmaları ölçmek için 7 adet (LVDT) yer değiştirme ölçer kullanılmıştır. Deney düzeneğine yerleştirilmiş LVDT'ler ile kemerde meydana gelen yatay ve düşey yöndeki yer değiştirmeler ölçülmüştür. Şekil 3.4'te numune üzerine ön yüzeye yatay ve düşey doğrultuda LVDT'lerin nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Deney numunelerine LVDT'lerin yerleştirilmesi.

3.1.2 Şekil değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi

Şekil değiştirmeleri ölçmek için şekil değiştirme ölçerler (strain-gaugeler) sıkça kullanılır. Strain-gaugeler, elastik bir taşıyıcı üzerinde bulunan, birbirine paralel bağlantılı ince tellerden oluşmuştur. Strain-gaugeler şekil değiştirmesi ölçülecek olan numunenin yüzeyine yapışdırılır. Numuneye uygulanan yük ile doğru orantılı olarak strain-gaugeler uzayıp kısılacaktır. Deneyler sırasında kemerler üzerine yerleştirilen strain-gaugelerden kayda değer ölçümler alınamamıştır. Şekil 3.5'te strain-gaugelerin deney düzeneğine nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Deney numunelerine strain-gaugelerin yerleştirilmesi.

Şekil 3.6 ve Çizelge 3.1'de deney düzeneğinde kullanılan strain-gaugelerin ve LVDT'lerin veri toplama ünitesine bağlandıkları yerler gösterilmiştir. Deney ve ölçüm düzeneği ise Şekil 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.6: Deney düzeneğindeki yük hücresinin, strain-gaugelerin ve LVDT'lerin veri toplama ünitesine bağlanması.

Çizelge 3.1: Deney düzeneğinde kullanılan yük hücresinin, stain-gaugelerin ve LVDT 'lerin veri toplama ünitesi üzerindeki yerleri.

Adı	İstasyon No	Adı	İstasyon No
LC50	1211	Sg1	1217
LVDT1	1214	Sg2	1218
LVDT2	1227	Sg3	1221
LVDT3	1216	Sg4	1222
LVDT4	1215	Sg5	1223
LVDT5	1226	Sg6	1224
LVDT6	1228	Sg7	1231
LVDT7	1213	Sg8	1232



Şekil 3.7: Deney ve ölçüm düzeneği.

3.2 Kontrol Deney Elemanı

Kemerlerde kullanılan gergi çubuğunun önemi üzerindeki deneysel çalışmalar öncesinde, deneye kontrol deney elemanının tasarımı ve yapımı ile başlandı. Modelin yapımı; boyutları 190x90x50 mm³ olan delikli pres tuğlalardan ve tuğlaları birleştirmek için çimento/kireç/kum karışım oranı hacimsel olarak 1/2/7 olan harçtan yapılmıştır. Şekil 3.8’de ve Şekil 3.9’da görüldüğü gibi kemer kalıbı çelik profil üzerine yerleştirilip kemer örme işlemine başlanmıştır. Kemer örme işlemi bittikten sonra kemer duvarı örümü yapılmıştır. Kemer duvarı örümü yapılırken üçgen veya daha küçük parçalardaki delikli tuğlalar Aksaray Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında taş kesme aleti ile kesilerek yerleştirilmiştir.



Şekil 3.8: Kemer örümünde kullanılan kemer kalıbı.



Şekil 3.9: Kemer örümü.

Şekil 3.10’da görüldüğü gibi uygulanan yüklemenin bölgesel olarak üst sıradaki tuğlaları ezmemesi amacıyla deney numunesinin üzerine 4 cm kalınlığında beton uygulaması yapılmıştır. Numune deneye tabii tutulana kadar, numunenin dayanımını sağlamak için sulama işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.10: Kemer üzerine beton dökümü.

Daha önce belirtildiği gibi deneylerde kemerin orta noktasına düşey yük uygulanmıştır. Deney numunesinde kolonların alt uçları ankastre mesnet olarak tasarlanmıştır. Yani, kolonların alt uçlarındaki yer değiştirme ve dönme sıfırlanmıştır. Şekil 3.11’de kontrol deney elemanının deney düzeneğindeki görünümü gösterilmiştir.



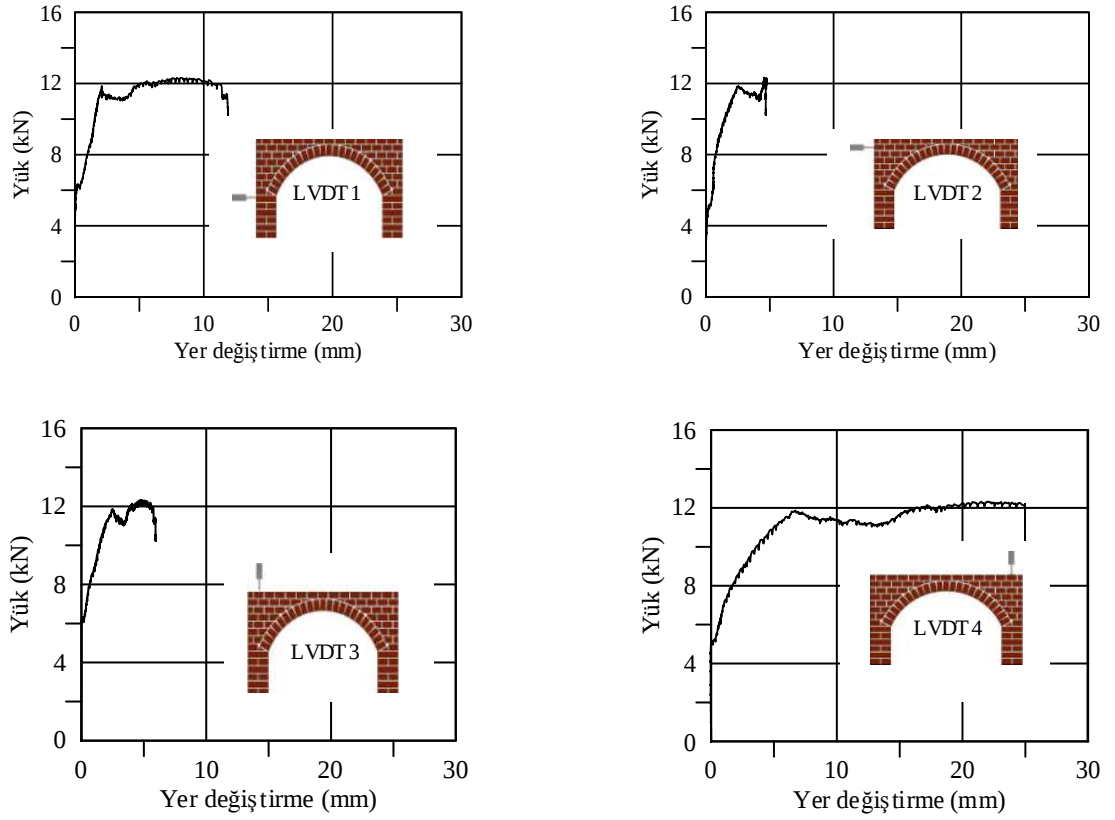
Şekil 3.11: Kontrol deney elemanının deney düzeneğindeki görünümü.

Şekil 3.12’de kontrol deney elemanının göçme sonucundaki hali gösterilmiştir. Numunede ilk çatlaklar kemerin sağ ve sol tarafında kemer kolonlarının üzerinde meydana gelmiştir. Kemerdeki ilk çatlaklar 8 kN’luk yük yüklendiği sırada olmuştur. Yük arttıkça kemer kilit taşı etrafında bulunan derzlerde açılmalar oluşmaya başlamıştır. Ayrıca sağ tarafta kemer ayağı mesnetten ayrılmıştır. Kontrol deney

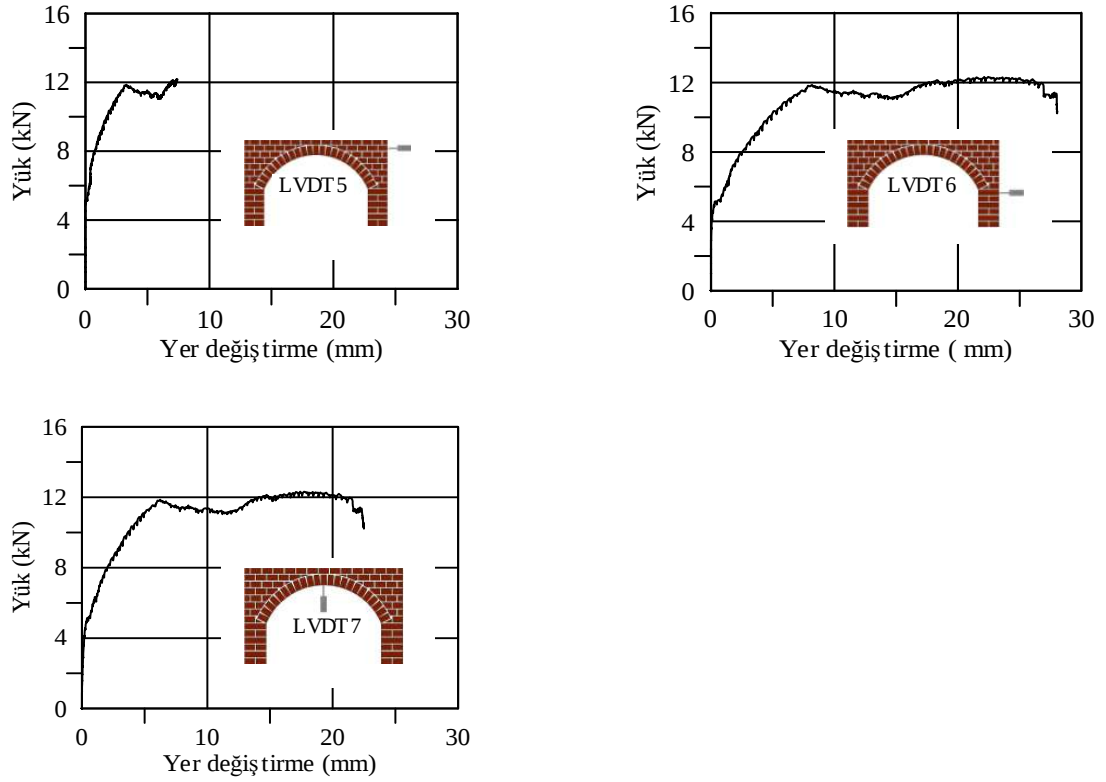
elemanı olarak alınan numune maksimum 12,32 kN yük taşımıştır. Maksimum yüke ulaşıldığında kilit taşına yerleştirilen LVDT 7’de düşey yer değiştirme 17,41 mm olarak elde edilmiştir. Kontrol deney elemanına ait LVDT’lerle ölçülen yük- yer değiştirme grafikleri ayrı ayrı Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Kontrol deney elemanının göçme sonucundaki hali.



Şekil 3.13: Kontrol deney elemanına ait yük- yer değiştirme grafiği.



Şekil 3.13 (devam): Kontrol deney elemanına ait yük- yer değiştirme grafiği.

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi kontrol deney elemanı üzerine yerleştirilen 7 LVDT’ den en fazla yer değiştirme 27,82 mm ile LVDT 6’dan ölçülürken, en az yer değiştirme ise LVDT 2’den ölçülmüştür. Şekil 3.12’den de görüldüğü gibi numune üzerindeki en büyük çatlaklar LVDT 6’nın bulunduğu kolon üzerinde meydana gelmiştir. Ayrıca LVDT 6’nın bulunduğu kolon, kemer ayağından ayrılmıştır. Bu sebepten dolayı en büyük yer değiştirme LVDT 6’da görülmektedir. Gerek Şekil 3.13’deki grafiklere gerekse Şekil 3.12’deki deney sonrası fotoğrafa bakıldığında, en fazla yer değiştirmenin kemerin sağ tarafında olduğu gözlemlenmektedir.

3.3 Model- 1

Model-1’deki kemer örme işlemi kontrol deney elemanındaki gibi yapılmıştır. Bu model de kullanılan gergi çubuğu, bir bulonun çevresine sarılarak, kemer kolonu içerisinden geçirilmiş donatıya kolaylıkla geçirilmesi sağlanıp kaynakla birleştirilmiştir. Gergi çubuğunun görünümü Şekil 3.14’te ve gergi çubuğunun kemere yerleştirilmiş hali Şekil 3.15’te gösterilmiştir. Örnek olarak 1492 yılında Üsküp’de inşa edilen Mustafa Paşa Camii’nde (Şekil 3.16a), Yerebatan Sarnıcı’nı da (Şekil 3.16b) ve Sultan Ahmet Camii (Şekil 3.16c) içerisinde bu tip gergi çubuğu

kullanılarak tasarlanmış kemerler görülmektedir. Tarihi yapıların birçoğundaki gergi çubuğu uygulamasına en yakın uygulama Model 1’de temsil edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.14: Kemerde kullanılan gergi çubuğu.



Şekil 3.15: Gergi çubuğunun kemere yerleştirilmesi.



(a) Mustafâ Paşa Cami (İstanbul).



(b) Yerebatan Sarnıcı (İstanbul).



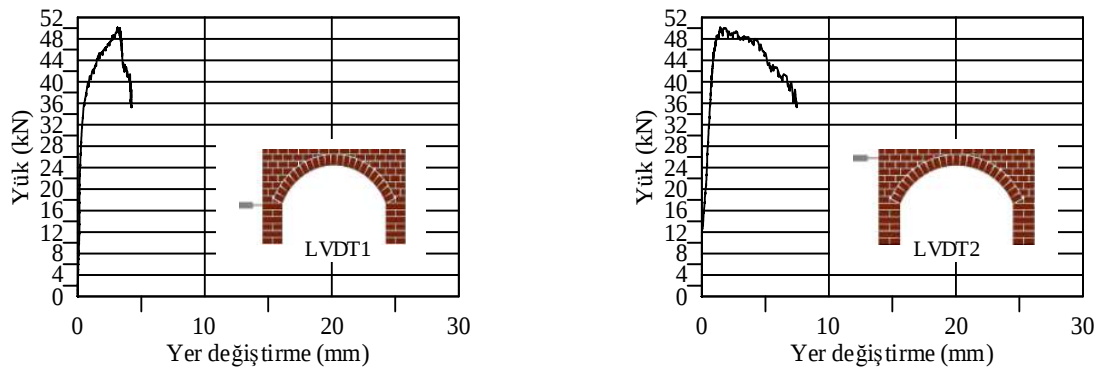
(c) Sultan Ahmet Cami (İstanbul).

Şekil 3.16: Model-1'e örnek tarihi yapılardaki gergi çubukları.

