



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

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GERGİ ÇUBUK BAĞLANTI TİPLERİNİN TAŞ KEMERLER
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehtap SANCAR

DANIŞMAN

Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

AKSARAY, 2018

DOĞRULUK BEYANI

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

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

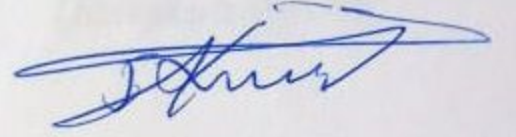
İmza

Mehtap SANCAR

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ONAY BELGESİ

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 132303005 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, "Mehtap SANCAR", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "Gergi Çubuk Bağlantı Tiplerinin Taş Kemerler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT



Aksaray Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ersin AYDIN



Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ali URAL

Aksaray Üniversitesi



Teslim Tarihi: 01.08.2018

Savunma Tarihi:10.09.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde bana her konuda destek olan danışman hocam Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT'a, tez çalışmamda bana yol gösteren Doç. Dr. Ali URAL'a, Prof. Dr. Mehmet Emin KARA'ya, deneysel çalışmalarımda yardımcı olan Öğr. Gör. Yakup BÖLÜKBAŞ'a ve Tekniker Fatih ÇELİK'e, tez çalışmam boyunca bana yardımcı olan İnş. Y. Müh. Derya KOÇ'a ve İnş. Y. Müh. Şükran TUĞRULELÇİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca, bana maddi ve manevi her türlü desteği gösteren babam Dursun SANCAR'a annem Sevim SANCAR'a ve kardeşim Gökhan SANCAR'a, bütün çalışmalarım boyunca yanımda olan eşim İsa KAYABAŞI ve oğlum M. Hüseyin KAYABAŞI'na, her zaman yanımda olan canım arkadaşım Merve UYSAL'a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Mehtap SANCAR

AKSARAY, 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	5
1.1.1 Kemerli yapılarda kullanılan gergi çubuğunun incelendiği çalışmalar	5
1.1.2 Kemerli yapıların davranışının incelendiği çalışmalar	6
1.1.3 Kemerli yapıların güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar	7
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	8
2. KEMERLER	10
2.1. Kemer Çeşitleri.....	12
2.2. Kemerin Kısımları	15
2.3. Kemerin Davranışı	16
2.4. Yığma yapılarda yükler	18
2.4.1 Sütuna gelen yükler	19
2.4.2 Kemer eğrisine gelen yükler	19
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ	22
3.1 Taşın Özellikleri	22
3.2 Harcın Özellikleri	30
3.3 Gergi Çubuğunun Özellikleri	34
4. KEMER NUMUNE DENEYLERİ	36
4.1 Kemer Numunelerinin Hazırlanması.....	36
4.1.1 Yer değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi	39
4.1.2 Şekil değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi	39
4.2 Referans Numune	41
4.3 Numune-1	45
4.4 Numune-2	50
4.5 Numune-3	55
4.6 Numune-4	59
4.7 Numune-5	62
4.8 Numune-6	65
4.9 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	70
4.10 Gergi Çubuğu Davranışının İncelenmesi	74
5. KEMER NUMUNELERİNİN SAYISAL ANALİZİ	77
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ.....	91

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERGİ ÇUBUK BAĞLANTI TİPLERİNİN TAŞ KEMERLER ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehtap SANCAR

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

ÖZET

Tarih boyunca yapıların inşasında çeşitli boyut ve şekillerde kemer tasarımlarının uygulandığı görülmektedir. Çeşitli kullanım alanlarındaki tarihi yapılar incelendiğinde, kemer ile sütun birleşim bölgelerine değişik şekillerde sabitlenmiş, sütunları birbirine tutturarak gergi çubuğu sisteminin kullanıldığı görülmektedir. Kemerlerin stabilitesinin korunmasında kullanılan gergi çubuğu sistemleri, bütün yapının ayakta kalmasında önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, taş kemerlerde kullanılan değişik gergi çubuğu sistemlerinin genel davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada gergi çubuğu kullanılmadan hazırlanan referans numune ile 6 tanesi farklı şekillerde sabitlenmiş gergi çubuğuna sahip toplam 7 adet taş kemer deney numuneleri düşey yük altında test edilmiştir. Test edilen numuneler LUSAS programı kullanılarak sayısal olarak da incelenmiştir. Deneyler sonucu elde edilen veriler ile yapısal analiz sisteminden elde edilen veriler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında gergi çubuğunun uygulanmasındaki zorluklar irdelenmiş, yapılan yanlışlıklara dikkat çekilerek en uygun gergi çubuğu sistemi ortaya konmuştur.

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

Eylül, 2018; 91 sayfa

M. Sc. THESIS

**INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF TIE BAR CONNECTION TYPES
ON STONE ARCHES**

Mehtap SANCAR

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

ABSTRACT

Throughout history, it has been observed that arch designs of various sizes and shapes have been applied in the building of the constructions. When the historical structures like mosque, church, madrasah, inn, waterway etc. are examined, it has been seen that the tie bars, which are fixed to the arch and column joints in various shapes and attaching the arch columns to each other, have been used. The tie bar systems used to maintain the stability of the archs play an important role in the survival of the whole structure. In this study, the effect of different tie bar systems used at the stone arches on the general behavior has been investigated. Within the scope of the study, a total of 7 stone arch test specimens -one of them without tie reference, 6 of them having tie fixed in different ways- have been tested under vertical load. The tested samples have been also digitally analyzed using a computer program. The data obtained from the results of the experiments and the data obtained from numerical Numunes have been compared with each other. In the restoration and strengthening studies, the difficulties in applying the tie bar have been investigated and the most appropriate tie bar system has been presented by drawing attention to the mistakes made.

Keywords: Effects of tie bar, Masonry structures, Stone arches, Finite element method, Lusas, Drucker-Prager criterias.

September, 2018; 91 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Gergi çubuğu örnekleri	2
Şekil 1.1 (devam). Gergi çubuğu örnekleri	3
Şekil 1.2. Hagios Georgios Rum Kilisesi	4
Şekil 1.2 (devam). Hagios Georgios Rum Kilisesi	5
Şekil 1.3. Hürrem Sultan Hamamı	5
Şekil 1.4. Kemerde yük aktarım şeması.....	9
Şekil 2.1. Kemerin gelişimi	11
Şekil 2.2. Kral kapısı.....	12
Şekil 2.3. Kemer çeşitleri.....	13
Şekil 2.3 (devam). Kemer çeşitleri.....	14
Şekil 2.3 (devam). Kemer çeşitleri.....	15
Şekil 2.4. Kemerin kısımları	15
Şekil 2.5. İngiltere Stonehenge tapınağı(URL-1)	17
Şekil 2.6. Sütunlarda eksenel kuvvet ve momentlerden dolayı oluşan gerilmeler	19
Şekil 2.7. Gergi çubuğu uygulaması örnekleri.....	21
Şekil 3.1. Yığma birimlerin basınç dayanım testleri.....	25
Şekil 3.2. Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanımı testleri (TEÇD 1-TEÇD 6 numuneleri).....	27
Şekil 3.2 (devam).Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanımı testleri (TEÇD 1-TEÇD 6 numuneleri)	28
Şekil 3.3. Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanımı testleri (TEÇD-A/TEÇD-F numuneleri).....	28
Şekil 3.3 (devam). Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanımı testleri (TEÇD-A/TEÇD-F numuneleri).....	29
Şekil 3.4. Eğilmede çekme dayanımı tayininde kullanılan deney düzeneği.....	31
Şekil 3.5. Basınç dayanımı tayininde kullanılan deney düzeneği.....	33
Şekil 3.6. (a) Gergi çubuğu için hazırlanan deney düzeneği, (b) Gerilme-Şekil değiştirme grafiği, (c) Şekil değiştirme kalibrasyon grafiği	35
Şekil 4.1. Numunelerin yapım aşamaları, geometrik özellikleri, sütunlar, kemerler ,kemerin üst kısmı	36
Şekil 4.2. Kemer Numunelerinde kullanılan gergi çubuğu sistemlerine ait temsili çizimler	38
Şekil 4.3. Deney numunelerine LVDT'lerin yerleştirilmesi.....	39
Şekil 4.4. Deney numunelerine strain-gaugelerin yerleştirilmesi.....	40
Şekil 4.5. Deney düzeneğindeki yük hücresinin, strain-gaugelerin ve LVDT'lerin veri toplama ünitesine bağlanması	40
Şekil 4.6. Kemer örümünde kullanılan kemer kalıbı	41
Şekil 4.7. Kemer örümü	41
Şekil 4.8. Referans numunenin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları	42
Şekil 4.9. Referans Numune Yük- Zaman grafiği	43
Şekil 4.10. Referans numuneye ait yük- yer değiştirme grafiği	43
Şekil 4.10 (devam). Referans numuneye ait yük- yer değiştirme grafiği	44
Şekil 4.11. Numunede kullanılan gergi çubuğu.....	45
Şekil 4.12. Numune 1'e örnek tarihi yapılardaki gergi çubukları.....	46
Şekil 4.13. Numune 1 Yük- Zaman grafiği	47