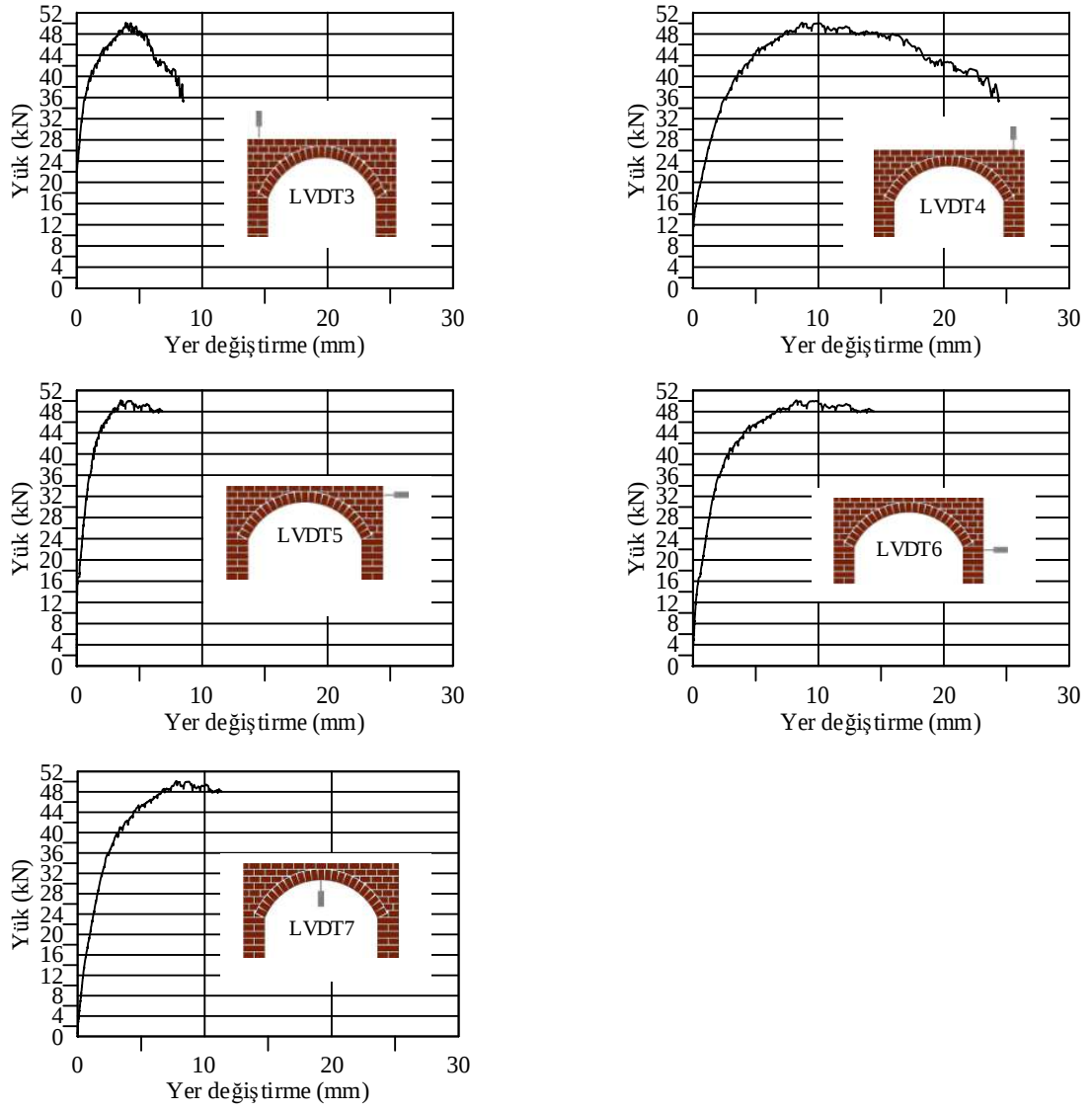
Deney öncesinde de tahmin edildiği gibi, gergili kemer numunesi gergisiz kemer numunesinden daha fazla yük taşımıştır. Kemer numunesinde ilk çatlaklar 32 kN'luk yükle kontrol deney elemanındaki gibi kemerin sağ ve sol tarafında kemer kolonlarının üzerinde meydana gelmiştir. Yük artarken kederde oluşan çatlaklar genelde kemerin sağ tarafında gerçekleşmiştir. Model-1 deney numunesi maksimum 50,12 kN'luk yük taşımıştır. Yük 50,12 kN'a çıktığında kemerin ortasında bulunan LVDT 7'de düşey yer değiştirme 7,78 mm olmuştur. Gergideki şekil değiştirme ise 0,0012 mm/mm olarak llmştir. şekil 3.17'de Model-1 deney numunesinin göçme sonucundaki hali, Model-1'e ait yük (kN), yer değiştirme (mm) grafiği ise şekil 3.18'de verilmiştir.



şekil 3.17: Model-1 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.



şekil 3.18: Model-1'e ait yük- yer değiştirme grafiği.



şekil 3.18 (devam): Model-1'e ait yük- yer değiştirme grafiği.

Model-1'de en büyük yer değiştirme LVDT 4'ten, en az yer değiştirme ise LVDT 1'den ölçölmüştür. şekil 3.17'de göröldüğü gibi LVDT 6'nın bulunduğu kolon, kemer ayağından ayrılmıştır. Deney sonucunda LVDT 6'dan elde edilen yer değiştirme miktarı 14,78 mm olarak ölçölmüştür. Model-1 gergi çubuklu olarak imal edildiği için kontrol deney elemanındaki kadar yer değiştirme yapmamıştır.

Tarihi yapılarda mevcut olan gergi çubuklarına en yakın tasarım Model-1 isimli deney numunesinde gerçekleştirilmiştir. Bu tür bir gergi çubuğu uygulamasının güçlendirme çalışmalarında kullanılamayacağı bilinen bir gerçektir. Çünkü kemer-kemer kolonu birleşim bölgesinin içersine bu tür bir uygulamanın, bu bölgeye zarar vermeden yapılması mümkün değildir. Bu bağlamda, Model-1 isimli deney numunesi ikinci bir kontrol deney elemanı olarak dikkate alınabilir.

3.4 Model-2

Model-2’de kemer örme işlemi diğer modellerde olduğu gibi gerçekleştirilmiştir. Bu model de gergi çubuğu, kemer kolonu etrafında sarılmış kare kesitli bileziğe orta ve tek noktasından kaynak yardımıyla birleştirilmiştir. Kemer modelinde kullanılan gergi çubuğu Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.19: Modelde kullanılan gergi çubuğu.

Model-2 deney numunesinde kullanılan gergi örneği Şekil 3.20a’da gösterilen İstanbul’daki Sultan Ahmet Cami’nde ve Şekil 3.20b’de gösterilen Ayasofya Şadırvanı’nda görülmektedir.



(a) Sultan Ahmet Cami.



(b) Ayasofya Şadırvanı (URL-1).

Şekil 3.20: Model-2'ye örnek tarihi yapılardaki gergi çubukları.

Gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçmek için kemer numunesine yerleştirilen LVDT'ler ve strain-gaugeler diğer modellerde olduğu gibi deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deney düzeneği ve numunenin görünümü Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Deney numunesinde 10 kN da ilk çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Uygulanan yük arttıkça gergi çubuğundaki gerilmede de artmalar olmuştur.

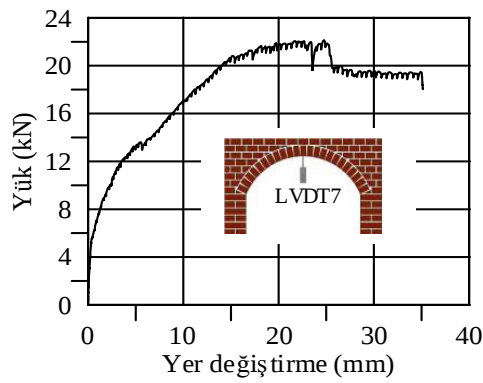
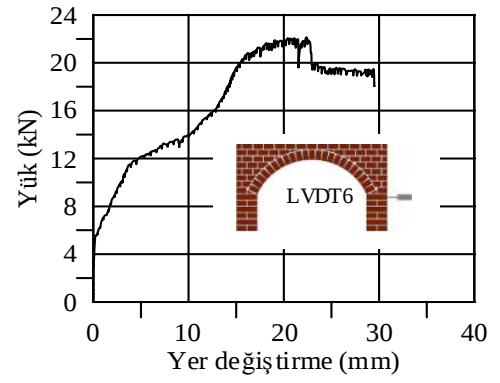
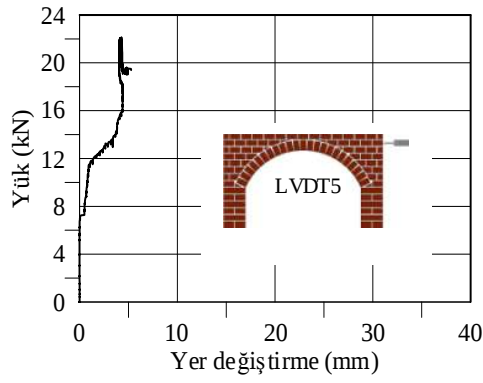
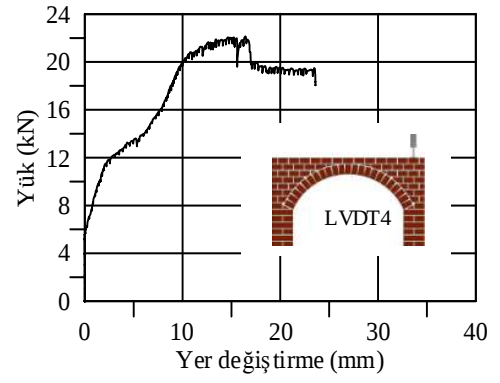
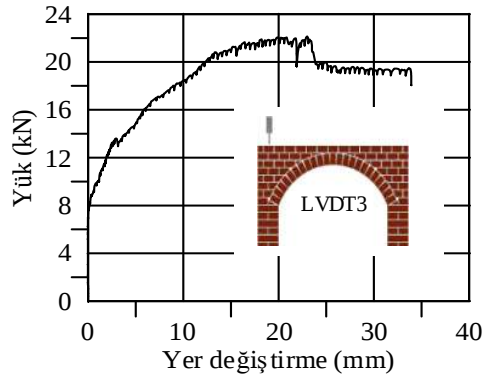
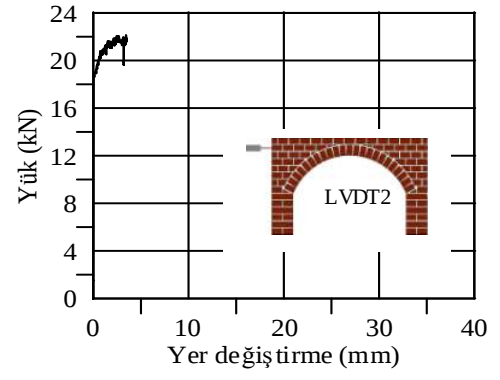
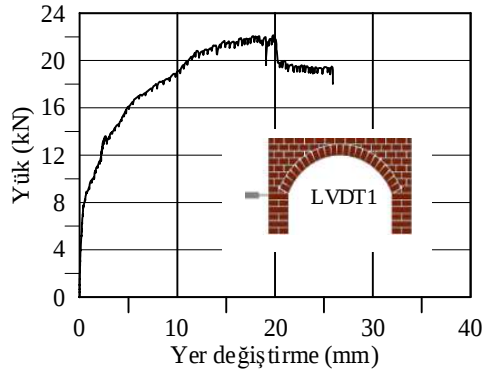


Şekil 3.21: Model-2 deney numunesinin görünümü.

Model-2 deney numunesine uygulanan yük, ilk çatlağın oluştuğu yüke (10 kN) ulaştığında gergi çubuğundaki şekil değiştirme 0,000049 mm/mm olmuştur. Yükün artmasıyla kemerdeki çatlak açılmaya başlamıştır. Gergideki şekil değiştirme 0,000225 mm/mm olduğu zaman sağ ve sol mesnetlerde açılmalar gözlenmiştir. Deney numunesi maksimum 22,14 kN'luk yük taşımıştır. Maksimum yük altında gergi çubuğundaki şekil değiştirme 0,0006 mm/mm iken kemer ortasında bulunan LVDT 7'deki düşey yer değiştirme 24,77 mm'dir. Şekil 3.22'de göçme sonrasında kemer numunesinin son hali ve Model-2 için deney sonrasında elde edilen yük (kN)-yer değiştirme (mm) grafiği ise Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.22: Model-2 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.



Şekil 3.23: Model-2'ye ait yük- yer değiştirme grafiği.

Model-2’de maksimum yer değiştirme 38 mm ile LVDT 7’den yani kilit taşı altındaki LVDT’den ölçölmüştür. şekil 3.22’de göröldüğü üzere kemer orta noktasında çok büyük açılma meydana gelirken, kemer duvarlarında çok fazla çatlama ve açılma olmamıştır. Bu sebeple en az yer değiştirme de kemer duvarlarında bulunan LVDT 2’de ve LVDT 5’de olmuştur. Diğer iki deneyde kemer ortasında bu kadar büyüklükte çatlama olmadığı için, düşey yer değiştirme miktarları da Model-2’deki kadar fazla değildir.

Model-2’de kemer kolonlarının etrafına kare şeklinde sarılan bileziğin iç kenarının orta noktasından kaynaklanan gergi çubuğundaki gerilme, kare bileziğin açılmasından sonra başladığı için bu durum istenilen bir davranış değildir. Gergi çubuğunun asıl amacı, kemerde deformasyonun oluşmasıyla birlikte kemerde oluşacak çekme gerilmelerinin gergi çubuğunda oluşmasını sağlamaktır.

3.5 Model-3

Model-3’de kemer örme işlemine başlamadan önce, kemere yerleştirilecek gergi çubuğu kemerin etrafını saran 2x10 mm² kesitindeki bileziğe iki ucundan kaynaklanmıştır. Meydana gelen şekil, üçgen şeklinde olup kaynak yardımıyla birleştirilmiştir. Kemerde kullanılan gergi çubuğu şekil 3.24’te verilmiştir. Model-3’ün deney düzeneğine yerleştirilmiş şekli şekil 3.25’te gösterildiği gibidir.



şekil 3.24: Kemerde kullanılan gergi çubuğu.



Şekil 3.25: Model-3 deney numunesinin görünümü.

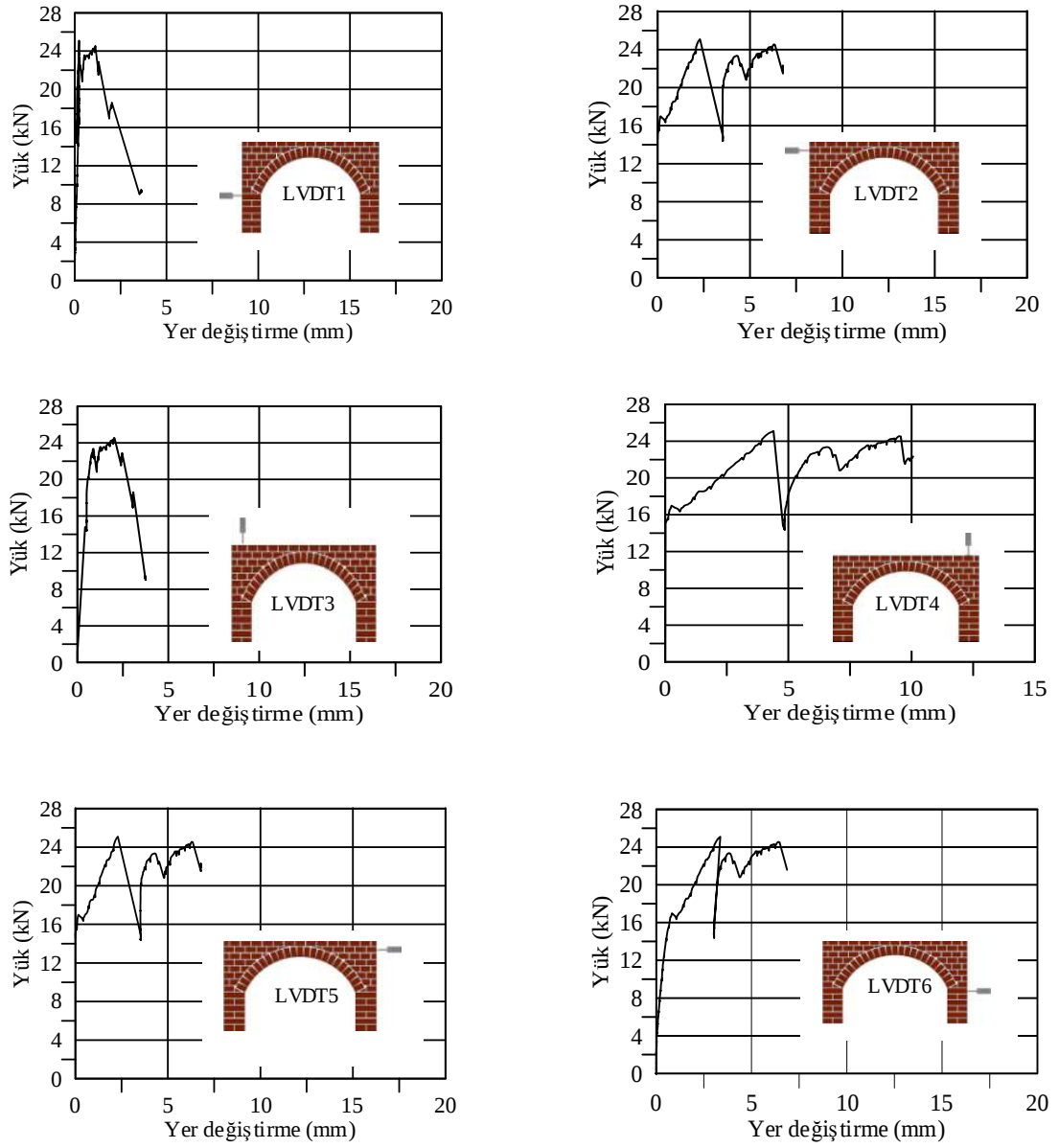
Yük 13,21 kN iken kemer duvarının sağ tarafında ilk çatlaklar meydana gelmiştir. Deney numunesinde ilk çatlakların oluştuğu anda gergi çubuğundaki şekil değiştirme miktarı 0,0003 mm/mm'dir. Yükün 15 kN'a çıkmasıyla kemer üzerinde çatlamlar oluşmuş, ezilmeler başlamıştır. Yük 23 kN'a ulaşınca gergi üzerindeki kaynak kopmuştur. Kaynağın kopmasıyla, kemerin orta noktasında bulunan LVDT 7'de ve kemerin sağ kolonunun üzerinde bulunan LVDT 6'da yer değiştirmenin arttığı gözlenmiş ve gergi çubuğundaki şekil değiştirme miktarı 0,0008 mm/mm olarak ölçülmüştür. Model-3 deney numunesi maksimum 25,09 kN'luk yük taşımıştır. Model-3 deney numunesi maksimum yüke ulaştığı anda gergi çubuğundaki şekil değiştirme miktarı 0,0009 mm/mm ve kemerin ortasında bulunan LVDT 7'den elde edilen düşey yer değiştirme 3,90 mm'dir. Deney sonrasında gergi üzerindeki kaynağın açılmış hali Şekil 3.26'da, Model-3 deney numunesinin göçme sonucundaki hali Şekil 3.27'de, deney sonrasında elde edilen, yük (kN)- yer değiştirme (mm) grafiği ise Şekil 3.28'de verilmektedir.



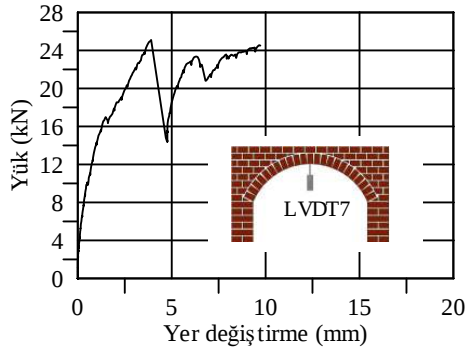
Şekil 3.26: Model-3 deney sonrasında gergideki kaynağın açılmış hali.



Şekil 3.27: Model-3 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.



Şekil 3.28: Model-3'e ait yük- yer değiştirme grafiği.



Şekil 3.28 (devam): Model-3'e ait yük- yer değiştirme grafiği.

Model-3'de en fazla yer değiştirme LVDT 4 ve LVDT 7'den ölçülmüştür. Bu model de en fazla çatlamlar, açılmalar kemer orta noktasında ve kemerin sağ duvarında görülmüştür. Kemere yerleştirilen üçgen şeklindeki gergi çubuğu LVDT 6'nın bulunduğu tarafta kaynaktan kopmuş. Kaynağın kopmasıyla LVDT 6, LVDT 7 ve LVDT 4'te yer değiştirme artmıştır.

Model-3'te uygulanan yöntemde, kemer kolonlarını saran kare kesitli bilezik ve bileziğin iki köşesinin birleşim bölgelerindeki detaylandırmanın çok iyi yapılması gerekmektedir. Bu modelde de görüldüğü gibi kare kesitli bileziğin iki ucundan birleştirilmesiyle oluşturulan eşkenar üçgen şeklindeki bölgenin kaynakla çok iyi bir şekilde birleştirilmesi gerekir. Bu birleşim yerlerinde oluşabilecek kayma gerilmesi, kaynakla birleştirilen yerlerin birbirinden ayrılmasına neden olabilir.

3.6 Model-4

Model-4'te kemer örme işlemi tamamlandıktan sonra kemer kolonları matkap yardımıyla delinip, gergi çubuğu bu deliklerden geçirilerek dışarı çıkarılmıştır. Gergi çubuğu geçirildikten sonra, kare şeklinde kesilen rijit levhalara kemer kolonu dışından kaynak yardımıyla bağlanmıştır. Model-4'e ait gergi çubuğu sistemi Şekil 3.29'da verilmiştir.



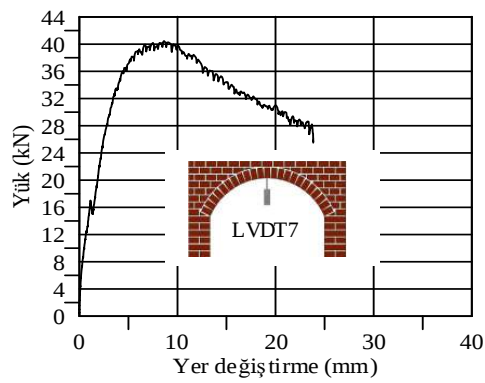
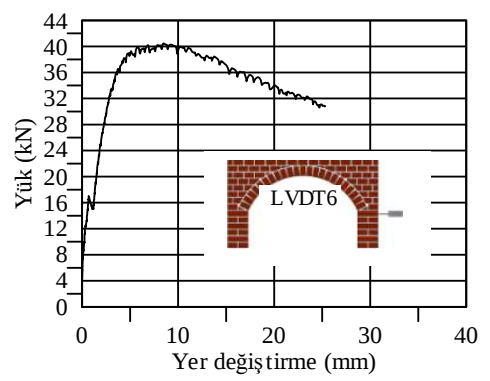
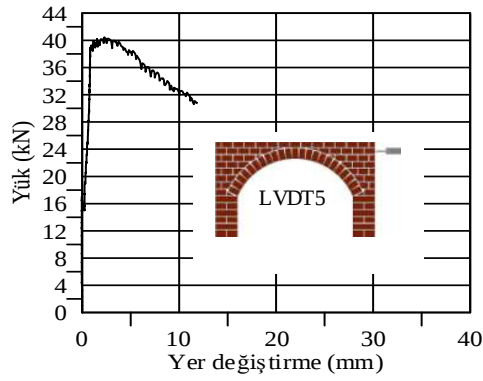
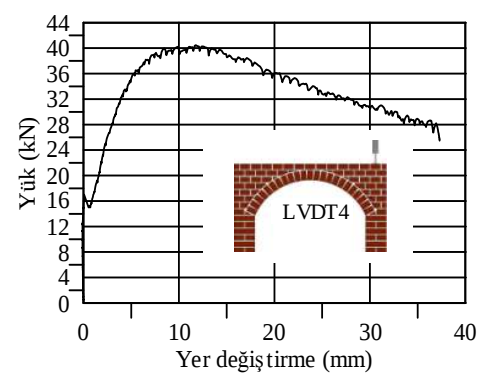
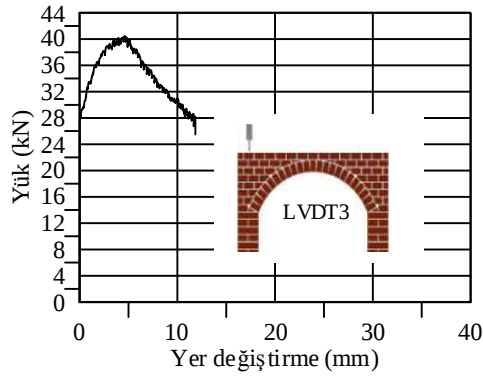
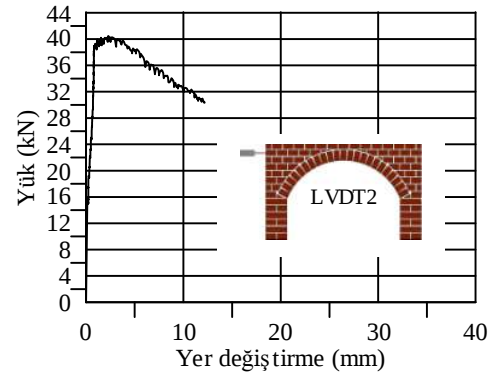
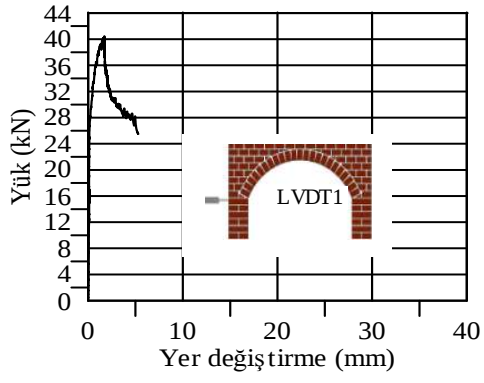
Şekil 3.29: Model-4 olarak isimlendirilen gergi çubuğu sistemi.

Model-4, uygulanan düşey yüke karşılık maksimum 40.47 kN'lık yük taşımıştır. Deney numunesi maksimum yük altında iken gergi çubuğunda meydana gelen şekil değiştirme miktarı 0,0011 mm/mm ve kemerin ortasında bulunan LVDT 7'den elde edilen düşey yer değiştirme 8,63 mm'dir. Model-1'den sonra en fazla yükü Model-4 taşımıştır. Model-4 deney numunesinin göçme sonucundaki hali Şekil 3.30'da gösterilmiştir.

Kemer numunesi, üzerine yapılan yükleme altında kemer maksimum taşıma yüküne ulaştığında Şekil 3.30'dan da görüldüğü gibi kemerin sağ üzengi taşının üzerinde ve kemer sağ kolon mesnetlenme bölgesinde büyük çatlakların oluştuğu görülmüştür. Model-4 için deney sonrasında elde edilen yük- yer değiştirme grafiği Şekil 3.31'de verilmiştir.



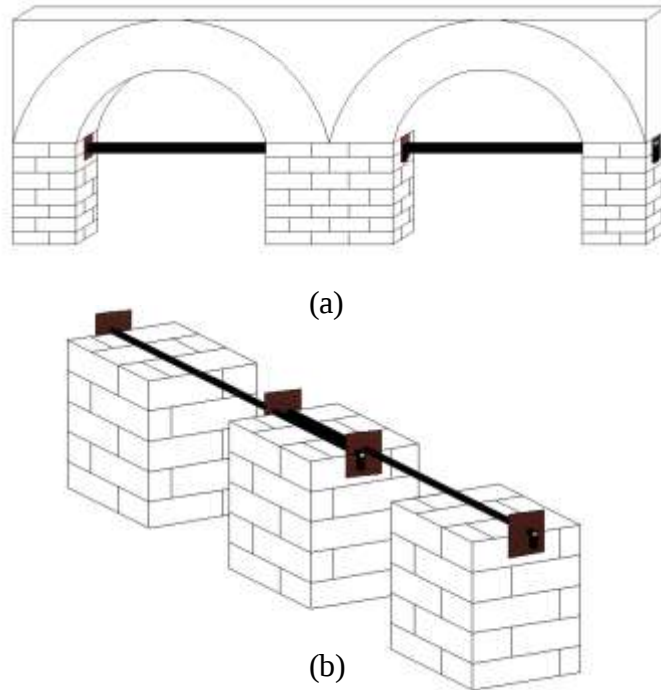
Şekil 3.30: Model-4 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.



şekil 3.31: Model-4'e ait yük- yer değiştirme grafiği.

Kemer numunesi maksimum yüke ulaştığı zaman en fazla yer değiştirmeyi 11.76 mm ile LVDT 4 yapmıştır. Deney sonunda en fazla yer değiştirme yine LVDT 4’de olurken, en az yer değiştirme ise LVDT 1’de gerçekleşmiştir. Şekil 3.30’da görüldüğü gibi LVDT 1’in bulunduğu tarafta kemerde çok fazla çatlama veya açılma gözlenmemiştir. Şekil 3.31’deki grafikler incelendiği zaman yine aynı şekilde LVDT 6 ve LVDT 7’de de yer değiştirme miktarının fazla olduğu görülmüştür.

Model-4 genelde köşe ve kenar kemer ayakları için daha kolay kullanılacak bir modelleme olarak görünmesine rağmen, orta veya iç kemer kolonları içinde uygulama açısından çok problemli değildir. Sadece kolon kemer birleşim bölgelerine matkapla açılacak delik çapı arttırılarak, bu delikten iki adet gergi çubuğu geçirilmesiyle bu problem giderilebilir. Şekil 3.32a’da Model-4 için yapılabilecek örnekteki gerginin gösterimi ve Şekil 3.32b’de ise bu örnekteki kemer kolonları için gerginin nasıl uygulanabileceği gösterilmiştir. Şekil 3.32’den de görüldüğü gibi kemer üzengi taşı ile kemer kolonunun birleşim bölgelerinden açılan, tek bir delikten geçirilen iki gerginin, kemer kolon birleşim bölgelerine zarar vermeyecek şekilde kemer dışından rijit levhalarla sabitlenerek uygulama açısından zor bir çalışma olmayacağı gösterilmiştir.



Şekil 3.32: (a) Model-4 için yapılabilecek uygulama örneğindeki gerginin gösterimi, (b) Model-4 için yapılabilecek uygulama örneğindeki kemer kolonları için gergi uygulamasının gösterimi.

3.7 Model-5

Model-5’de kemer örme işlemi yapıldıktan sonra kemer kolonları Model 4’deki gibi matkap yardımıyla delinmiştir. Bu delik Concessive 1406 adlı epoksi tamir harcı ile doldurulmuştur. Concessive 1406, epoksi esaslı, iki bileşenli, tamir, ankraj ve montaj harcıdır. Epoksi sonrasında gergi çubuğu deliklerden geçirilmiştir. Çizelge 3.2’de Concessive 1406’nın karışım oranları verilmiştir.

Çizelge 3.2: Concessive 1406’nın karışım oranları (URL-2).

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

Concessive 1406’nın kullanım yerleri; beton ve taş duvarlarda filiz ekiminde, geniş çatlakların onarımında ve izolasyonunda, her tür metal ve çelik aksamın beton ve çelik yapı elemanlarına montajında ve yapıştırılmasında, çatlak enjeksiyonunda dış yüzeylerin kapatılması ve enjeksiyon pakelerinin sabitlenmesinde, köprü ve viyadüklerde korkuluk ve deprem sönümleyicilerin sabitlenmesinde, ankraj elemanlarının sabitlenmesinde kullanılır.

Concessive 1406’nın avantajları; pasta kıvamındadır, kolay uygulanır ve tavan uygulamalarında sarkma yapmaz. Betona ve çeliğe mükemmel aderans sağlar. Mekanik dayanımlarını çabuk kazanır. Kimyasallara dayanıklıdır. Su ve gaza karşı geçirimsizdir. Dolgu kaldırma kapasitesi yüksektir. Nemli yüzeylere aderans sağlar. Çizelge 3.3’te, Concessive 1406’nın teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3: Concessive 1406’nın teknik özellikleri (URL-2).