Şekil 4.14. Numune 1 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları	48
Şekil 4.15. Numune 1'e ait yük- yer değiştirme grafiği	48
Şekil 4.15 (devam). Numune 1'e ait yük- yer değiştirme grafiği	49
Şekil 4.16. Gelebeç Aziz Nikolaos Kilisesi	50
Şekil 4.17. Numune 2 Yük- Zaman grafiği	51
Şekil 4.18. Numune 2 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.	52
Şekil 4.19. Numune 2'ye ait yük- yer değiştirme grafiği	52
Şekil 4.19 (devam). Numune 2'ye ait yük- yer değiştirme grafiği	53
Şekil 4.20. (a) Numune 2 için yapılabilecek uygulama örneğindeki gerginin gösterimi, (b) Numune 2 için yapılabilecek uygulama örneğindeki sütunlar için gergi uygulamasının gösterimi	54
Şekil 4.21. Numune 3'e örnek tarihi yapılarıdaki gergi çubukları.....	55
Şekil 4.22. Numune 3 Yük- Zaman grafiği	56
Şekil 4.23. Numune 3 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.	57
Şekil 4.24. Numune 3'e ait yük- yer değiştirme grafiği	57
Şekil 4.24 (devam). Numune 3'e ait yük- yer değiştirme grafiği	58
Şekil 4.25. Numune 4 Yük- Zaman grafiği	59
Şekil 4.26. Numune 4 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları	60
Şekil 4.27. Numune 4'e ait yük- yer değiştirme grafiği	60
Şekil 4.27 (devam). Numune 4'e ait yük- yer değiştirme grafiği	61
Şekil 4.28. Numune 5 Yük- Zaman grafiği.	62
Şekil 4.29. Numune 5 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.	63
Şekil 4.30. Numune 5'e ait yük- yer değiştirme grafiği	63
Şekil 4.30 (devam). Numune 5'e ait yük- yer değiştirme grafiği	64
Şekil 4.31. Numune 6 Yük- Zaman grafiği	67
Şekil 4.32. Numune 6 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları	68
Şekil 4.33. Numune 6'ya ait yük- yer değiştirme grafiği	68
Şekil 4.33 (devam). Numune 6'ya ait yük- yer değiştirme grafiği	69
Şekil 4.34. Yük-yer değiştirme grafikleri	70
Şekil 4.34 (devam). Yük-yer değiştirme grafikleri	71
Şekil 4.35. Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri	73
Şekil 4.36. Kemer numunelerinde meydana gelen çatlaklar.....	74
Şekil 4.37. Gergi çubuklarındaki şekil değiştirmelerin; kemer üzerinden uygulanan düşey yük ve düşey yer değiştirme ile grafiği	75
Şekil 5.1. Yığma duvarlardaki Modelleme teknikleri a)Detaylı mikro Modelleme b)Basitleştirilmiş mikro Modelleme, c)Makro Modelleme	77
Şekil 5.2. Drucker-Prager kriteri (Chen ve Mizuno, 1990)	79
Şekil 5.3. Sonlu elemanlar Modelleriyle yapılan analizlerden elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinin deneysel sonuçların karşılaştırılması	81
Şekil 5.3 (devam). Sonlu elemanlar Modelleriyle yapılan analizlerden elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinin deneysel sonuçların karşılaştırılması	82
Şekil 5.4. Deney ve analiz sonuçları	83
Şekil 5.4 (devam). Deney ve analiz sonuçları	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Taşa ait fiziksel deney verileri.....	23
Çizelge 3.2. Taşa ait jeokimyasal analiz verileri-eser elementler.....	23
Çizelge 3.3. Taşa ait jeokimyasal analiz verileri – temel elementler.....	24
Çizelge 3.4. Duvar deneylerinde kullanılan yığma birimlere ait basınç dayanımı sonuçları	26
Çizelge 3.5. Duvar deneylerinde kullanılan yığma birimlere ait eğilmede çekme deneyleri sonuçları	29
Çizelge 3.6. Duvar deneylerde kullanılan harcın basınç ve eğilmede çekme deney sonuçları	32
Çizelge 4.1. Deney düzeneğinde kullanılan yük hücresinin, stain-gaugelerin ve LVDT ‘lerin veri toplama ünitesi üzerindeki yerleri	40
Çizelge 4.2. Concressive 1406’nın karışım oranları (URL-1).....	65
Çizelge 4.3. Concressive 1406’nın teknik özellikleri (URL-2)	66
Çizelge 4.4. Epoksi reçinesi özellikleri (URL-3).....	66
Çizelge 4.5. Deney sonuçları	73
Çizelge 5.1. Numunelerin malzeme özellikleri.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	Kohezyon
b	Numunenin genişliği
BTRM	Basalt textile-reinforced mortar (Bazalt tekstil malzemesi)
d	Numenin yüksekliği
E	Elastisite modülü
F_m	Akma noktasından sonra deney numunesinin dayandığı en büyük yük
FRP	Fiber Reinforced Polymers (Lif Takviyeli Polimer)
HB	Harcın Basınç Dayanımı
HEÇ	Harcın Eğilmede Çekme Dayanımı
I₁	Gerilme tansörünün 1. İnvariantı
J₂	Gerilme tansörünün deviatorüne ilişkin 2. varyantı
L	Mesnet silindirlerinin eksenleri arası mesafe
L_ç	Çeliğin ilk boyu
LC	Load Cell (Yük Hücresi)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (Doğrusal değişken diferansiyel dönüştürücü)
LUSAS	London University Structural Analysis System (Londra Üniversitesi Yapısal Analiz Sistemi)
ΔL	Çeliğin boyundaki değişim
mV	Milivolt
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
Sg	Strain-gauge (Gerinim ölçer)
P	Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet
P_f	Maksimum yük
R_m	Çelik çekme dayanımı
R_{tf}	Eğilmede çekme dayanımı
Sg	Strain-gauge
TBD	Taşın Basınç Dayanımı
TEÇD	Taşın Eğilmede Çekme Dayanımı
ε	Şekil değiştirme
σ	Gerilme
α, k	Drucker-Prager kriterinde kullanılan malzeme sabitleri
θ	Malzemenin içsel sürtünme açısı

1. GİRİŞ

Taş, tuğla, kerpiç, briket, ahşap gibi yapı malzemelerinin üst üste yerleştirilip kendi ağırlıkları ile ya da harç ile birleştirilerek duvar, kemer, kubbe, tonoz, sütun gibi taşıyıcı elemanlar oluşturması şeklindeki yapıya yığma sistem denir.

İnsanlar, yaşamın getirdiği gereklilikler sebebiyle bir çok yapısal tasarımlar ortaya çıkarmıştır. Elde olan imkânlarla beraber zamanın teknolojisinin de yardımıyla binalar, kemer köprüler, kanallar ve bunun gibi birçok yapı inşa eden insanlığın yığma yapı ağırlıklı çalıştığı görülmektedir. İlerleyen teknolojiyle beraber betonarme ve çelik yapıların kullanımı artmış olsa da dünyada ve ülkemizdeki örneklerde halen yığma yapıların inşa edildiği görülmektedir.

Ülkemizde nüfus yoğunluğunun az olduğu bölgelerde görülme sıklığının daha fazla olduğu yığma yapılar, gerek ekonomik açıdan uygun olması gerekse yığma yapılarda kullanılan malzemelerin kolay temin edilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Günümüz şartlarında da uygulamasının devam ettiği görülen yığma yapıların gelecekte de inşasının devam edeceği tahmin edilmektedir.

Tarihten bu güne ayakta kalmayı başarmış birçok yapıda kemerlerin kullanıldığı görülmektedir. Anadolu'da sıkça rastladığımız özellikle Osmanlılardan ve Romalılarından günümüze ulaşmış cami, han, hamam, medrese, kervansaray, kilise gibi tarihi yapılar incelendiğinde, kemerlerde sütun-kemer birleşim bölgelerinden uygulanmış demir gergi çubuğu sistemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Kemer stabilitesinin sağlanmasında önemli rol oynayan demir gergi çubuğu sistemleri özellikle düşey yük altında kemer ayaklarında meydana gelecek yanal açılmaları engellemekte dolayısı ile kemer dayanımını arttırmaktadır.

Tarihi yapılarda kullanılan gergi çubuğu sistemleri Anadolu'da daha çok Osmanlı eserlerinde görülmektedir. Örnek olarak 1748-1755 yıllarında İstanbul'da inşa edilen Nuruosmaniye Camiinde gergi çubukları kullanılmıştır. 1491'de II. Bayezid'in hazinebaşı Firuz Ağa tarafından yaptırılan ve İstanbul'da bulunan caminin kemer bölgelerinde gergi çubuğu bulunmaktadır. İstanbul Sarayburnu'nda bulunan Osmanlı İmparatorluğu'nun 600 yıllık tarihinin 400 yılı boyunca, devletin idare merkezi olarak kullanılan ve Osmanlı padişahlarının yaşadığı yer olan Topkapı Sarayının

çeşitli kısımlarında da gergi çubuğu örneklerine rastlanmaktadır. Bahsedilen gergi çubuğu örnekleri Şekil 1.1’de görülmektedir.



(a) Nuruosmaniye Camii.



(b) Firuz Ağa Camii.

Şekil 1.1. Gergi çubuğu örnekleri.



(c) Topkapı Sarayı.

Şekil 1.1 (devam). Gergi çubuğu örnekleri.

Yüzyıllar boyunca varlığını sürdüren yapılarda çeşitli deformasyonlar meydana gelmektedir. Gergi çubuklarının deformasyonuna sebep olan en önemli etken ise korozyondur. Şekil 1.2’de korozyona uğramış gergi çubuğun örneği gösterilmiştir (Ünal, 2007).



(a)

Şekil 1.2. Hagios Georgios Rum Kilisesi.



(b)

Şekil 1.2 (devam). Hagios Georgios Rum Kilisesi.

Korozyon sonucunda dayanım kaybına uğrayan gergi çubukları yapılan restorasyon ve güçlendirme çalışmaları sonucunda yenilenmektedir. Bu yenilenme işlemi yapılırken bazı hatalı ve eksik uygulamaların yapıldığı düşünülmektedir. Ayrıca benzer eksiklik ve hatalar daha önce gergi çubuğu sistemi kullanılmamış bir yapıya güçlendirme maksadıyla gergi çubuğu sistemi uygulaması yapılan tarihi binalarda da görülmektedir. Gergi çubuğunun, tarihi yapının orijinalinde sütun-kemer birleşim bölgesinde sütun en kesitinin orta noktasından uygulandığı görülmektedir. Günümüzde yapılan restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında ise sütun ve kemer sisteminin birleştiği bölgede sütunun etrafını dışarıdan saran bir bilezik ile gergi çubuğu birleştirilmiştir. Şekil 1.3'te bu gergi çubuğu sistemine örnek olarak İstanbul'da bulunan Hürrem Sultan Hamamı gösterilebilir. Sütun kesitine uygun şekilde tasarlanan bilezik, sütun ve kemerin birleşim bölgesinin etrafını saracak şekilde uygulanmıştır. Gergi çubukları ise kemer yönündeki sütun kenarına denk gelen kare bilezik kenarının orta noktasına kaynaklanmıştır. Kemere gelebilecek herhangi bir yük karşısında kare kesitli olan bilezik, gergi çubuğunun kaynaklandığı bölgede açılmaya (konveks şekilde esnemeye) çalışacak daha sonra gergi çubuğuna yükü iletacaktır. Bu yük aktarımı olana kadar da kemerde büyük deformasyonlar oluşacaktır. Dolayısı ile bu şekilde imal edilen gergi çubuğu sistemi istenilen yapısal davranışı gösterememektedir.