Malzemenin Yapısı	Epoksi Reçine
Concessive 1406 Bileşen A	Epoksi Sertleştirici
Concessive 1406 Bileşen B	
Renk	Gri
Karışım Yoğunluğu	1,70+0,05 kg/litre
Basınç Dayanımı (TS EN 196)	
1 gün	17 N/mm ²
7 gün	25 N/mm ²
Yapışma Dayanımı (28 gün)	
Betona	3,0 N/mm ²
Çeliğe	3,5 N/mm ²

Çizelge 3.3 (devam): Concessive 1406'nın teknik özellikleri (URL-2).

Uygulama Kalınlığı	Min. 2 mm
Uygulama Kalınlığı	Maks. 30 mm
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	+5 °C +30 °C
Kullanma Süresi (+20 °C)	40 dak.
Yeniden Kaplanabilme Süresi (+20 °C)	18-24 saat
Üzerinde Yürünebilme Süresi (+20 °C)	24 saat
Servis Sıcaklığı	-15 °C + 90 °C
Tam Kırılma Süresi (+20 °C)	7 gün

Şekil 3.33'te Model-5'e ait deney numunesi ve kemerde kullanılan gergi çubuğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.33: (a) Model-5 deney numunesinin görünümü, (b) Model-5'de kullanılan gergi çubuğu.

Model-5 deney numunesi maksimum 32,11 kN'luk yük taşımıştır. Maksimum yük altında gergeri çubuğunda meydana gelen şekil değıştirme miktarı 0,0012 mm/mm ve kemerin ortasında bulunan LVDT 7'den elde edilen düşey yer değıştirme 7,59 mm'dir. Deney numunesi 32,11 kN yüke ulaştığında maksimum yer değıştirme 11,03 mm ile LVDT 4'den ölçülürken, minimum yer değıştirme ise 1,40 mm ile LVDT 1 ve 1,44 mm ile LVDT 2'den ölçülmüştür. Deney sonucunda da maksimum yer değıştirme 45 mm ile LVDT 4'den, minimum yer değıştirme ise 5,06 mm ile LVDT 1' den ve 8,18 mm ile LVDT 2'den elde edilmiştir. Şekil 3.34'te görüldüğü gibi LVDT 1 ve LVDT 2'nin yer aldığı tarafta çatlak ve açılmalar kemerin sağ tarafına göre oldukça azdır. Bu sebeple kemerin sol tarafında maksimum yükte, 1.4 mm kadar küçük bir yer değıştirme meydana gelmiştir. Model-5'e ait numunenin göçme sonucundaki hali Şekil 3.34'te, LVDT'lerle ölçülen yük-yer değıştirme grafiğı ise Şekil 3.35'te verilmektedir.

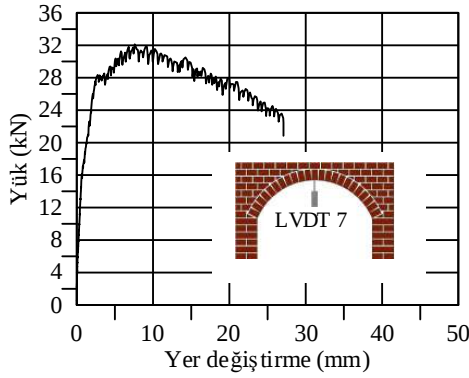
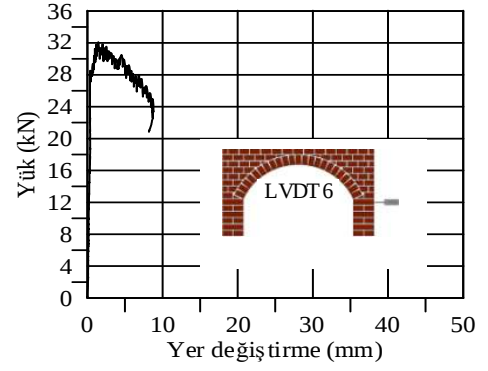
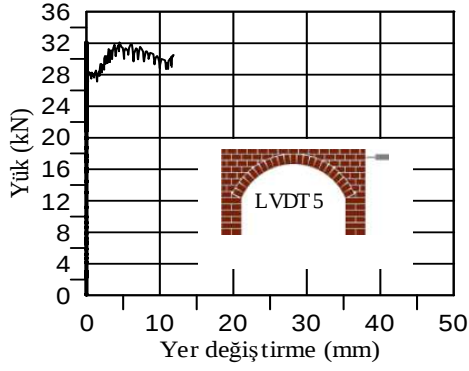
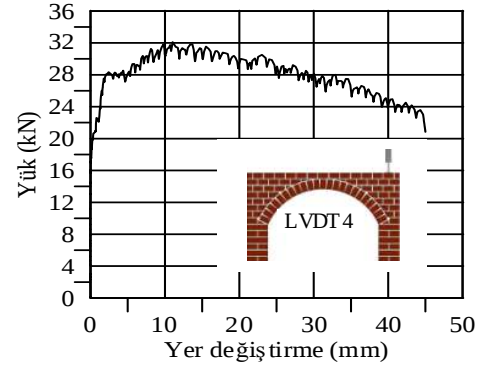
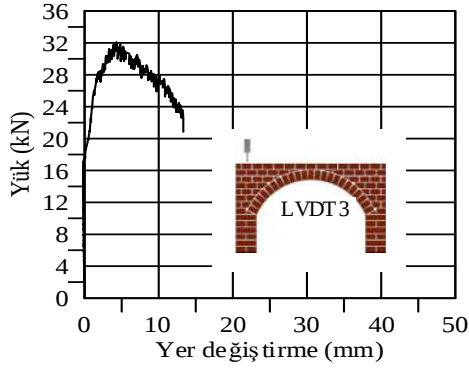
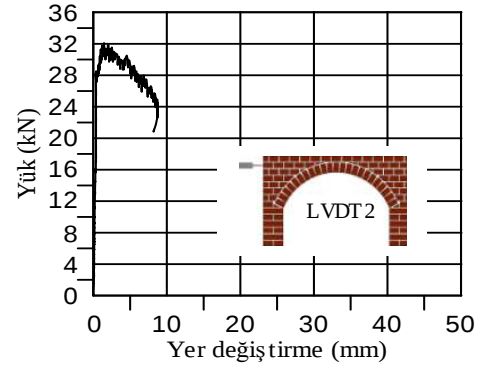
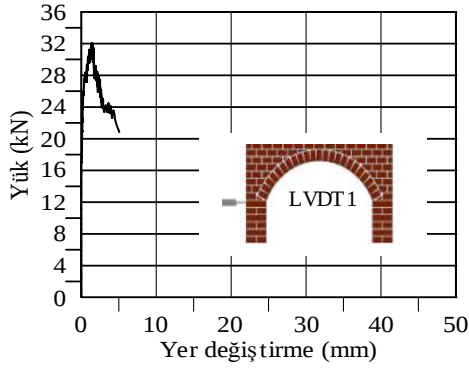


(a)



(b)

Şekil 3.34: Model-5 deney numunesinin göçme sonucundaki hali.



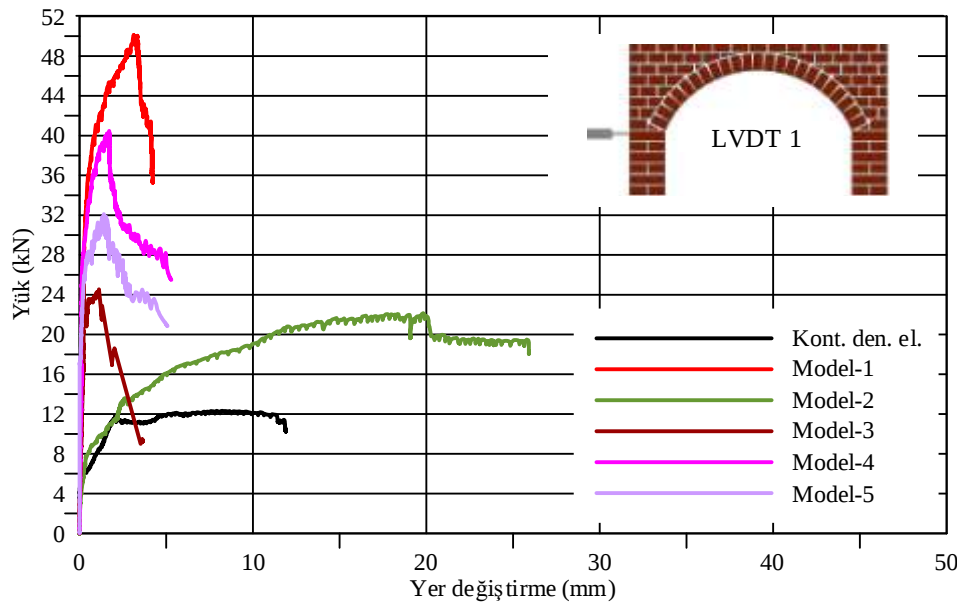
şekil 3.35: Model-5'e ait yük- yer değiştirme grafiği.

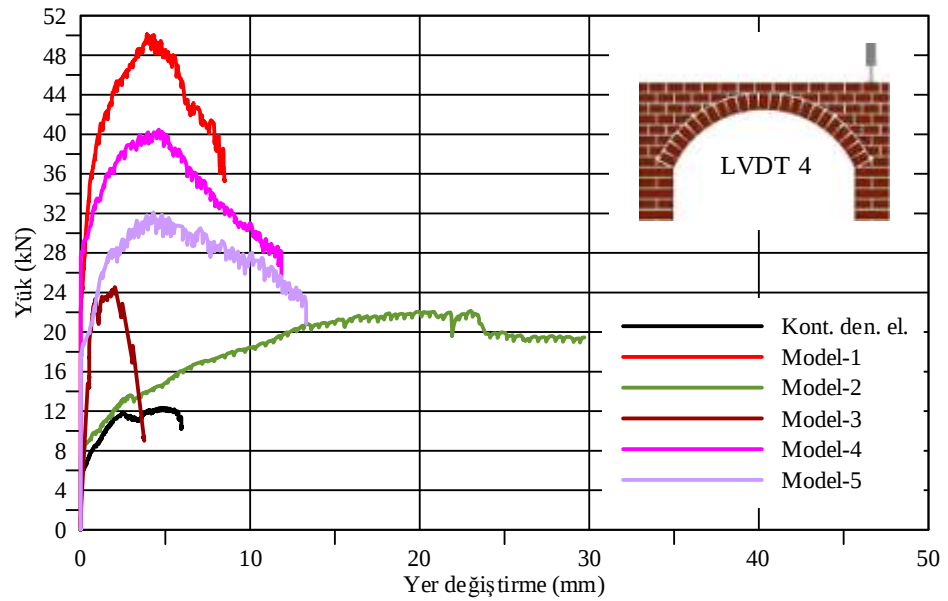
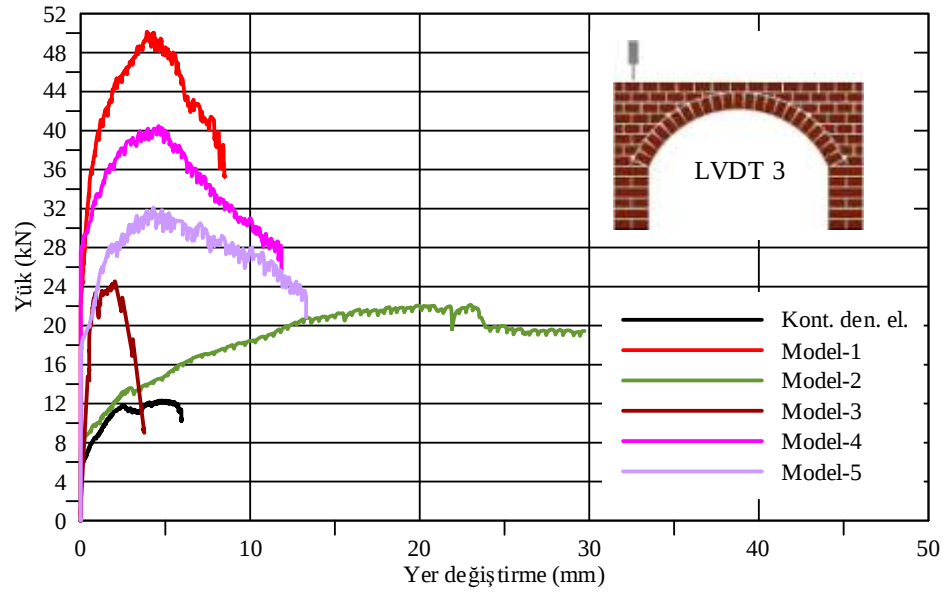
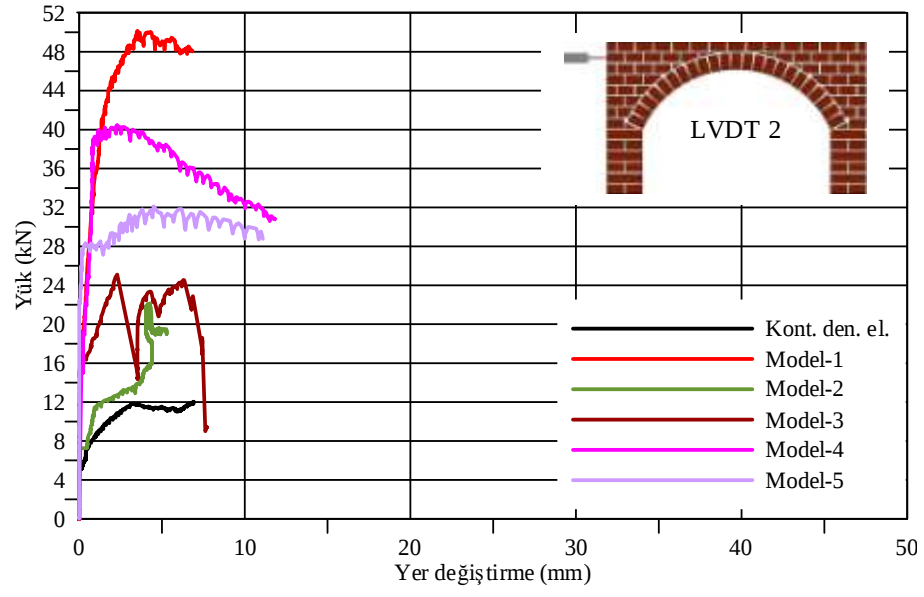
Model-5'e ait yukarıdaki yük-yer değiştirme grafiğinden de anlaşılabacağı gibi maksimum yer değiştirme 45 mm ile LVDT 4'den ölçülmüştür. En az yer değiştirme ise LVDT 1'den elde edilmiştir. Kemerin sağ kolonundaki, kemer ayağında açılma meydana gelmiştir. Açılma nedeniyle LVDT 4 ve LVDT 6'daki yer değiştirmede artma gözlenmiştir. Kilit taşının yanında bulunan harçta oluşan büyük çatlama dolay, LVDT 7'de düşey yer değiştirme artmıştır.

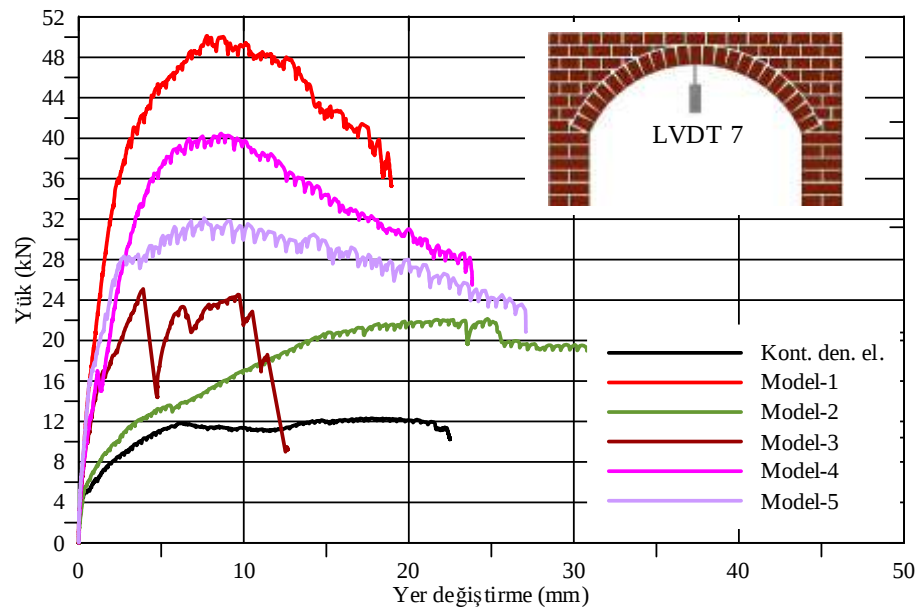
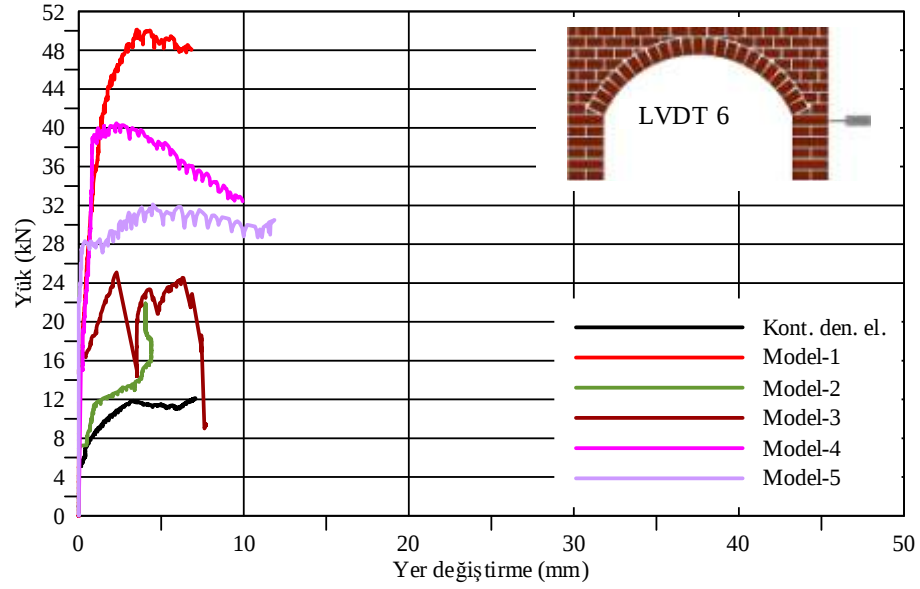
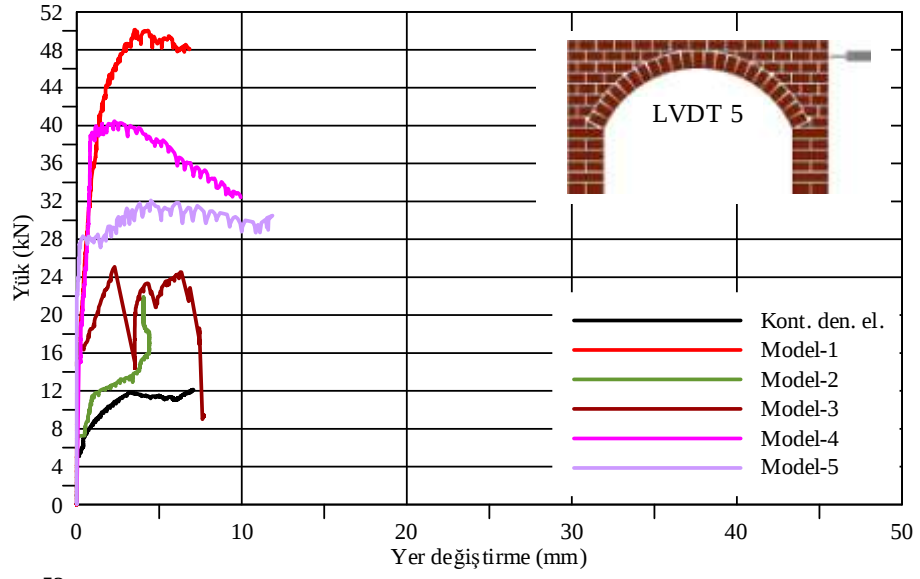
Son zamanlarda tarihi yapılardaki güçlendirme çalışmalarında, ciddi oranda FRP ve epoksi reçinesi tartışılmalı olsa kullanılmaktadır. Model-5 olarak isimlendirilen deney numunesinde de epoksi reçinesinin gergi çubukları ile ne oranda birlikte çalışabileceği, bu şekilde tasarlanmış bir güçlendirmenin ne oranda işlevsel olacağı araştırılmıştır. Her ne kadar epoksi ile kemer içerisine sabitlenen gergi çubuğunun kemer içerisinden sıyrılacağı endişesi oluşmuş olsa bile deney sonucunda gergi çubuğunun sıyrılmadığı görülmüş, epoksi ile iyi bir aderans sağlanmıştır. Yapılan bu deney ile böyle bir uygulamanın da iyi bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

3.8 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bütün kemer numunelerinde her bir LVDT aynı geometrik bölgeye bağlanmıştır. Örneğin LVDT 7 hep kilit taşının altına, LVDT 1 kemer kolonu ile üzengi taşının birleştiği yere bağlanmıştır. Her bir model için LVDT'lerden elde edilen ölçümler Şekil 3.36'da verilen yük-yer değiştirme grafiklerinde kıyaslanmıştır.







şekil 3.36: Yık-yer değiştirme grafikleri.

Şekil 3.36'dan da görüldüğü gibi LVDT 1'de yatay yer değiştirme en fazla 26,18 mm ile Model-2'de olurken, en az yatay yer değiştirme 6,4 mm ile Model-3'te gerçekleşmiştir. Deney sonrası fotoğraflar incelendiği zaman, Model-2'de diğer kemer numunelerine göre LVDT 1'in bulunduğu kemer kolonunda daha fazla çatlama ve açılma gözlenmiştir. Bu sebeple buradaki yer değiştirme diğer modellere oranla daha fazladır.

Model-4'de LVDT 2'nin bulunduğu kemer duvarı üzerindeki açılma, diğer modellere göre çok daha fazla olmuştur. Böylece LVDT 2'de en fazla yer değiştirme 12,8 mm ile Model-4'de okunurken, en az yer değiştirme ise 6,1 mm ile Model-2'de okunmuştur. Model 2'de LVDT 2'nin bulunduğu yerde herhangi bir çatlama gözlenmemiştir. Daha çok kilit taşının bulunduğu harçta ve kemer duvarlarının başlangıç yerinde açılmalar, çatlamlar olmuştur.

LVDT 3'te en fazla yer değiştirmeyi yapan 29,3 mm ile Model-2, en az yer değiştirmeyi yapan ise 3,1 mm ile Model-3 olmuştur. Model-2'de kemer üzengi taşının üzerinde meydana gelen açılma nedeniyle LVDT 3'te yer değiştirme artmıştır. Kemer kolonunda en fazla uzama Model-2'den ölçülürken en az uzama ise Model-3'ten ölçülmüştür.

LVDT 4 için ise en fazla yer değiştirme 44,8 mm ile Model-5'te gözlemlenirken, en az yer değiştirme 9,8 mm ile Model-3'te gözlemlenmiştir. Model-5'te meydana gelen kemer kolonunun ayağındaki açılma ve kemer duvarındaki çatlama nedeniyle LVDT 4'te ölçülen yer değiştirme miktarı bu modelde daha fazladır.

LVDT 5'te yatay yer değiştirme en fazla 11,4 mm ile Model-5'te olurken en az yatay yer değiştirme 4,7 mm ile Model-2'de gerçekleşmiştir. Model-5'te kemerin sağ tarafındaki kolon ayağında meydana gelen açılma nedeniyle LVDT 5'te yer değiştirme artmıştır. Model-2'de ise LVDT 5'in bulunduğu kemer duvarında herhangi bir çatlama gözlenmemiştir.

LVDT 6 için en fazla yatay yer değiştirme 29,8 mm ile Model-4'te en az yatay yer değiştirme ise 11,2 mm ile Model-3'te görülmüştür. Model-4'te LVDT 6'nın bulunduğu yerde büyük bir açılma meydana gelmiştir. Gerek bu açılmadan dolayı, gerekse kemerin sağ kolonundaki ayakta meydana gelen açılmadan dolayı LVDT 6'da yer değiştirme diğer modellere göre daha fazla olmuştur.

LVDT 7 için en fazla düşey yer değiştirme 32.14 mm ile Model-2'de, en az düşey yer değiştirme ise 12.66 mm ile Model-3'de görülmüştür. Model-2'de kemerin

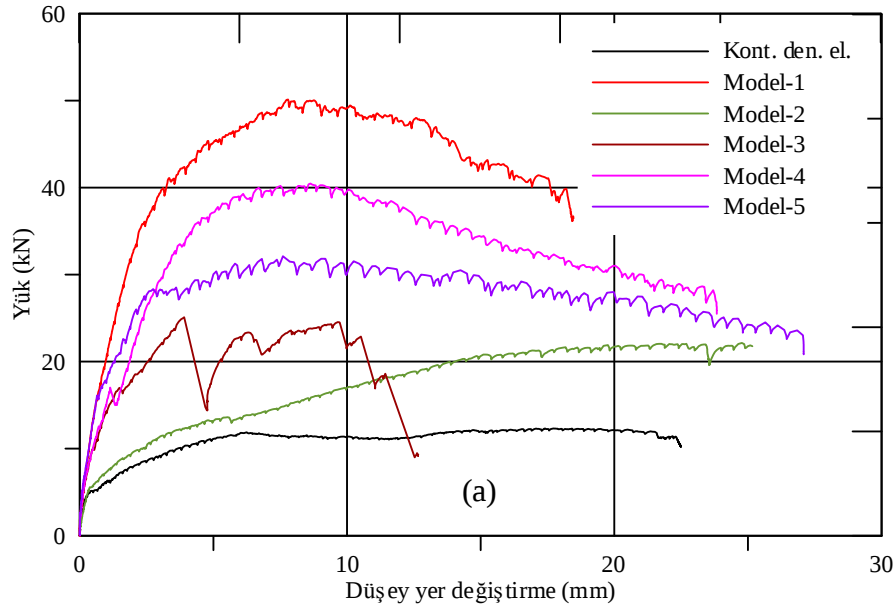
ortasında bulunan harçta diğer modellere oranla daha fazla açılma olmuştur. Bu sebeple burada ölçülen yer değiştirme daha fazla olmuştur.

Kemer modellerinin ortasından düşey yönde yük uygulanmıştır. Düşey yer değiştirme değerleri kemerin orta noktasında bulunan 7 numaralı LVDT yardımıyla bulunurken, yatay yer değiştirme değerleri ise kolonların kemer ile birleştiği düzlemdeki iki adet yatay LVDT'lerden (LVDT 1 ve LVDT 6) elde edilen değerlerin toplamı hesaplanarak bulunmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4'te ve yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 3.37'de verilmektedir.

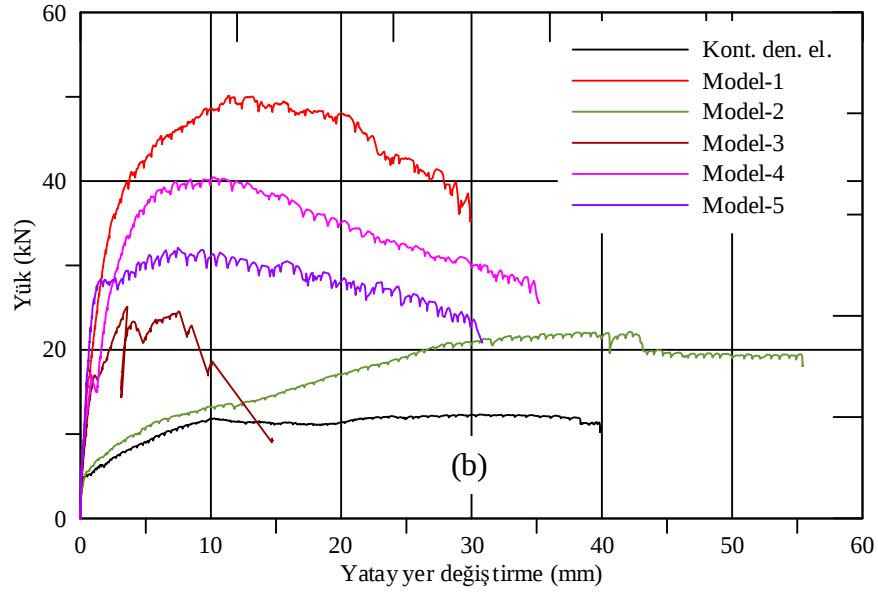
Çizelge 3.4: Deney sonuçları.

Numune No	P_f (kN)	Artış ^a (%)	Mak.yüke karşılık gelen düşey yer değiştirme (mm)	Mak.yüke karşılık gelen yatay yer değiştirme (mm)
Kontrol deney elemanı	12,32	0	17,41	30,05
Model-1	50,12	406,8	7,78	11,41
Model-2	22,14	179,7	24,77	42,02
Model-3	25,09	203,6	3,90	3,59
Model-4	40,47	328,5	8,63	10,22
Model-5	32,11	260,6	7,59	7,46

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



Şekil 3.37: Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri.



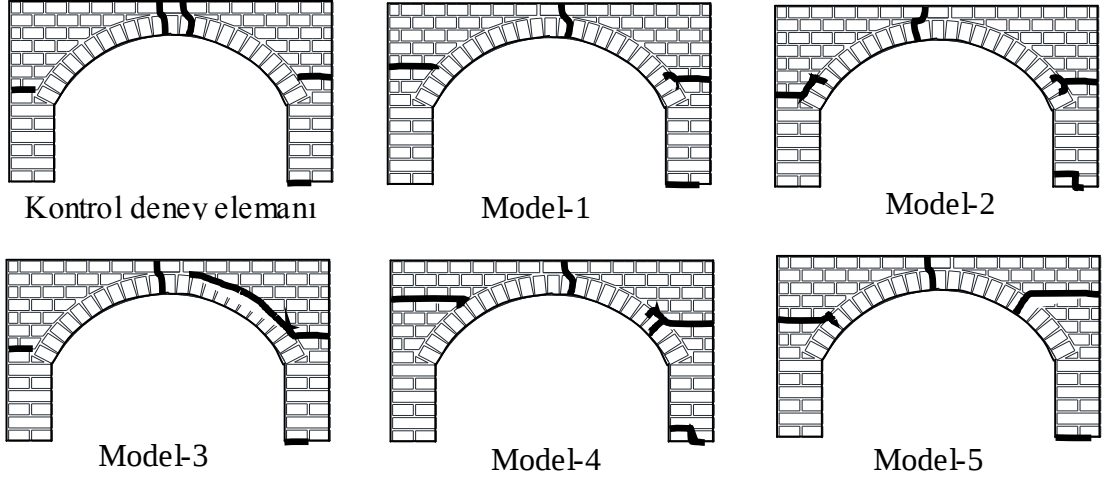
Şekil 3.37 (devam): Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri.

Gerek Çizelge 3.5'ten gerekse Şekil 3.37'den görüleceği üzere Model-1 50,12 kN'luk düşey bir kuvvet ile en fazla yükü taşıyan deney numunesi olmuştur. Maksimum yüke ulaştığında Model-1'de meydana gelen düşey yer değiştirme miktarı 7,78 mm civarındadır.