Şekil 1.3. Hürrem Sultan Hamamı.

1.1 Literatür Özeti

Kemerli yapılar günümüze kadar birçok çalışmaya konu olmuştur. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak kemerin yapısı, çeşidi, güçlendirilmesi, restorasyonu ile ilgilidir. Günümüze kadar inşa edilen yapılarda uygulanan gergi çubuğu sistemleri ile ilgili bilimsel çalışma ise çok az sayıdadır.

1.1.1 Kemerli yapılarda kullanılan gergi çubuğunun incelendiği çalışmalar

Lagomarsino ve Calderini, (2005) çalışmalarında metal gergi çubuğu sistemini incelemiş, kemer ve tonozlarda uygulanan bu sistemin eksenel çekme kuvveti altındaki davranışını araştırmışlardır. Deneysel ve teorik olmak üzere iki farklı metod üzerinde çalışmışlardır.

Çelik vd., (2010) İstanbul'daki Yavuz Selim Camii, Isparta'daki Firdevs Bey Bedesteni ve Edirne'deki Tütünsüz Baba Türbesi üzerinde yaptıkları çalışmalarında, deprem etkisinde kalmış, hasara uğramış tarihi yapılardaki kemerlerde kullanılan gergi çubuğu sisteminin önemini ifade etmişlerdir.

Lagomarsino ve Calderini, (2014) çalışmalarında sütunlara uygulanan gergi çubuğu sisteminin sismik davranışını deneysel olarak incelemişlerdir.

Tuğruelelçi (2014) çalışmasında düşey yüke maruz kalan tuğla kemerlerde kullanılan gergilerin, genel davranışa etkisini araştırmıştır. Deney sonuçları ile sayısal sonuçları karşılaştırarak incelemiştir.

1.1.2 Kemerli yapıların davranışının incelendiği çalışmalar

Hradil vd., (2001) çalışmalarında 1737 yılında Çek Cumhuriyeti'nde inşa edilen yığma yapıdaki tarihi bir köprüyü modellemişlerdir. ANSYS bilgisayar programı kullanılarak modellenen köprünün hem deterministik hem de stokastik analizleri yapılmış, yapının davranışını incelenmiştir. Farklı davranış göstermesi beklenen iki nokta üzerinde yapılan incelemede, Stokastik analizden faydalanılmış ve aralarındaki sıcaklık farkları (yaklaşık 60°C) dikkate alınarak sonuca ulaşılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuca göre betonarme döşeme örtüsü ile yığma yapı arasında sıcaklık farkından kaynaklanan davranış değişikliklerinin olduğu tespit edilmiştir.

Kanıt ve Işık, (2006) yapı malzemesi olarak tuğla kullanılan çalışmada, kemer numunelerinin deneysel sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Deney sonucu elde edilen şekil değiştirmeler ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarının birleştirilmesiyle kemerlerin eşdeğer sürekli ortam parametreleri belirlenmiştir. Uygulanan yöntemler incelendiğinde ayrık elemanlar yönteminin sonlu elemanlar yöntemine kıyasla daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bayraktar vd., (2007) çalışmalarında Trabzon'un Akçaabat ilçesinde bulunan Şinik Köprüsü'nü modellemiştir. Köprünün deneysel ölçümleri, analiz sonucu ve dinamik karakteristiklerinden elde edilen verilerle sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. Bu iyileştirme sonucunda tarihi köprünün deprem etkisi karşısında gösterdiği davranış incelenmiştir. Teorik olarak elde edilen dinamik karakteristiğin deney sonunda elde edilen dinamik karakteristiğe göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Oluşan bu farklılığın giderilmesi için sonlu eleman modelinde iyileştirilme yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Ocak (2009) çalışmasında Batı Anadolu'da kullanılan yapılarda sık görülen kemer ve suyuollarının yapımını incelemiştir. Yaşam alanlarının su ihtiyacını gidermek amacıyla yapılan kemerlerin sanatsal önemi üzerinde durmuştur.

Birinci (2010) çalışmasında taş kemer köprülerde meydana gelen sorunları gidermek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Numuneler yapmıştır. Yapılan Numunelerde veri eksiklikleri nedeniyle bazı kabuller yapılması gerekmiştir. Deneysel yöntem kullanılarak yapılan bu kabullerin doğruluğu araştırılmıştır. Araştırma sonucunda yapının gerçek davranışına en yakın sonlu eleman Numune belirlenmiştir.

Orhan (2010) çalışmasında kemer köprülerin yük taşıma kapasitesinin hesaplandığı metodları incelemiştir. Çalışmada limit analiz metoduna uygun algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma ışığında kemerin göçme yükünün hesaplandığı ve elde edilen sonucun literatürdeki sonuçlara yakın olduğu tespit edilmiştir.

1.1.3 Kemerli yapıların güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar

Elmalich ve Rabinovitch, (2009) çalışmalarında dairesel kemerleri kompozit malzemelerle güçlendirmiş ve sonlu elemanlar modeli geliştirerek gerilme analizini belirlemeyi amaçlamışlardır.

Milani ve Bucchi, (2010) yaptıkları çalışmada geliştirdikleri kinematik sonlu elemanlar modeli ile fiber takviyeli polimer (FRP) şeritler ile güçlendirilmiş kemer, kubbe gibi eğrisel tuğla yapı elemanlarının göçme mekanizması ve göçme yükünü belirlemeyi amaçlamışlardır. Geliştirilen modelin uygulamada kullanılabileceğini bunun yanında göçme yükü ve göçme mekanizmasının da güvenli sınırlar içerisinde kaldığını belirtmişlerdir.

Garmendia vd., (2011) çalışmalarında taş kemerlerin onarım ve güçlendirilmesinde kullanılabilecek alternatif güçlendirme yöntemi denemişlerdir. BTRM (bazalt tekstil malzemesi) kullanılarak elde edilen güçlendirme malzemesiyle yapılan deneylerde taş yapıyla iyi oranda fiziksel ve kimyasal uyum sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan deneylerde numunenin taşıma kapasitesinin ve sünekliğinin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür.

Tao vd., (2011) çalışmalarında büyük bir taş kemeri FRP'yle güçlendirmiş ve davranışını incelemişlerdir. FRP ile güçlendirmenin kemerli taş köprü'nün yapısal performansını artırmada etkili bir teknik olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

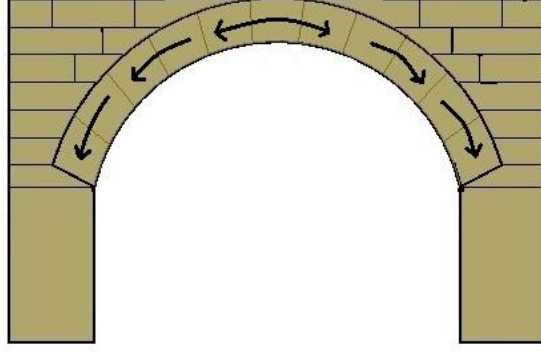
Caporale vd., (2012) yaptıkları çalışmada farklı özelliklere sahip kemerleri FRP ile güçlendirmiş ve göçme yükünü hesaplamışlardır. Yapılan hesaplamalarda doğrusal ve doğrusal olmayan iki farklı yöntem tercih edilmiştir. Bu iki yöntemin sayısal örneklerle ifade edildiği çalışmada elde edilen sonuçlar incelenerek avantajları değerlendirilmiştir. Farklı formdaki kemerlerin de FRP ile güçlendirildikten sonraki işlevselliği incelenmiştir.

Dagher vd., (2012) yaptıkları çalışmada FRP kullanılarak etrafı sarılan kemer formundaki beton yapı elemanının eğilme davranışını incelemişlerdir. Deney elemanı ile bilgisayar ortamındaki Numuneden elde edilen sonuçları karşılaştırmış ve yapılan çalışmanın teknoloji alanında uygulanabilirliğini ifade etmişlerdir. Üç giriş ve dört kemer üzerinde yapılan deneylerle, FRP sarılmış kemer formundaki yapı elemanının eğilme yükü-deformasyon ilişkisi ve moment eğrilik ilişkisini incelemişlerdir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Günümüzde olduğu kadar tarihi yapılarda da uygulamasına rastlanılan yığma yapıların gelecekte de önemini kaybetmemesi için korunması ve geleceğe aktarılması şarttır. Bu açıdan çalışma kapsamında olan kemer formlarının ve diğer tarihi yapıların yapısal davranışlarının bilinmesi gerekir.

Birçok yapıda kullanılan kemerli sistemlerin geometrik şeklinin de etkisiyle genelde basınca çalıştığı görülmektedir. Her ne kadar düşey yük etkisinde olsalar da bazen yatay yüklere de maruz kalmaktadırlar. Kemer mesnetleri açıklık doğrultusunda açılma göstereceğinden çekme kuvvetine karşı zayıf olan taş ve tuğlalarda düşük çekme kuvveti karşısında bile çatlamalar görülebilecektir. Kemerin şeklinden dolayı maruz kaldığı düşey yük üzengi yatağından geçerek mesnetlere kadar iletildiği Şekil 1.4'te gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Kemerde yük aktarım şeması.

Birçok tarihi yapıda kullanılan kemerlerde üzengi taşının hemen üzerinden, taşlara ya da tuğlalara gergi çubuğu yerleştirildiği görülmektedir. Yapılan bu uygulamayla mesnetlerde açıklık doğrultusunda meydana gelen açılmayı önlemek amaçlanmaktadır. Üzengi yatağından geçerek mesnetlere kadar iletilen bu yük uygulanan gergi çubuğu sayesinde karşılanacak ve böylece kemerde meydana gelebilecek deformasyonlar en aza indirilecektir.