Deney numuneleri arasında en fazla yükü taşıyan ikinci numune ise Model-4 olmuştur. Model-4'ün maksimum yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak 40,47 kN civarında iken yapmış olduğu düşey yer değiştirme miktarı 8,63 mm civarındadır. Epoksi uygulaması yapılan Model-5'in maksimum yük taşıma kapasitesi 32,11 kN civarında iken yapmış olduğu düşey yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak 7,59 mm olarak meydana gelmiştir. Davranış açısından benzerlik gösteren bir diğer deney numunesi Model-3'tür. Model-3'ün maksimum yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak 25,09 kN'dur. Bu değere karşılık gelen düşey yer değiştirme miktarı ise 3,90 mm'dir. Şekil 3.37a ve Şekil 3.37b'de Model-3 grafiğindeki ani düşüş sebebi kemer modelinde meydana gelen ani kırılmalardır.

Bazı restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında karşılaşılan hatayı temsil etmek üzere oluşturulan Model-2'nin maksimum yük taşıma kapasitesi 22,14 kN olarak elde edilmiştir. Bu yük düzeyinde elde edilen düşey yer değiştirme miktarı ise yaklaşık olarak 24,77 mm'dir. Kontrol elemanı olarak üretilen deney numunesinde herhangi bir gergi çubuğu olmadığından maksimum yük taşıma kapasitesi 12,32 kN civarında kalmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.38'de deneye tabi tutulan tüm modellerde meydana gelen çatlaklar, koyu çizgiler ile temsili kemer modelleri üzerinde

gösterilmiştir. Uygulanan yük kemerin orta noktası hizasında olduğundan dolayı kemerin orta noktasında yer alan kemer tuğlalarının bir veya iki taraftaki düşey derzlerde çatlaklar meydana getirmiştir. Bunun yanında kemerlerin üzengi taşına yakın kısımlarında da yatay çatlaklar meydana gelmiştir

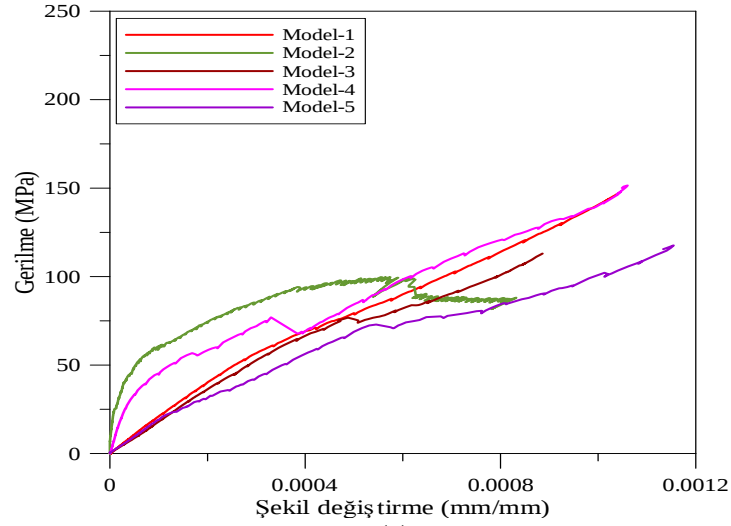


Şekil 3.38: Kemer numunelerinde meydana gelen çatlaklar.

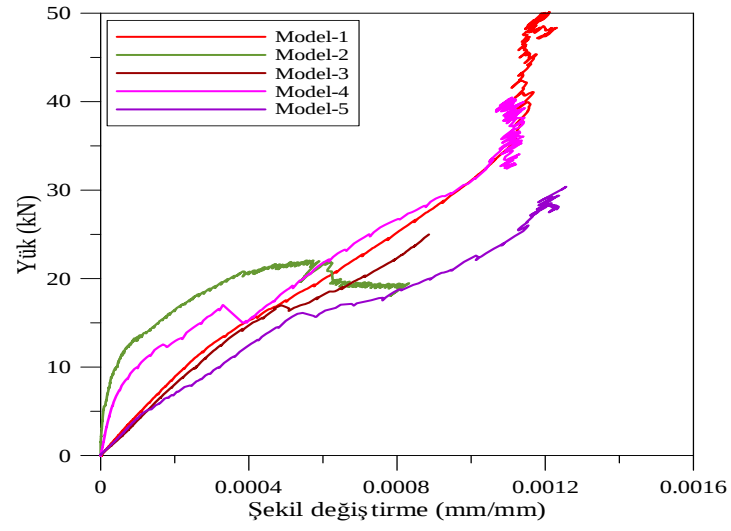
3.9 Gergi Çubuğu Davranışının İncelenmesi

Bu bölümde deneyler sonucunda gergi çubuklarında gözlemlenen deformasyonlar irdelenmektedir. Deneyler sonucunda genel itibariyle Model-1, Model-3, Model-4 ve Model-5'te gergi çubuklarında gözle görülür şekilde uzama meydana gelmiştir. Model-2'de kolonu saran kare gergi bilezikte açılma meydana gelmiştir. Bu sebepten dolayı gergi çubuklarındaki uzama miktarı sınırlı seviyede kalmıştır.

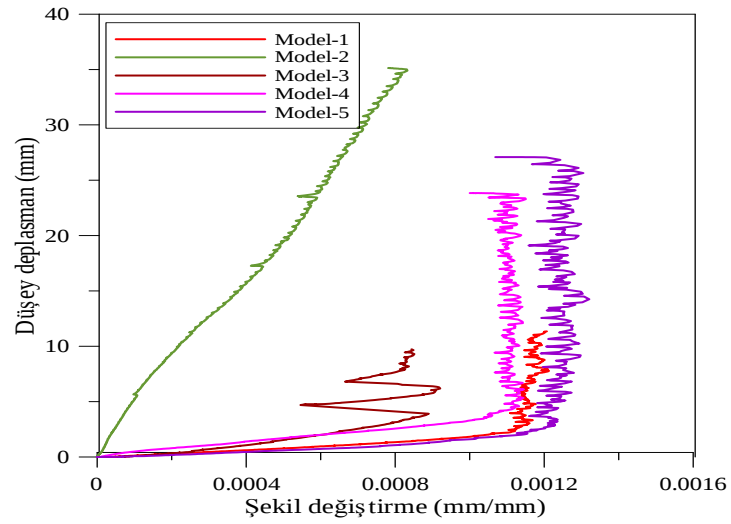
Şekil 3.39'daki grafiklerde gergi çubuğundaki şekil değiştirmeler, gerilme, kemere uygulanan düşey yük ve kemerin orta noktasındaki düşey yer değiştirme ile karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.39: Gergi çubuklarındaki şekil değiştirmelerin; gerilme, kemer üzerinden uygulanan düşey yük ve düşey yer değiştirme ile grafiği.

Gergi çubuğu için daha önce yapılan çekme deneyinde, gergi çubuğunun akma dayanımı 275 MPa ve akma birim uzaması 0,00135 mm/mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.39 incelendiği zaman kemer modellerinde gergi çubuklarının akmadığı gözlenmiştir.

Model-1'i Şekil 3.39b'de incelemek gerekirse deneyin ilk aşamasından itibaren gergi çubuğunun yükü karşılamaya başladığı görülmektedir. Davranış açısından Model-4 ile benzerlikler gösteren Model-5'teki gergi çubuğu da deneyin ilk aşamasında yük taşımaya başlamıştır. Model-4'te Şekil 3.39a, 3.39b ve 3.39c irdelenecek olursa gergi çubuğunun montajındaki küçük boşluklardan dolayı gergi çubuğunun yükü sonradan taşımaya başladığı görülmektedir. Bu duruma rağmen bu modelde de gergi çubuğu yük taşımıştır.

Düşey yük-şekil değiştirme grafiğine göre Model-2 ve Model-4'te yük uygulanmaya başlandığında gergi çubuğunda şekil değiştirme miktarı ilk başlarda minimum seviyelerde seyrederken diğer modellerde bu durumun aksine yük uygulanmaya başlandığında gergi çubuğunda şekil değiştirmeler artmaya başlamaktadır. Model-2 de gergi çubuğunda meydana gelen şekil değiştirme eğrilerine bakıldığında (Şekil 3.39) diğer modellere göre, şekil değiştirme miktarlarının deneyin ilk aşamalarında çok düşük miktarlarda kaldığı görülmektedir. Yaklaşık olarak yükün 3 kN seviyelerine kadar Model-2'deki gergi çubuğunda dikkate değer bir şekil değiştirme meydana gelmemiştir. Diğer bir deyişle Model-2'deki gergi çubuğu uygulanan yüke yaklaşık 3 kN seviyesinde tepki vermeye başlamıştır. Aynı durum kemerin orta noktasının düşey yer değiştirme ile gergi çubuklarının şekil değiştirme grafiğinde daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Söz konusu grafikte (Şekil 3.39c) gergi çubuğundaki şekil değiştirme miktarları kemerin düşey hareketi ile birden artmıştır. Bu durum Model-2'deki gergi çubuğunda çok yavaş bir şekilde gerçekleşmiştir.

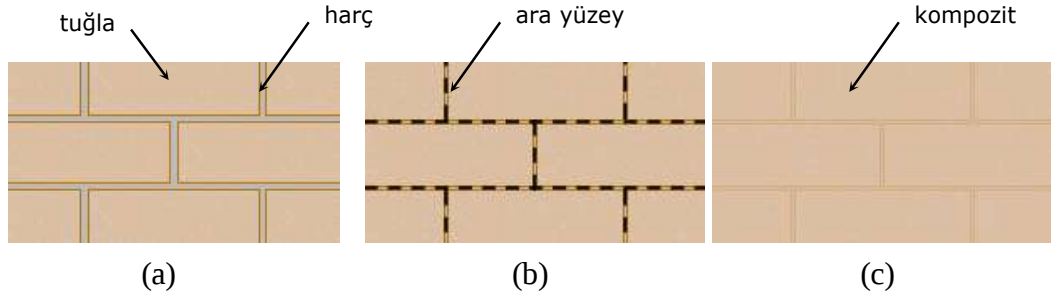
4. KEMER NUMUNELERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Deneyisel çalışmalardan elde edilen grafiklere bakıldığında kemer modellerinin doğrusal olmayan bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu sebepten dolayı nümerik analizlerde malzemenin doğrusal olmayan özellikleri dikkate alınmıştır. Modeller, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak LUSAS, (2012) yapısal analiz programında oluşturulmuştur. Yığma duvarlar modellenirken üç farklı strateji takip edilebilir. Bunlar; a) Detaylı Mikro Modelleme, b) Basitleştirilmiş Mikro Modelleme, c) Makro Modelleme stratejileridir.

Detaylı mikro modellemede yığma duvarı meydana getiren yapı taşlarının (Tuğla birim ve harcın) ayrı ayrı her birinin mekanik özellikleri yani elastisite modülleri, Poisson oranları ve elastik olmayan özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır.

Basitleştirilmiş mikro modellemede, bir harç ve iki yığma birim-harç ara yüzeyinden oluşmakta olan her bağlantı noktasında kütle yoğunlaştırması yapılmış ve ortalama ara yüzey olarak kabul edilerek yığmada meydana gelebilecek çatlakların ortalama ara yüzey çizgisinde oluşacağı kabul edilmiştir. Lourenço, (1996)'ya göre harcın Poisson oranı dikkate alınmadığından, bulgular detaylı mikro modellemeye göre biraz farklıdır. Fakat bu fark ihmal edilebilecek kadar azdır.

Makro modellemede ise yığma birim ve harcın özellikleri homojenleştirme işlemine tabi tutularak yığma duvar kompozit malzeme olarak düşünülmüştür. Bu modelin mekaniksel özellikleri de homojenleştirme işlemi sonucunda elde edilen değerlerdir. Bu çalışmada modellemeler makro modelleme stratejisine göre yapılmıştır. Yani her tuğla ve harç ayrı ayrı modellemek yerine duvar tek bir eleman olarak modellenmiştir. Homojenleştirme teknikleri bu çalışmanın kapsamında yer almamaktadır. Çünkü, yapılan ön deneylerde küçük duvar numuneleri üzerinde malzeme özellikleri belirlenmiştir. Yığma duvarlarda uygulanan farklı modelleme stratejilerine ait temsili çizim Şekil 4.1'de verilmektedir.

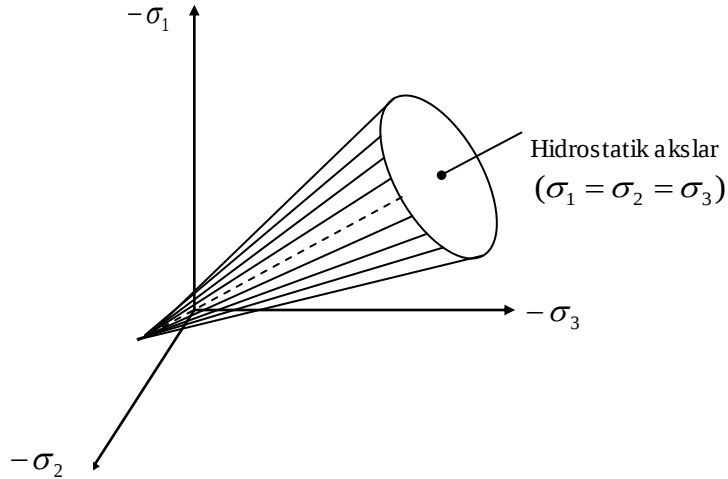


Şekil 4.1: Yığma duvarlardaki modelleme teknikleri a)Detaylı mikro modelleme, b)Basitleştirilmiş mikro modelleme, c)Makro modelleme.

Bu çalışmada kemer modellerinin doğrusal olmayan davranışını temsilen Drucker-Prager kriteri kullanılmıştır. Genellikle makro modellemelerde kullanılan bu kriter, enerji hipotezlerinden Von-Mises kriterinin basitleştirilmiş halidir. Drucker-Prager kriterinde Von-Mises kriterindeki hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim ile dikkate alarak Denklem (4.1) ile ifade edilmektedir (Ural, 2009).

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4.1)$$

Burada α ve k pozitif malzeme sabitleridir. I_1 ; gerilme tansörünün birinci invariantını, J_2 ; deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantını göstermektedir. $\alpha = 0$ olduğunda kriter Von-Mises kriteri ile aynı olmaktadır. Şekil 4.2’de üç boyutlu gerilme hali için Drucker-Prager kırılma yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Drucker-Prager kriteri (Chen ve Mizuno, 1990).

Drucker-Prager kriteri, Mohr-Coulomb kriterine oldukça yakındır. Örneğin, Drucker-Prager dairesi, Mohr-Coulomb altıgenine dıştan çizilen bir sınır daire olarak düşünülürse, iki yüzey α , k ve $\theta = 60^\circ$ ile belirlenecek basınç meridyenine uygun

düşmektedir. α ve k , Θ ve c değerlerine bağlı olarak Denklem (4.2) ile belirlenmektedir (Chen ve Mizuno, 1990). Θ ve c sırası ile malzemenin içsel sürtünme açısını ve kohezyonu ifade eden parametrelerdir.