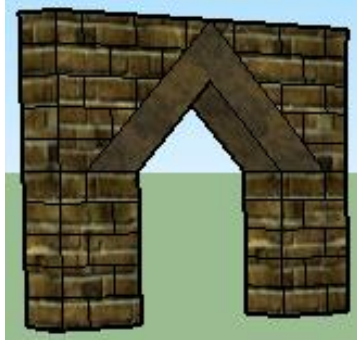
Yapılan bu çalışmada düşey yük altındaki kemerlerde kullanılan gergi çubuklarının genel davranışa etkisi incelenmiş elde edilen sonuçların bilimsel bir dayanağa oturtulması amaçlanmıştır. Tez kapsamında, referans numune ve 6 farklı gergi çubuğu sisteminin uygulandığı kemer numuneleri düşey yüke tabi tutulmuş aynı zamanda sonlu elemanlar analizi de yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlarla sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırılmış ve gergi çubuğu uygulanan kemerlerin referans numuneye göre daha fazla yük taşıdığı tespit edilmiştir. Restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında gergi çubuğuyla ilgili yaşanan sorunlar ve yapılan yanlış uygulamalar değerlendirilmiş, gergi çubuklarının nasıl yapılması gerektiği hususunda çeşitli öneriler sunulmuştur. Restorasyon ve güçlendirme çalışmalarına ışık tutacak olan bu tez bu alanda çok büyük bir eksikliği giderecek, gergi çubukları uygulamasının nasıl yapılması gerektiği konusunda yol gösterici olacaktır.

2. KEMERLER

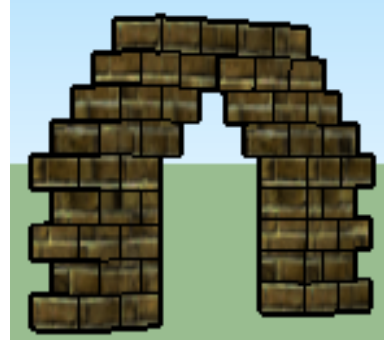
Kemerler, iki sütun veya ayak arasındaki açıklığı geçmek için yapılan eğri eksenli kirişlerdir. Yığma yapılarda açıklıkları birleştirmek için doğrusal yapı elemanlarının eksik kaldığı durumlarda kemerler kullanılmaktadır.

Kemer yapısının ilk örneklerinin açıklığı örten iki taş parçasının birbirine dayanması ile oluştuğu bilinmektedir. Bu oluşum kemerin gelişiminde ilk basamak olduğu gibi birçok kemerin inşası için de örnek teşkil etmesi açısından önemlidir. Mısır'da (M. Ö. 2700- 2250) yıllarında taşların birbirine dayanmasıyla oluşturulan Ters 'v' şeklindeki ilkel kemer örneklerine rastlanmaktadır (Özkahraman, 1994). Mısır ve Mezopotamya'da taş örneklerden önce, küçük kerpiç ve tuğla parçalarıyla kemerler inşa edilmiştir (Kuban, 1998). Kapı, pencere gibi küçük açıklıkları geçmek için iki taşın birbirine dayanmasıyla elde edilen kemerler kullanılmıştır. Daha sonraki kemerlerin oluşumunda, yapımında kullanılan malzemenin üst üste kaydırılmasıyla bindirme kemer adı verilen kemerler inşa edilmiştir. Çekme gerilmesi kirişlerin alt yüzeyinde meydana gelirken konsol kirişlerin üst yüzeyinde oluşur. Bindirme kemerlerde ise konsol görevi gören taşlar diğer taşların üzerine çok az çıkma yaptığı için çekme gerilmeleri düşük seviyede kalmaktadır. Tarihi Mısır ve Mezopotamya'ya dayanan bindirme kemerlerin bir örneği de M. Ö. 2900'de inşa edilen Bent Piramidi'nin içinde bulunur. Piramitte bindirme kemerlerin kullanıldığı bölgelerde düz kemerlere de rastlanılmıştır. Küçük açıklıkları geçmek için yapılmış olan düz kemerlere M. Ö. 2500'de Mısır'da rastlanmıştır.

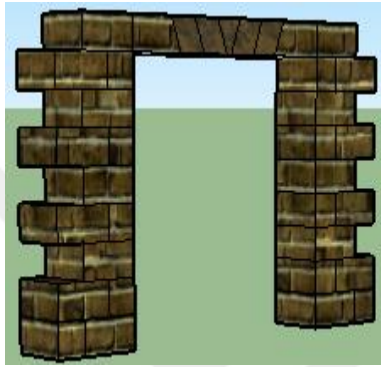
Açıklıkları geçmede sivri kemerlerin yaygın kullanıldığı gotik dönemde kubbede oluşan itki kuvvetinden doğan duvarlardaki açılmaları önlemek amaçlanmıştır. Kemerlerin yük aktarımı göz önüne alındığında, sivri kemerin yarım daire kemere göre alt kısımda itki kuvvetinden dolayı oluşan yanal açılma oranı daha azdır ve yüklerin sütuna iletimi daha kolaydır. Hasol (1998) çalışmasında yer alan kemerin gelişimine ait örnekler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



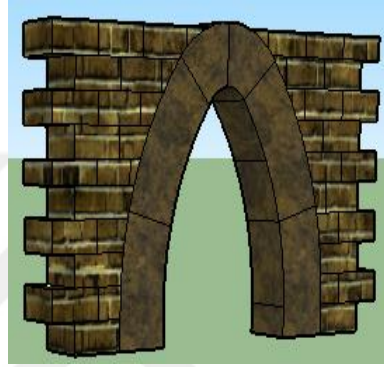
a) Ters V şeklinde kemer



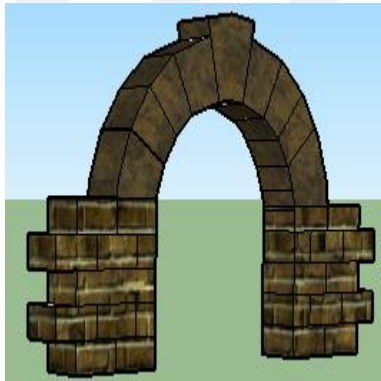
b) Bindirme kemer



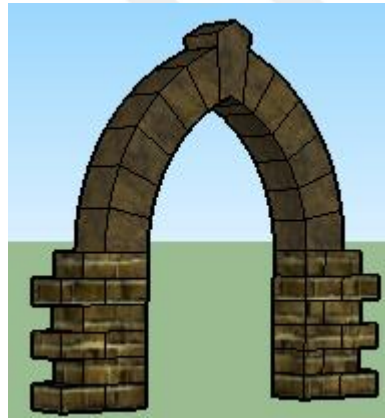
c) Düz kemer



d) Hitit kemeri



e) Beşik kemer



f) Sivri kemer

Şekil 2.1. Kemerin gelişimi.

Şekil 2.2’de gösterilen kemer örneği M.Ö. 13-14. yüzyılda Hititlerin başkenti Boğazköy’ün girişindeki inşa edilen ‘Kral Kapısı’ olup Anadolu’daki en eski kemer olarak bilinmektedir. Bu parabol şeklindeki kemer, eğrisel olarak yapılan taşların üst üste yerleştirilip tepe noktasından birleşmesi sonucu oluşmuştur.



Şekil 2.2. Kral kapısı.

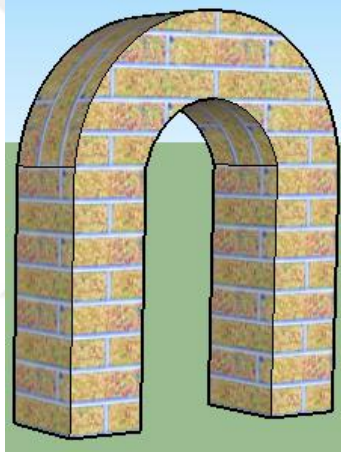
Tarihte Yunanlıların düz atkı kemerler kullandığı görülmektedir. Kemerler Roma dönemine kadar küçük açıklıkları geçmek için kullanılmış ve önemli bir gelişim gösterememiştir. Roma dönemine gelindiğinde küçük açıklıkları geçmek için kullanılan kemerler bilinmekle birlikte kemerin kullanım alanının geliştirilmesi önemli hale gelmiştir. Geniş açıklıkları geçmek için kemeri, örtü elemanı olarak tonoz ve kubbeyi kullanan Romalıları, kemerleri gelişmiş şekliyle kullanan topluluk olarak ifade edebiliriz. Romalılardan sonraki dönemlerde yapılan yapıların ana hatlarını oluşturan ve bu gelişmiş tekniklerle inşa edilen yapılarda sadece detaylar farklılık göstermiştir. Büyük açıklıklı tarihi yapılarda kesme taştan örülen yarım daire şeklindeki kemerlerin kullanıldığı görülmektedir. Tarihi yapılardaki kapı, pencere gibi küçük açıklıklar için de kesme taş, kaba yonu taş, moloz taş ve tuğladan kemerlerin kullanıldığı görülmektedir.

2.1 Kemer Çeşitleri

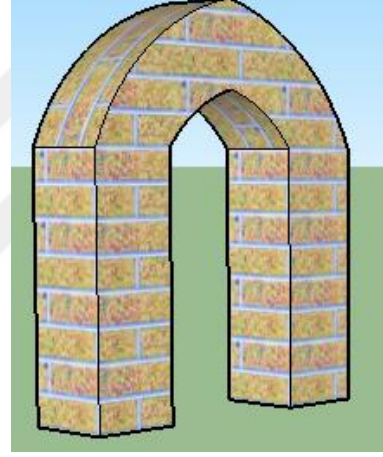
Kemerler, tarihi yapılarda tamamlayıcı rol oynayan yapı elemanları olmuştur. Kemerlerin bulunmasıyla birlikte küçük açıklıklı yapıların yanı sıra büyük açıklıklı yapıların inşası da mümkün olmuştur. Tonoz, kubbe gibi örtü elemanlarının kaynağını oluşturan kemerlerin ilk örneklerine Eski Mısır ve Anadolu'da rastlamak mümkündür. Kemerin, taşıyıcı sistem olan eğrisel elemanların ilk biçimi olduğu söylenebilir. Sadece basınca çalışan kemerler, üzerine gelen yükleri basınç şeklinde ileterek açıklığın iki yanına aktaran yapı elemanlarıdır. Bu sebeple kemerli yapıların

inşasında taş, tuğla gibi basınç direnci yüksek, çekme direnci düşük malzemelerin tercih edilmesi daha uygundur.

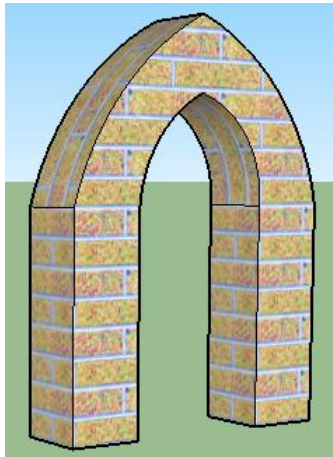
Kemerlerin ilk örnekleri birbirine dayanan iki büyük taşın ters v şeklinde birleşerek açıklığı örtmesiyle meydana gelmiştir. Kemerin tarihsel gelişiminde, kullanılan ilk örneklerden bu güne ulaşana kadar çeşitli teknikler denenerek farklı tasarımdaki kemer şekilleri elde edilmiştir. Hasol (1998), çalışmasında ifade ettiği kemer biçimlenmeleri basık, şişkin, sepetkulpu, beşik, düz, üçgen, abanık, mızrak ucu, at nalı, tudor, dilimli, köşeli, armudi, ters eğmeçli, yıldız, kaş kemer şeklinde Şekil 2.3'te ifade edilmiştir. Tarihi yapılarda kullanılan kemerler küçük açıklıklı yerleri birleştiren bir yapı elemanı olduğu gibi büyük açıklıklı eğrisel elemanların da tüm yükünü aktaran askı kemeri olarak da kullanılmıştır.



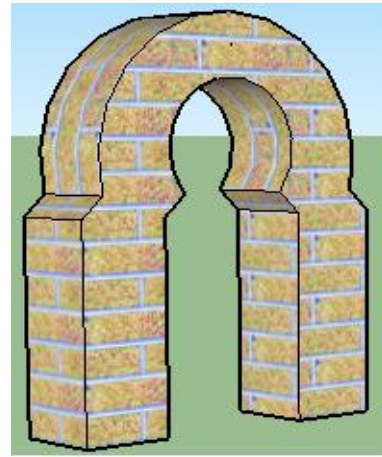
a) Beşik kemer.



b) Basık sivri kemer.

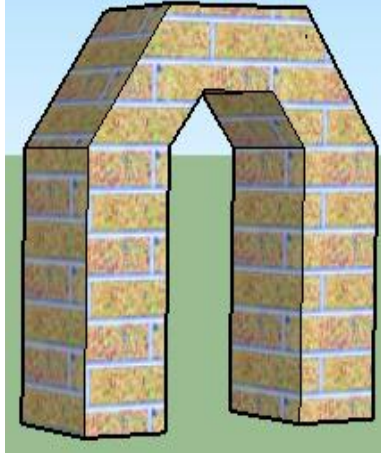


c) Yüksek sivri kemer.

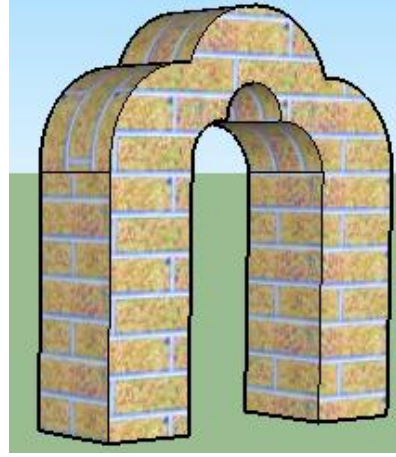


d) At nalı kemer.

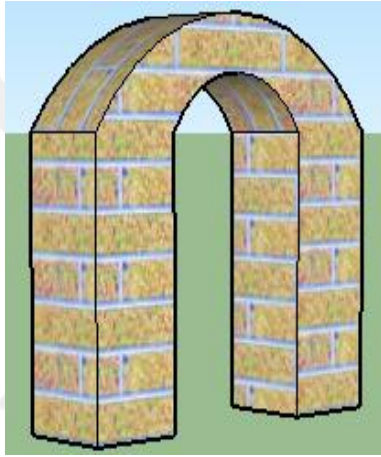
Şekil 2.3. Kemer çeşitleri.



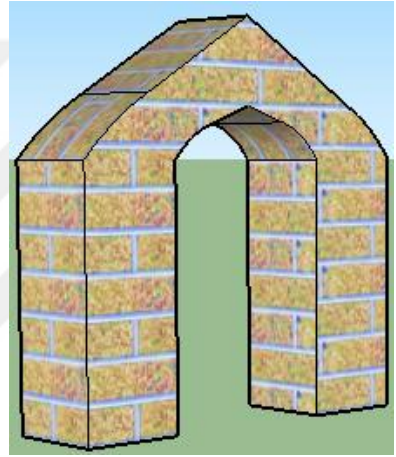
e) Köşeli kemer.



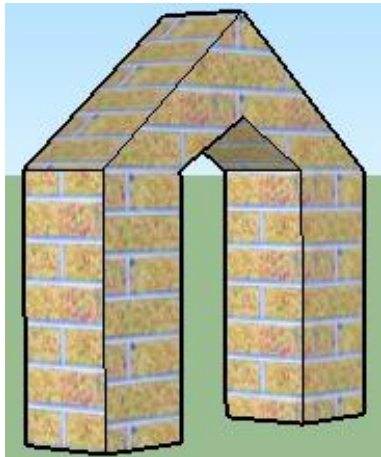
f) Dilimli kemer.



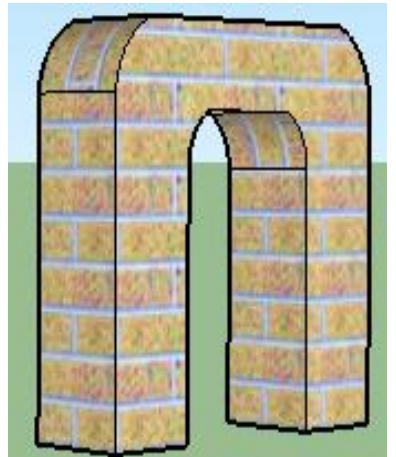
g) Sepet Kulpu kemer.



h) Tudor kemer.

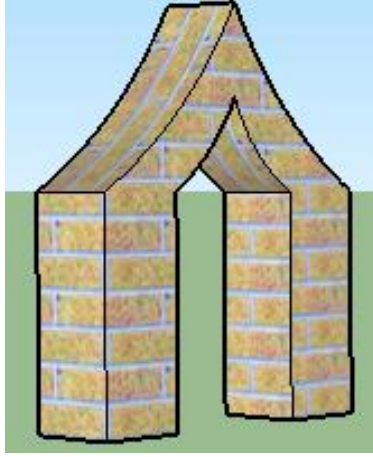


ı) Üçgen kemer.

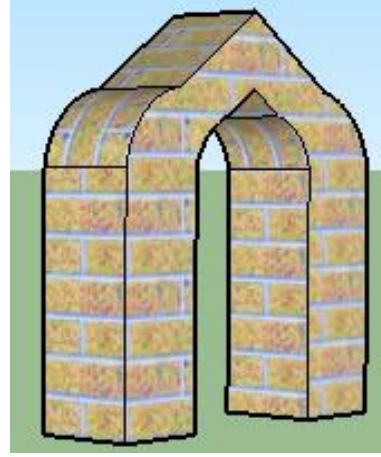


i) Bursa kemer.

Şekil 2.3 (devam). Kemer çeşitleri.



j) Ters Eğmeçli kemer.

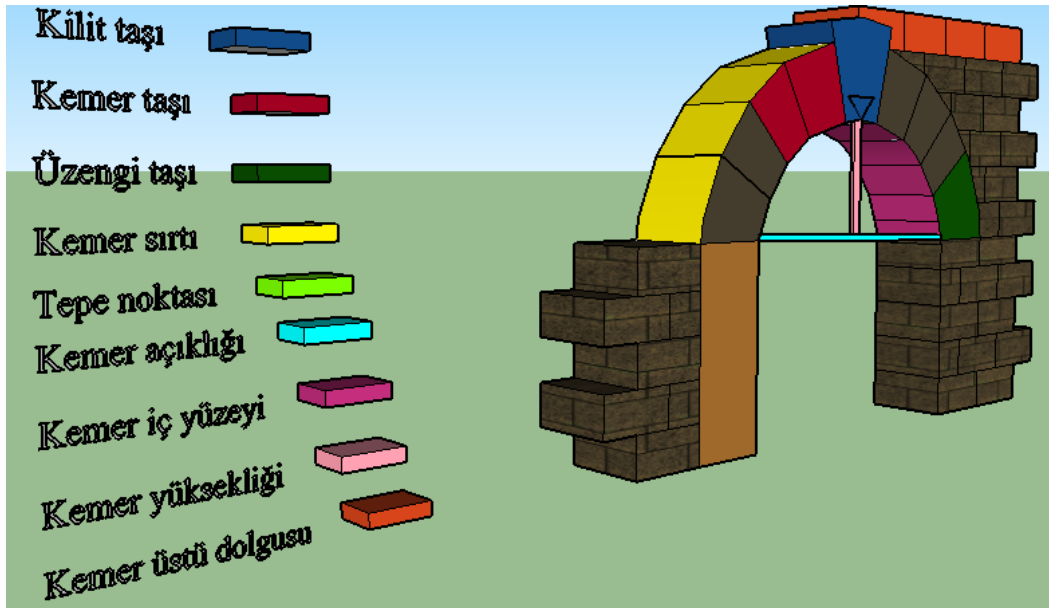


k) Kaş Kemer.

Şekil 2.3 (devam). Kemer çeşitleri.

2.2 Kemerin Kısımları

Kemerler; kavisli yapıya sahip olan ve yapılardaki açıklığı örtmek amacıyla tasarlanan aynı zamanda üzerine gelen yükü destekleyen yapı elemanlarıdır. Kemer icat edilmeden önce bir duvardaki açıklığı desteklemenin tek yolu ağır bir taş ya da ahşaptan yapılmış düz bir lento kullanılmaktaydı. Kemerler, daha fazla hava ve ışık sağlayan daha büyük açıklıkların yapılmasına olanak sağlayan yapı elemanı olmuştur. Kemerler, Mezopotamya, Roma, Yunan, Gotik, İspanyol mimarisinde yoğun şekilde kullanılmıştır. Şekil 2.4'te kemerin kısımları görülmektedir.