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

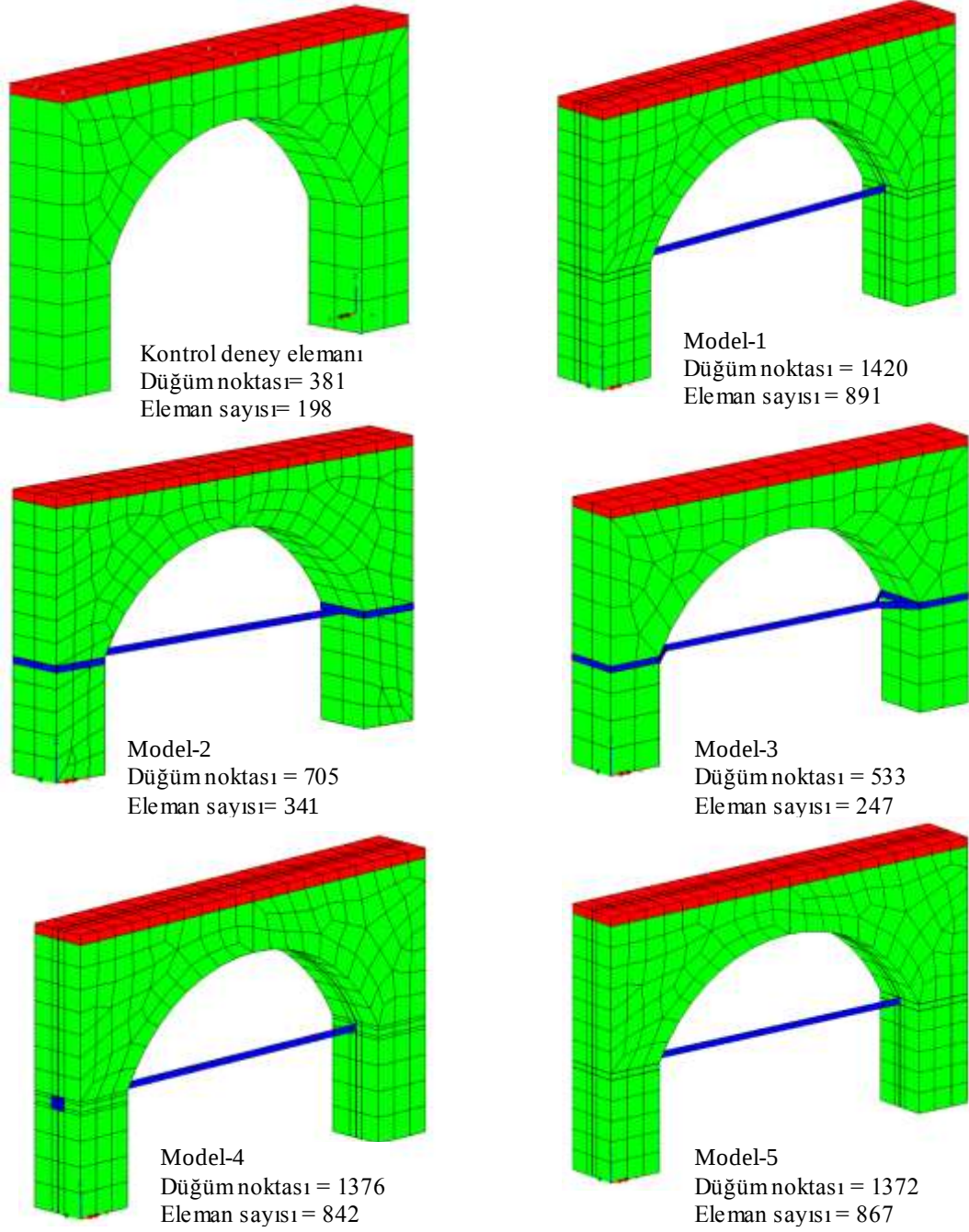
$$k = \frac{6c \cos \Theta}{\sqrt{3}(3 - \sin \Theta)}$$
(4.2)

Denklem (4.3)'teki sabitlerle belirlenen koni, Mohr-Coulomb kırılma yüzeyindeki altıgen piramidi çevreleyen bir dış sınır görünümündedir. Ayrıca çekme meridyeninden geçen $\Theta = 0^\circ$ ile belirlenecek iç koniyi belirleyecek olan sabitler Denklem (4.3)'deki gibi hesaplanmaktadır.

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

$$k = \frac{6c \cos \Theta}{\sqrt{3}(3 + \sin \Theta)}$$
(4.3)

Bu çalışmada, Θ ve c parametreleri için $c=2,80-3,70$ MPa ve $\Theta=25^\circ-35^\circ$ değerleri kullanılmıştır (Doran, 2003). Sonlu elemanlar modellerinde gerek duvar ve gerekse gergi elemanı için üç boyutlu katı (solid) elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların 8 düğüm noktası ve her düğüm noktasının da 3'er adet yer değiştirme serbestlikleri vardır. Şekil 4.3'te deney elemanları için oluşturulmuş sonlu elemanlar modelleri ile kullanılan düğüm noktası ve sonlu eleman adetleri topluca verilmektedir.



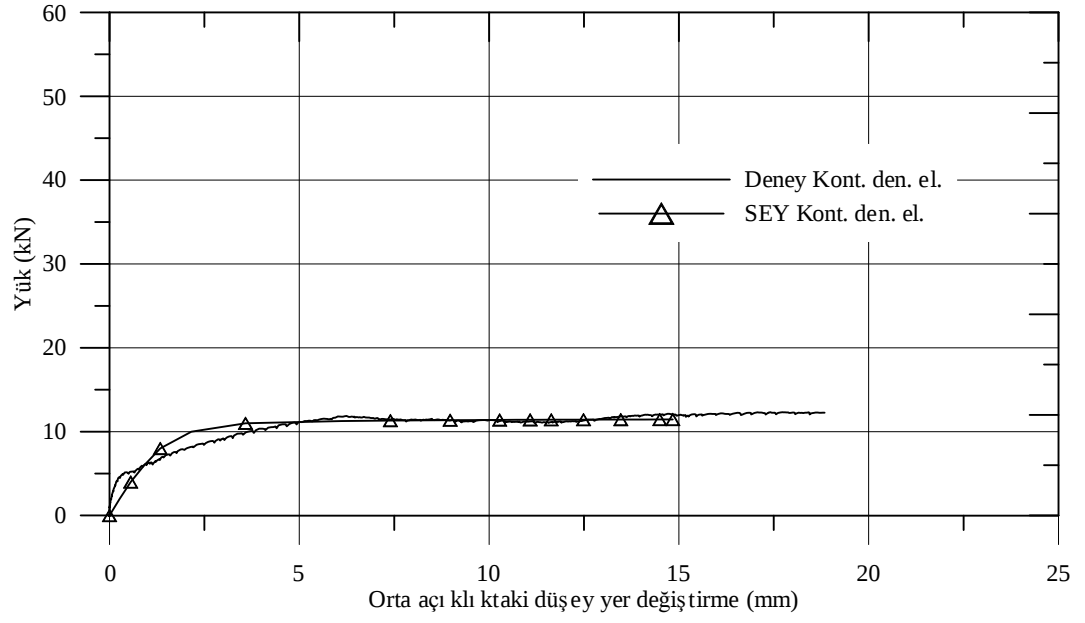
Şekil 4.3: Sonlu elemanlar modelleri ile kullanılan düğüm noktası ve sonlu eleman adetleri.

Yükleme, kemer açıklığının orta noktasından aşağıya doğru yük olarak uygulanmıştır. Mesnetler kemer kolonların alt kısımlarından ankastre olarak tanımlanmıştır. Çizelge 4.1’de sonlu elemanlar modellerinde kullanılan malzemelerin doğrusal ve doğrusal olmayan özellikleri verilmiştir.

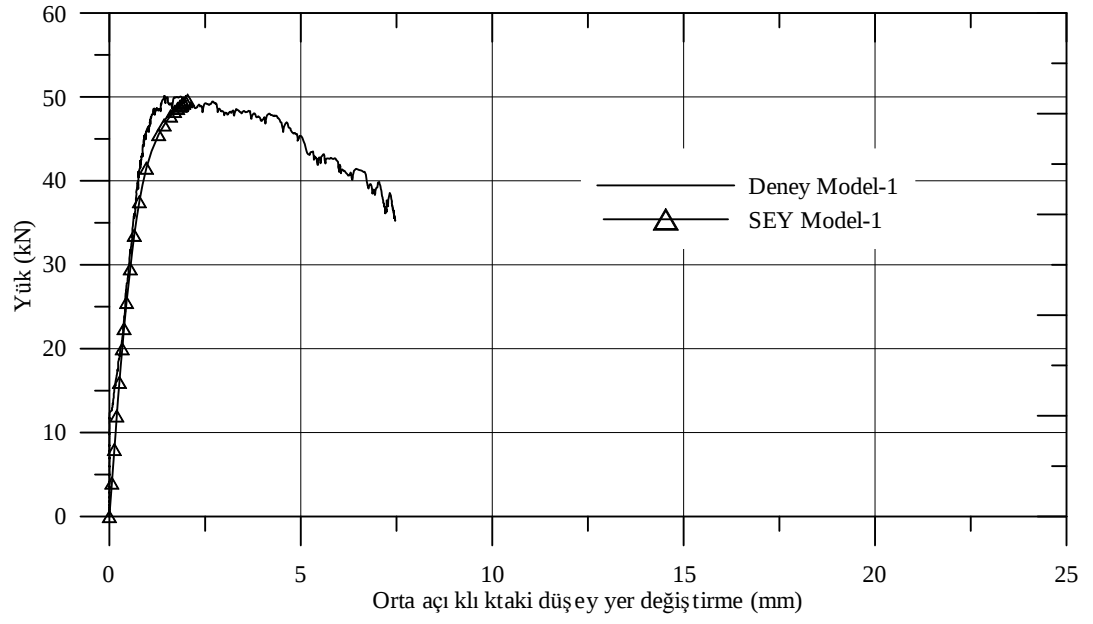
Çizelge 4.1: Modellerin malzeme özellikleri.

Malzemeler	Özellikler	Değerler
Üst beton parçası	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
	Plastik şekil değiştirme	0,001
Kargir birimler	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
	Plastik şekil değiştirme	0,001
Çelik gergi çubuğu	Elastisite modülü (MPa)	203704
	Poisson oranı	0,3
	Tek eksenli akma gerilmesi (MPa)	275
	Çekmede pekleşme eğimi	212,1
	Plastik şekil değiştirme	1,0
Epoksi reçine yapıştırıcı	Elastisite modülü (MPa)	12500
	Poisson oranı	0,34
	Nihai çekme dayanımı (MPa)	19,5
	Nihai çekme şekil değiştirmesi	0,0015

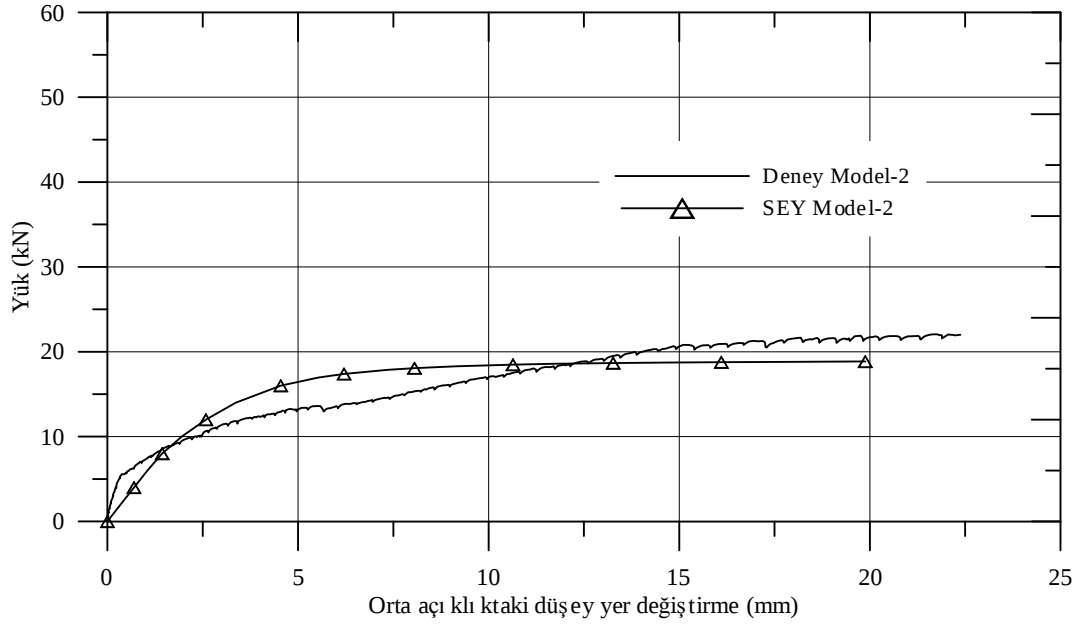
Sonlu elemanlar modelleriyle yapılan analizler neticesinde elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 4.4'te, deney ve analiz sonuçları ise Şekil 4.5'te verilmektedir. Drucker-Prager kriteri elastik-tam plastik bir davranışı temsil ettiğinden dolayı numune plastik aşamaya geçtiğinde yatay bir seyir izlemektedir. Gerek deneysel numunelerin gerekse eşdeğer bilgisayar modellerinin davranışları birbirine oldukça yakın çıkmıştır.



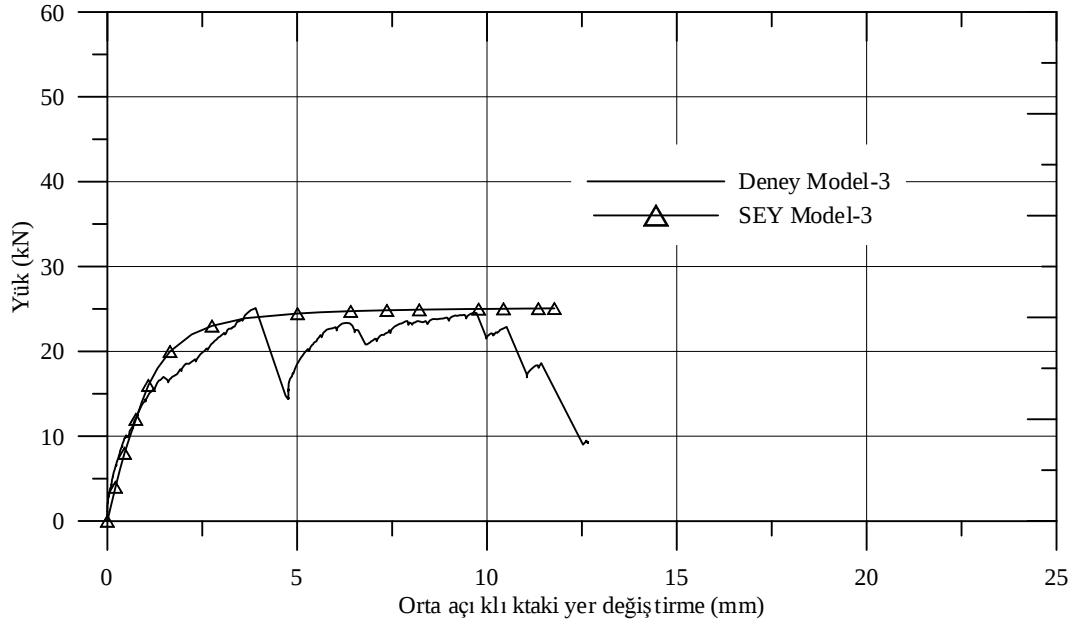
(a)