Şekil 2.4. Kemerin kısımları.

Kemer taşı; bir kemer ya da kubbe duvarında, kemer merkezlerinden birinde birleşen, kama şeklinde birimlerden herhangi biri olarak ifade edilebilir. Kemer genellikle tek sayıda kemer taşına bölünür ve kilit taşı en tepeye yerleştirilir. Bu, duvarcılara döşeme yaparken kolaylık sağlamak ve kemerin daha iyi görünmesine yardımcı olmaktadır. Kilit taşı; bir kemerin tepesinde kama şeklinde olan ve diğer kemer taşlarını yerine kilitlemek için hizmet eden çoğunlukla süslenmiş kemer taşıdır. Kemerin sütununa dayanan ilk kemer taşı üzengi taşıdır. Üzengi taşı; bir kemerin iki yanında ayaklar üzerine gelen ilk taş olarak ifade edilebilmektedir. Bir kemerin görünür yüzeyinin dış yüzeyi veya sınırı kemer sırtı olarak tanımlanmaktadır. Kemer iç yüzü; bir kemerin iç bükey alt kısmını oluşturan iç eğrisi veya yüzeyidir. Kemer üstü dolgusu; İki bitişik kemer arasındaki ya da bir kemerin sol veya sağ köşesinde üçgen biçimli alan ve onu çevreleyen dikdörtgen çerçevede bulunan taşların oluşturduğu kısımdır. Sütun, mesnet; kemerde itki kuvvetini (eksenel baskı) alan ve destekleyen yapı elemanıdır. İtke kuvveti (Eksenel basınç); yapının bir bölümünün diğerine karşı uyguladığı dışa itilen kuvvet veya basınç olarak ifade edilebilir.

2.3 Kemerin Davranışı

Yığma yapılar kemer, tonoz, kubbe ve duvar gibi yapı elemanlarından oluşmaktadır. Statik davranışın hesaplanamadığı eski çağlarda bu yapı elemanlarının boyutları, kullanılan malzemenin sertliğine göre belirlenmiştir. Çekme dayanımı zayıf olan bu yapı elemanlarının basınca çalışan kısımlarını kuvvetlendirmek için en kesiti kalın olacak şekilde tasarlanması gerekmiştir. Kemerlerde kullanılan malzemelerin eksenel kalınlıklarının büyük tercih edilmesi kemerin burkulma sonucu hasar görmesini engellemiştir. Yığma yapılarda boşluk oluşturmak için ilk etapta düz atkı ve lento olarak adlandırılan doğrusal elemanlar kullanılmıştır. Lentolar, açıklığın ve üzerindeki yükün büyüklüğüne göre sehim gösterme eğilimindedirler. Bu sebeple kirişin üst kısmında basınç gerilmesinden dolayı ezilme alt kısmında çekme gerilmesinden dolayı eğilme meydana gelir. Bu eğilmeyi engellemek için ise tercih edilen malzemenin çekmeye karşı dayanımı olmalıdır. Buna rağmen taşla çekme dayanımı yüksek olan ahşap malzemeler yerine büyük ölçülerdeki taş lentolarla geniş açıklıklar geçilmiş, sık aralıklarla yapılan kolonlarla da desteklenmiştir. Buna örnek olarak Şekil 2.5'te gösterilen İngiltere'deki Stonehenge tapınağı gösterilebilir.



Şekil 2.5. İngiltere Stonehenge tapınağı (URL-1).

Yığma yapılarda boşluk oluşturmak için düz atkı ve lento gibi doğrusal elemanların yetersiz kaldığı durumlarda çeşitli malzemelerin yan yana dizilmesiyle yay şeklinde tasarlanan kemerler kullanılmıştır. Yay şeklinde tasarlanan kemerler sadece basınca çalışarak üzerine gelen yükleri sütuna iletmektedir.

Büyük açıklıkların geçilmesi için kullanılan kemer, tonoz, kubbe gibi eğrisel elemanlar basınç dayanımı yüksek, çekme ve eğilme dayanımı düşük olan taş, tuğla gibi malzemeler kullanılarak inşa edilmiş ve bu elemanların yapılarda kullanımı yaygınlaşmıştır.

Kemer tasarımını doğru yapabilmek için zincir eğrisi örnek alınmıştır. Zincirin iki ucundan tutularak düşey ekseninde bırakıldığında kendi ağırlığının etkisiyle tüm kesitlerinde çekme gerilmesi oluşacak şekilde sarkma meydana gelir. Sarkma sonucu elde edilen şeklin ters çevrilmesiyle yapılacak olan kemerde ise çekme gerilmesi oluşmayacak ve tamamen basınca çalışan bir tasarım elde edilecektir. Uygulanacak yükün merkeze yakınlığıyla da kemerin büyük oranda basınç gerilmesi taşıması sağlanacaktır. Bu nedenle uygulanacak yükün merkeze yakınlığı basınca çalışan bir kemer elde edilmesi için önemlidir.

Yalnızca basınç kuvvetlerine dayanımı olan taş yatay yapı elemanlarının kullanımı için çok uygun değildir. Ancak küçük açıklıklarda ve düşey yönde kullanılan ağır taşıyıcı elemanlarla mesnetlendirildiğinde yatay yapı elemanlarında tercih edilebilir.

Kemer, kubbe gibi basınca çalışan yapısal elemanlar için malzeme olarak taşın kullanılması doğru bir tercih olarak kabul edilebilir.

Çevrede bulunan malzemelerin kullanılmasıyla inşa edilen tarihi yapılar, çeşitli deneyimler sonucu elde edilen bilgi birikimiyle yapılmıştır. Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte yapı üzerine etkiyen yükler ve bu yükler altındaki yapının davranışı çeşitli yöntemlerle ve bilgisayar programları ile hesaplanabilmektedir. Gerek yapıyı oluşturan malzeme gerekse uygulama tekniği açısından yığma yapılar diğer yapılara göre farklılık göstermektedir. Yığma yapıların yapısal analizinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir ki bu işlem çok zordur. Taş kullanılarak inşa edilen bir yapının içerisinde tuğlanın kullanıldığı yerler olabilir ve taşları birbirine tutturmak için demir kenetler, zıvanalar veya aralarda zincirler kullanılmış olabilir. Tüm bu ayrıntılar dışarıdan görülmediğinden yapının dış kısmından alınacak bir numune üzerinde yapılan analizin yapının gerçek davranışını yansıtmayacağı açıktır. Bu bilinmezlikler göz önüne alındığında yığma yapıların analizinde kullanılan yöntemlerin tümünde bir miktar hata payı ile sonuç elde edileceği ifade edilebilir.

2.4 Yığma yapılarda yükler

Yapı, üzerine gelen yükleri zemine aktarmakla görevli yapı elemanlarından meydana gelmektedir. Yığma yapıları oluşturan yapı elemanlarının; duvar geometrisi, kullanılan malzemenin dayanımı ve yığma blokların birleştirilme şekli, yapının düşey yüklere ve yatay deprem yüklerine dayanımını belirlemektedir.

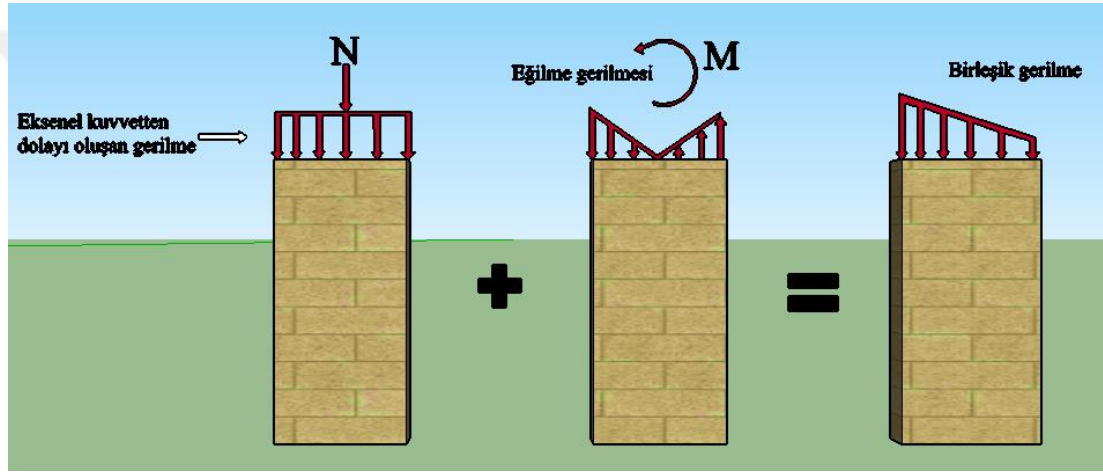
Yapıya etki eden yükleri değişik başlıklar altında ifade etmek mümkündür. Mimari tasarım hazırlanırken en önemli nokta yığma yapıyı etkileyen yüklerin tespitidir. Çünkü yükle doğru orantılı olarak tasarlanan yapının formu, taşıyıcı sistemi ve taşıyıcı sistemi oluşturan yapı elemanlarının özelliklerini etkilemektedir. Yapıya etki eden yükleri; yükün kaynağına göre doğal yükler ve kullanım yükleri, yükün etki etme şekline göre ise düşey ve yatay yükler olarak ayırabiliriz.

Yapıya içerden ve dışarıdan etki eden, yapıyı oluşturan malzemenin ve kullanım biçiminden kaynaklanan veya doğal etkiler sonucu meydana gelen bu yükler, yapıyı oluşturan elemanlar tarafından karşılanarak güvenli bir biçimde temele iletilmeli ve

oradan da yapının oturduğu zemine dağıtılmalıdır. Bu çalışmada yapıya içerden ve dışarıdan etki edebilecek yükün oluşumuna göre bir sınıflandırma yapılmıştır.

2.4.1 Sütuna gelen yükler

Yapının taşıyıcı elemanlarından olan sütunlar çoğunlukla eksenel yükleri karşılarlar. Bunun yanında deprem, rüzgâr yükü gibi yatay yüklere karşı da dayanım gösterirler. Sütunlar yatay yüklerin etkisiyle eğilme momenti ve kesme kuvvetine maruz kalmaktadırlar. Ünay (2002) Şekil 2.6'da yatay ve düşey yükleri karşılayan sütunlar üzerinde, eksenel kuvvetin etkisiyle eksenel gerilme, eğilme momentinin etkisiyle de basınç ve çekme gerilmesinin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2.6. Sütunlarda eksenel kuvvet ve momentlerden dolayı oluşan gerilmeler.

Burkulma narin yapıda inşa edilen bir sütunda karşılaşılabilecek bir sorundur. Kesitleri aynı olan iki sütun arasında, fazla yük altındaki kısa olan sütuna göre daha az yüke maruz kalan uzun ve narin bir sütunda burkulma oluşma olasılığı daha fazladır. Sütun yapısının kare dikdörtgen kare vb. geometriye sahip olması ve sütunda kullanılan malzemenin çeşitli gerilmelerin oluşmasında etkindir.

2.4.2 Kemer eğrisine gelen yükler

Eğrisel geometriye sahip kemerlere gelen yükler, kemerler aracılığıyla sütunlara iletilirler. Kubbe, tonoz vb. yapı elemanlarında kullanımına rastlanan kemerler üzerine gelen yükleri taşıyarak sütunlara aktarma görevini üstlenen yapı elemanı olarak ifade edilebilmektedir. Kemerlerde kullanılan yığma birimlerin çekme kuvvetine karşı dayanımı düşük olduğundan kemerin ağırlığı artırılarak yatay yüklere

karşı stabilite sağlanması mümkündür. Tarihi yapılarda da kesit boyutları büyük olacak şekilde tasarlanan kemerlerle dayanımın sağlandığı görülmektedir. Birçok yapıda uygulanmasına rastlanılan kemerler, yapı üzerine etkiyen yüklerin ve kendi ağırlığından dolayı oluşan yükün etkisi altındadır. Kemerin inşasında kullanılan yığma birimin özellikleri kemerin kendi ağırlığını oluşturmaktadır.

Kemerin belirli noktalarında sabit yükler altında mafsallar oluşturması burkulma olarak ifade edilmektedir. Kemerin kalınlığının burkulmayı karşılayacak seviyede olması önemlidir. Yan yana düzenlenmiş kemerler burkulma dayanımı açısından önem arz etmektedir. Kemerde oluşacak yanal kuvvetler bitişiğindeki kemerin yanal kuvveti tarafından karşılanacak ve sütuna iletilecektir. Ancak kenar kemerin bitişiğinde bir kemer olmayacağı için gelen yanal yükü karşılayabilecek kalınlıkta duvar bulunmalıdır. Kemerlerde yükün etkisiyle şekil değiştirme ve eğilme meydana gelebilmektedir. Kemerlerde oluşan yükün etkisini azaltmak için oluşan gerilmelerin kemer en kesitiyle karşılanması amaçlanmaktadır. Bu sebeple basık kemerlerdeki kemer kalınlığının sivri kemerlere göre daha kalın tasarlanması gerekmektedir. En kesiti sivri kemere göre daha kalın olan basık kemerlerde gelen yükün mesnetlerde oluşturduğu etki daha fazladır. Kemerlerin mesnetler yönünde açılması dayanımı etkileyen en büyük etkenlerden bir diğeridir. Birçok tarihi kemerlerin inşasında ahşap veya gergi çubuğu kullanılarak dayanım sağlandığı görülmüştür. İki sütun arasında kullanıldığı gibi duvar ile biten yapılarda duvar sütun arasında da kullanılmıştır.

Yapılar incelendiğinde, kemer sütunun gelen yükün etkisiyle açılma yapmasını engellemek için kemere dışarıdan payanda, ağırlık kuleleri ile destek verildiği gibi Şekil 2.7'deki örneklere bakıldığında kemer açıklığına metalden ya da ahşaptan gergi çubuğu uygulamaları yapıldığı da görülmektedir.



a) Kurşunlu Han'da ahşap gergi uygulaması.



b) Mustafa Paşa Camii'nde metal gergi uygulaması.

Şekil 2.7. Gergi çubuğu uygulaması örnekleri.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Kemer numunelerde kullanılan taş ve harcın mekanik özelliklerini tayin etmek amacıyla yapılan deneyler, ilgili standartlara uygun olarak Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Mekaniği laboratuvarında yapılmıştır. Kemer Numunelerinde kullanılan tuf taşının özelliklerini belirlemek için basınç dayanımı ve üç noktada eğilme testleri yapılmıştır. Deney numunelerinin örülmesinde kullanılan harç için ise basınç testleri ile yarmada çekme testleri yapılmıştır.

3.1 Taşın Özellikleri

Yığma yapılar basınç kuvvetine karşı güçlü çekme kuvvetine karşı zayıf dayanım gösteren yapılardır. Bu yapıların inşasında da bu özelliklere uygun malzeme seçimi önemli rol oynamaktadır. Tarihi yapılar incelendiğinde de basınç dayanımı güçlü çekme dayanımı düşük olan taşların kullanıldığı görülmektedir. Taşın temininin kolay olması sebebiyle de basınca çalışan kemer, kubbe, tonoz gibi yapılarda yaygın olarak kullanılmıştır. Yığma yapıların inşasında kullanımına sık rastlanılan taşlar sağlam ve doğa koşullarına uygun bir malzemedir. Bunun yanında uygulanmasında fazla işçilik gerektiğinden çalışılması zor bir malzemedir.

Deneylerde, Aksaray ve çevre illerinde çoğunlukla yığma bina ve cami inşaatlarında uygulamasında rastlanılan ve Aksaray iline bağlı Sevinçli kasabasından çıkarılan volkanik kökenli bir taş cinsi olan Kızılkaya tuf taşı kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan tuf taşının fiziksel ve jeokimyasal analizleri Ankara Üniversitesi Başkent Meslek Yüksek Okulu Malzeme Araştırma ve Koruma Laboratuvarında yapılmıştır. Çizelge 3.1., Çizelge 3.2., ve Çizelge 3.3.'te taşın fiziksel ve jeokimyasal analiz sonuçları verilmektedir.

Çizelge 3.1. Taşa ait fiziksel deney verileri.

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

Çizelge 3.2. Taşa ait jeokimyasal analiz verileri-eser elementler.

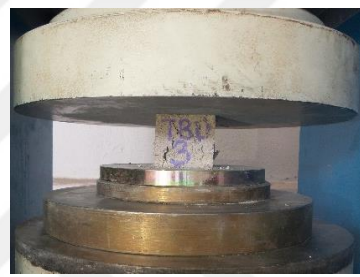
Element	Konsantrasyon Miktarı (ppm)	Element	Konsantrasyon Miktarı (ppm)
Co Kobalt	11	Sn Kalay	1,5
Ni Nikel	3,8	Sb Antimon	1,4
Cu Bakır	3,9	Te Tellür	1,3
Zn Çinko	14	I İyot	2,3
Ga Galyum	11,3	Cs Seryum	12
Ge Germanyum	1	Ba Baryum	656,7
As Arsenik	9,8	La Lantan	37,8
Se Selenyum	0,4	Ce Seryum	46,4
Br Brom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

Çizelge 3.3. Taşa ait jeokimyasal analiz verileri – temel elementler.

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

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

Deneylerde kullanılan tüf taşının basınç dayanımının belirlenmesi için TS EN 771-6’ya uygun olarak, 50 x 50 x 50 mm³ boyutlarında kesilen taşlar oda sıcaklığında kurutulmuştur. TS EN 772-1’ye göre 6 adet numune basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı testlerine tabi tutulan TBD (Taşın basınç dayanımı) olarak adlandırılan yığma birim numuneleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Yığma birimlerin basınç dayanım testleri.

Tüf taşının basınç dayanım test sonuçları aşağıdaki Çizelge 3.4'te topluca verilmektedir. TS EN 772-1'ye göre ulaşılan maksimum yükün, yük uygulanan alana bölünmesiyle numunelerin basınç dayanımları hesaplanmıştır. Yığma birimlerin basınç dayanımı, tek numune dayanımlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.4. Duvar deneylerinde kullanılan yığma birimlere ait basınç dayanımı sonuçları.

Numune No	Enkesit boyutları (mm)		Kırılma Yüğü (N)	Basınç Dayanımı (MPa)
	a	b		
TBD1	49	50	12200	4,93
TBD2	49	47	15900	6,90
TBD3	49	47	13600	5,90
TBD4	47	46	18100	8,37
TBD5	51	46	15500	6,60
TBD6	49	47	14500	6,30
			Ortalama	6,50
			Standart Sapma	1,142

TS EN 772-6'ya uygun olarak hazırlanan yaklaşık 40 x 40 x 160 mm³ (TEÇD1-6 numuneleri) ve 50 x 100 x 150 mm³ (TEÇDA-F numuneleri) boyutlarındaki toplam 12 adet numune taşın eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi maksadıyla test edilmiştir. Eğilmede çekme dayanımı testlerine tabi tutulan yığma birim numuneleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Yükleme hızı, sabit ve darbe tesiri olmadan kırılmanın 30-90 saniye arasında gerçekleşmesi amacıyla ayarlanmıştır. Taş numunelerin eğilmede çekme dayanımları denklem (3.1)'e göre hesaplanmıştır.

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

Burada; R_{tf} eğilmede çekme dayanımı (MPa), P prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N), b numune genişliği (mm), d numune yüksekliği (mm), L mesnet silindirlerinin eksenleri arasındaki mesafedir (mm).

Eğilmede çekme dayanımı (TEÇD) testlerine tabi tutulan yığma birim numuneleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te topluca verilmektedir.