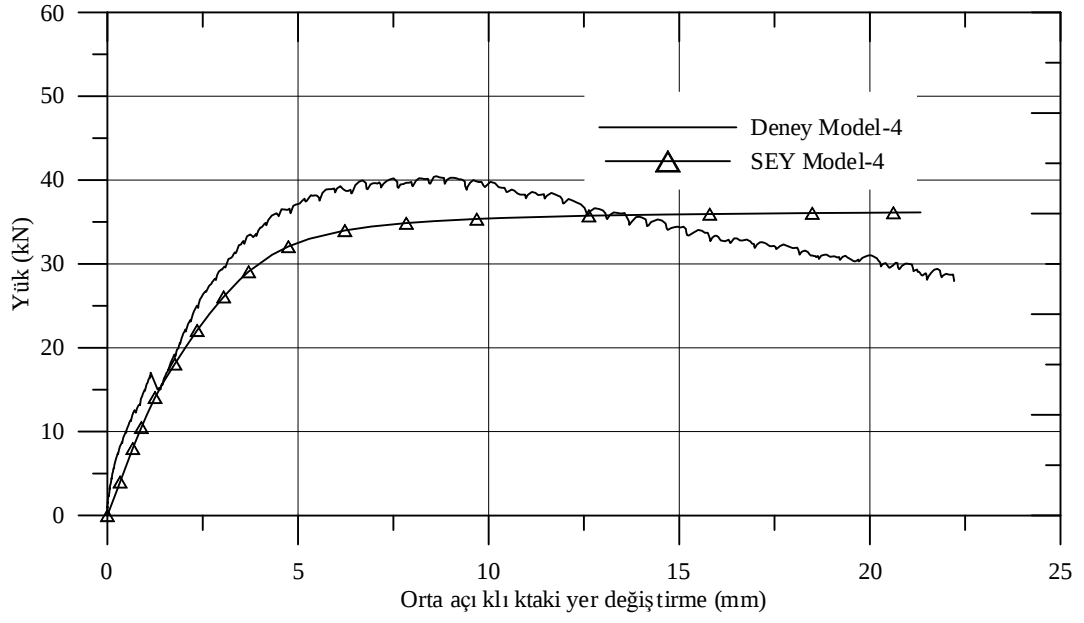
(b)



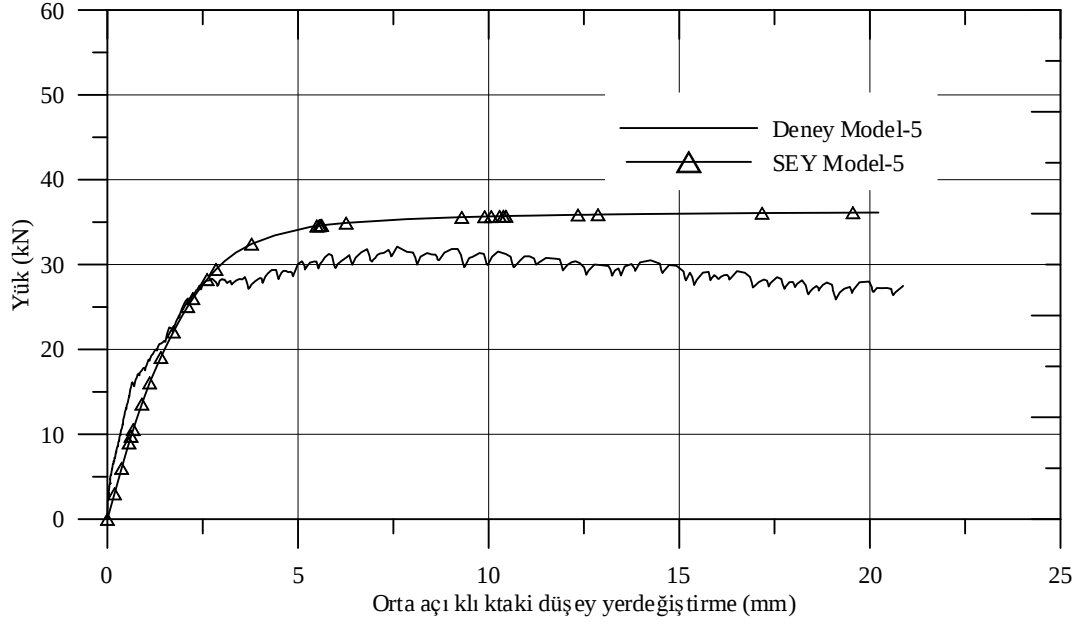
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.4: Sonlu elemanlar modelleriyle yapılan analizler neticesinde elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.



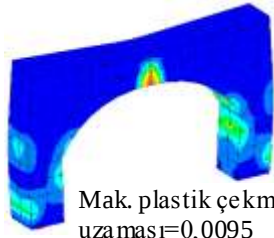
(a) Kontrol deney elemanı



(b) Model-1



(c) Model-2



Mak. plastik çekme
uzaması=0,0095
Yük Faktörü= 12,5

(d) Kontrol deney elemanın
sayısal analizi



Mak. plastik çekme
uzaması=0,0809545
Yük Faktörü= 50,30

(e) Model-1 numunenin sayısal
analizi



Mak. Plastik çekme
uzaması=0,369868
Yük Faktörü= 19,00

(f) Model-2 numunenin sayısal
analizi



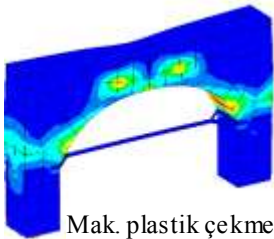
(g) Model-3



(h) Model-4

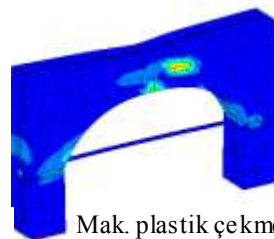


(i) Model-5



Mak. plastik çekme
uzaması=0,064674
Yük faktörü= 25,06

(j) Model-3 numunenin sayısal
analizi



Mak. plastik çekme
uzaması=0,167694
Yük faktörü= 41,43

(k) Model-4 numunenin sayısal
analizi



Mak. Plastik çekme
uzaması=0,14136
Yük faktörü= 30,70

(l) Model-5 numunenin sayısal
analizi

Şekil 4.5: Deney ve analiz sonuçları.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı tipteki gergilerin kemerler üzerindeki davranışa etkisi, tarihi yapıların restorasyon ve güçlendirilmesi çalışmalarında kullanılabilecek değişik tipte imal edilmiş gergi çubuklarının davranışı incelenmiştir. Bu amaçla biri gergisiz kontrol deney elemanı olmak üzere 5 tanesi farklı tasarımlardaki gergiye sahip toplamda 6 adet kemer numunesi örülmüştür. Model-1’de gergi çubuğu, kemer kolonu içerisinden geçirilmiş düşey yönde demir donatı ile sabitlenmiştir. Model-2’de gergi çubuğu, kemer kolonu etrafında sarılmış gergi çubuğu ile aynı özelliğe sahip 10 mm genişliğindeki kare kesitli bileziğe tek ve orta noktasından sabitlenmiştir. Model-3’te gergi çubuğu, kemer kolonu etrafına sarılmış 2x10 mm² kesite sahip kare bileziğe iki ucundan sabitlenmiştir. O bölgede oluşan şekil eşkenar üçgen olup her bir iç açısı 60°’dir. Model-4’te gergi çubuğu, kemer kolonlarından açılan deliklerden geçirilerek, dışarı çıkarılıp kare kesitli rijit levhaya kemer kolonu dışından sabitlenmiştir. Son olarak Model-5’te ise gergi çubuğu, kemer kolonları içerisinden geçirilip, oluşan deliğin içerisi Concresive 1406 adlı epoksi reçinesi ile doldurulmuştur. Oluşturulan kemer modellerinin kilit taşı hizasından düşey yük uygulamak suretiyle davranışları incelenmiştir. Aşağıda bu çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

Düşey yüke maruz kalan kemerli yapılarda gergi çubuğunun fonksiyonu önemlidir. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilere göre gergili kemerin yük taşıma kapasitesi, gergisiz kemere göre en az %180 artmıştır. Gergilerin asıl amacı narin kolonların üzerinde yer alan kemer yapılarının düşey yük altında meydana gelen çekme gerilmelerini karşılayabilmesine yardımcı olmaktır.

Gergi çubuğu kullanılmış olan mevcut tarihi yapılar incelendiğinde Model-1’dekine benzer uygulamaların yapıldığı görülmüştür. Deneysel sonuçlara bakıldığında Model-1 gerçekten en fazla düşey yük taşıyan model olmuştur. Yalnız günümüzde restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında bu tür bir uygulama yapılması oldukça güçtür. Zira mevcut olan kemer-kolon birleşim bölgesine zarar verilmeden bir uygulamanın yapılması gerekmektedir.

Deneysel çalışmalarda Model-2’de kolona kare bilezik şeklinde sarılmış ve bu bileziğe içteki kenarın orta noktasından bağlanmış olan gergi çubuğu çekme kuvvetlerini geç karşılamıştır. Bunun temel sebebi kolonun kare şeklinde olmasından dolayı kare bileziğin gergi çubuğu ile birleştiği bölgeden deformasyon yapmasıdır. Söz konusu deneyin ilerleyen aşamalarında bileziğin açılmasını takiben gergi çubuğunda çekme gerilmeleri artmaya başlamıştır. Bu durum istenmeyen bir durumdur. Gerginin amacı kemerde deformasyonların başladığı anda kemerin bünyesinde çekme gerilmelerinin artmasını engellemektir. Diğer bir deyişle kemerde olacak olan çekme gerilmelerinin, sünek bir malzeme olan gergi çubuğu tarafından karşılanmasını sağlamaktır.

Model-3’te kare kesitli kemer kolonuna yine kare kesitli bilezik uygulanmış ve Model-2’de gözlemlenen yanlış uygulama sonucunda kare bileziğin açılmasını engellemek amacıyla gergi çubuğu bileziğin iki köşesine eşkenar üçgen oluşturacak şekilde kaynak yardımıyla bağlanmıştır. Eşkenar üçgen birleşim bölgelerinde meydana gelen kayma gerilmeleri, bu bölgelerin birbirinden ayrılmasına yol açabileceğinden dolayı birleşim bölgelerindeki detaylandırılmanın çok iyi yapılması gerekmektedir.

Buradaki asıl amaç yapılacak olan restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında Model-1’e en yakın dayanıma sahip ve mevcut yapıya zarar vermeden yapılacak olan çalışmalardır. Elde edilen sonuçlara göre bu durum için en uygun çözümlerden birisi hiç şüphesiz ki Model-4’tür. Model-4 daha çok köşe ve kenar kemer ayakları için daha kolay kullanılacak bir modelleme olarak görünmesine rağmen, orta veya iç kemer kolonları içinde bu uygulama çok zor değildir. Kemerli yapılarda özellikle orta kolonlarda, kolon kemer birleşim bölgelerine açılacak delik çapı arttırılarak, bu delikten iki adet gergi çubuğu geçirilerek dışarıdan rijit bir levha ile gergi çubuğunun sabitlenmesi ile kemer-kolon birleşim bölgesine zarar verilmeden bu model kolaylıkla uygulanmış olur (Şekil 3.32).

Model-3, Model-4 ve Model-5 genel itibariyle birbirine benzer davranışlar sergilemektedir. Model-5’te kolonun içerisine yerleştirilen gergi çubuğu kolon ile bağlantısını epoksi reçinesi yardımıyla sağlamaktadır. Tarihi yapılarda epoksi reçinesinin kullanımı tartışılırsa birçok güçlendirme çalışmalarında uygulanmaktadır. Her ne kadar epoksi ile kemer içerisine sabitlenen gergi çubuğunun kemer içerisinden sıyrılacağı endişesi oluşmuş olsa da deney sonucunda gergi çubuğunun sıyrılmadığı görülmüş ve epoksi ile iyi bir aderans sağlanmıştır.

Tarihi yapılarda özellikle restorasyon ve güçlendirme uygulamalarında, yapılan bu tez çalışması iyi bir referans olacak ve bu konu üzerine yapılacak diğer bilimsel çalışmalara önemli bir katkı sağlayacaktır. Gergi çubuklarının, sivri, basık vb. kemer türleri üzerindeki etkilerinin yanında, kemere etkileyen hareketli yükler, yayılı yükler ve deprem, rüzgar gibi yatay yüklere karşı olan davranışı da araştırılması gereken bilimsel çalışma alanları olarak önerilecektir.

KAYNAKLAR

- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007. Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman model iyileştirilmesinin etkisi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 29-39.
- Baran, T., 2008. Yapıların dinamik davranışının deneysel ve teorik olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Birinci, F., 2010. Taş kemer köprülerin sonlu eleman modellerinin operasyonel modal analiz yöntemiyle iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- 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.
- Chen, W.F. ve Mizuno, E., 1990. Nonlinear analysis in soil mechanics, Elsevier Science Publishing Company, New York, NY, USA.
- Çelik, O.C., Sesigür, H. ve Çılı, F., 2010. Importance of wood and iron tension members on seismic performance of historic masonry buildings: three case studies from Turkey, In Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, 1374-1383.
- Çöğür, M.T., 2007. Yığma yapıların yatay derz güçlendirme yöntemiyle güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Dagher, H.J., Bannon, D.J., Davids, W.G., Lopez-Anido, R.A., Nagy, E. ve Goslin, K., 2012. Bending behavior of concrete-filled tubular FRP arches for bridge structures, Construction and Buildings Materials, 37, 432-439.
- Doran, B., 2003. Elastic-plastic analysis of R/C coupled shear walls: Theequivalent stiffness satio of the tie elements, Journal of the Indian Institute of Science, 83,87-94.
- Elmalich, D. ve Rabinovitch, O., 2009. Masonry and monolithic circular arches strengthened with composite materials – A finite element model, Computers and Structures, 87, 521-533.
- Garmendia, L., San-Jose, J.T., Garcia, D. ve Larrinaga, P., 2011. Rehabilitation of Masonry arches with compatible advanced composite material, Construction and Building Materials, 25, 4374-4385.

- Hradil, P., Žák, J., Novák, D. ve Lavický, M., 2001. Stochastic analysis of historical masonry structures, Historical Construction Possibilities of Numerical and Experimental Techniques Proceedings of the 3rd International Seminar, Guimarães, Portugal, 647-654.
- Kanıt, R. ve Işık, N.S., 2007. Tuğla kemerlerin deneysel davranışı ve bilgisayar modeli analizleri, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara, 22, 1, 13-20.
- Lagomarsino, S. ve Calderini, C., 2005. The dynamical identification of the tensile force in ancient tie-rods, Engineering Structures, 27, 846-856.
- Lagomarsino, S. ve Calderini, C., 2014. Seismic behaviour of masonry arches with tie-rods: dynamic tests on a scale model, American Society of Civil Engineers, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001079.
- Lourenço, P.B., 1996. Computational strategies for masonry structures, Doktora Tezi, Delft, Netherland.
- 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.
- Ocak, S.G., 2009. Batı Anadolu Roma Dönemi örnekleriyle su kemerleri künkleri ve sarnıçları üzerine bir araştırma ve uygulama çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, İzmir.
- Orhan, S.N., 2010. Tek açıklıklı dairesel kagir kemer köprülerin göçme yüklerinin limit analiz yöntemleri ile hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Oymael, Doç. Dr. S., 2003. Yapı bilgisi temel ders kitabı, Cilt I, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.
- Tao, Y., Stratford, T.J. ve Chen, J.F., 2011. Behaviour of a masonry arch bridge repaired using fibre-reinforced polymer composites, Engineering Structures, 33, 1594-1606.
- TDY, 2007. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Toker, S. ve Ünay, A.İ., 2004. Kemerli taş köprülerin matematiksel modellenmesi 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. Kagit birimler-deney metodları-bölüm 6: Beton kagit 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 ISO 6892-1, 2011. Metalik malzemeler-çekme deneyi-bölüm 1: Oda sıcaklığında deney metodu, 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. Kagit yapıların tasarımı-bölüm 1-1: Donatılı ve donatısız kagit yapılar için genel kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ural, A., 2009. Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- URL-1 <http://www.totalwarturkiye.com/twforum/index.php?topic=28391.0> , alındığı tarih: 13.11.2014.
- URL-2 <http://imeryapi.com.tr/wp-content/uploads/CONCRESlVE1406.pdf> , alındığı tarih: 6.11.2014.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Şükran TUĞRULELÇİ

Doğum Tarihi ve Yeri: 28.06.1988 AKSARAY

E-posta adresi : sukran_tugrulelci@hotmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : K.T.Ü Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, 2012

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat
Mühendisliği, 2014