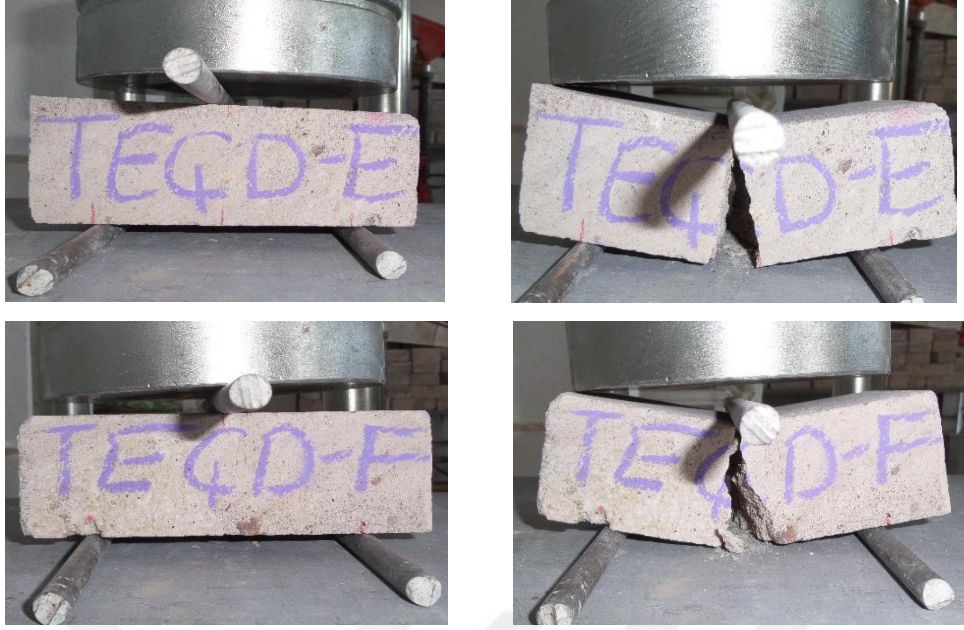
Şekil 3.2. Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanımı testleri (TEÇD-1/TEÇD-6 numuneleri).



Şekil 3.2 (devam).Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanımı testleri (TEÇD-1 /TEÇD-6 numuneleri).



Şekil 3.3. Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanımı testleri (TEÇD-A/TEÇD-F numuneleri).



Şekil 3.3 (devam). Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanımı testleri (TEÇD-A /TEÇD-F numuneleri).

Kemerlerde kullanılan taşın eğilmede çekme dayanımı sonuçları Çizelge 3.5'te verilmektedir. İki farklı boyutta yapılan testler sonucunda tuf taşlarının ortalama olarak eğilmede çekme dayanımı 0,635 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 3.5. Duvar deneylerinde kullanılan yığma birimlere ait eğilmede çekme deneyleri sonuçları.

Numune No	P (N)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	R_{tf} (MPa)
TEÇD 1	590	100	38	43	0,84
TEÇD 2	460	100	42	43	0,59
TEÇD 3	610	100	45	39	0,89
TEÇD 4	1010	100	37	45	1,34
TEÇD 5	340	100	48	41	0,42
TEÇD 6	320	100	40	37	0,58
Ortalama					0,78
TEÇD-A	660	100	99	49	0,28
TEÇD-B	760	100	99	45	0,38
TEÇD-C	930	100	100	53	0,33
TEÇD-D	1810	100	102	52	0,63
TEÇD-E	2430	100	101	53	0,86
TEÇD-F	1140	100	102	51	0,43
Ortalama					0,49

3.2 Harcın Özellikleri

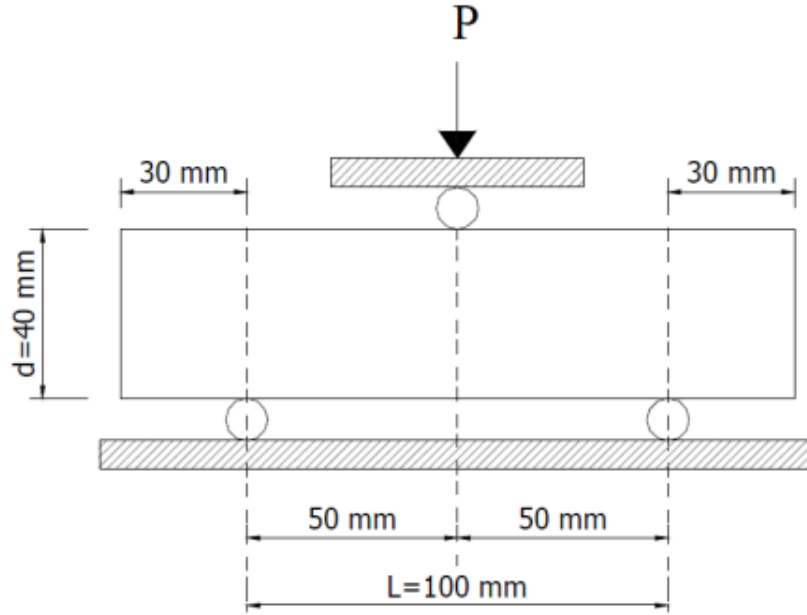
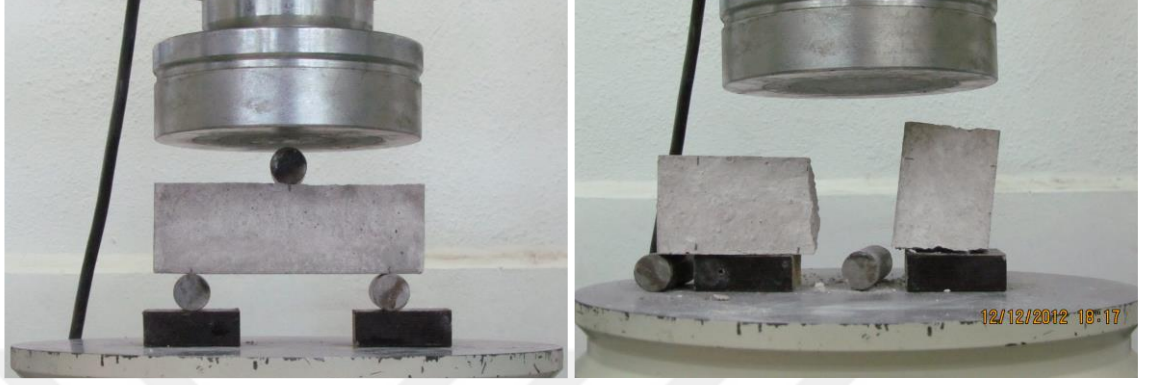
Yığma yapının inşasında kullanılan taş, tuğla gibi basınca çalışan malzemeleri bir arada tutarak birleşik bir yapı elemanının meydana gelmesinde harçtan faydalanılmaktadır. Çamur, yapı malzemesi olarak kerpiç ve tuğlanın tercih edildiği bölgelerde bağlayıcı olarak kullanılan ilk harç olarak ifade edilebilir. Harçlar kum ve suya ilave olarak kullanılan bağlayıcı malzemenin cinsine göre adlandırılırlar. Genellikle kireç kaymağı, sönmüş kireç, portland çimentosu bağlayıcı malzeme olarak tercih edilmektedir.

Harç çeşitlerine alçı harcı, kireç harcı, puzzolan harcı, çimento harcı, horasan harcı ve karışık harç (kireç- çimento karışımı) gibi örnekler gösterilebilir. İlk olarak Mısırlılar tarafından kullanıldığı tahmin edilen kireç, kum ve su karışımından oluşan kireç harcının Romalılar tarafından da kullanıldığı bilinmektedir. Yığma yapı inşasında taş ve tuğla duvarları kireç harcıyla birleştiren Romalılar, kubbe ve tonoz yapımında ise beton gibi dökülerek hazırlanan ‘puzzolan’ harcını bağlayıcı olarak tercih etmişlerdir. Volkanik kökenli bir kül olan puzzolana kireç ilave edilerek hazırlanan puzzolan harcının içerisine farklı boyutlarda kırılmış ya da öğütülmüş tuğla parçaları, tuğla tozu, odun kömürünün de eklenmesiyle uygulanacak yere göre harç çeşitleri ortaya çıkmıştır. Kireç ve kum karışımına öğütülmüş tuğla ve yumurta akı eklenerek hazırlanan, Horasan harcı olarak isimlendirilen harç örneğine Selçuklu ve Osmanlı dönemi yapılarında rastlanmaktadır.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan harç için dikkate alınan hacimsel oranlar; 4/11 ince kum, 4/11 kireç, 2/11 taş tozu, 1/11 albariadır. Albaria doğal hidrolik kireç esaslı, tarihi kâgir yapıların sıvanmasında kullanılan, doğal silis agrega ve inorganik lifler içeren, çimento içermeyen sıva malzemesidir. Tarihi yapılarda kullanılan horasan harcının mekanik özelliklerinin bu çalışmada kullanılan yukarıda karışım oranları verilen harç ile yakın olduğu görülmüştür.

Kemer numunelerindeki taşlar arasında aderansı sağlayacak olan harç malzemesi üzerinde eğilme ve basınç testleri yapılmıştır. 40x40x160 mm³ boyutlarındaki kalıplara yerleştirilen harç numunesi üzerinde, 28 günlük kür süresinin sonunda TS EN 1015-11’e uygun olarak eğilmede çekme testi gerçekleştirilmiştir. 28 günün sonunda dayanımını tamamlayan harç numuneleri kırılma gerçekleşene kadar üç

noktadan yüklemeye tabi tutulmuştur. Aralarında 100 mm genişlik bulunan iki silindir üzerine yerleştirilen harç numunesi üst yüzeyinin tam orta noktasına oturtulan başka bir silindir aracılığı ile 5 kg/sn hızla yüklenmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Eğilmede çekme dayanımı tayininde kullanılan deney düzeneği.

Numunelerin eğilmede çekme dayanımları TS EN 1015-11’de belirtildiği gibi denklem (3.2) yardımıyla hesaplanmaktadır.

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

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

TS EN 1015-11' e göre hazırlanan 6 adet harç numunesi 40 x 40 x 40 mm³ boyutlarındaki kalıplara dökülerek 28 gün boyunca kür uygulanmıştır. Basınç dayanımının tayini için uygulanan bu kür süresince harcın su ile teması engellenmiş, normal şartlar altında oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Harç numunesinde kırılma meydana gelinceye kadar 240 kg/sn sabit hızla yük uygulanmıştır. Numunelerin basınç dayanımları TS EN 1015-11'de göre ve denklem (3.3) yardımıyla hesaplanmıştır.

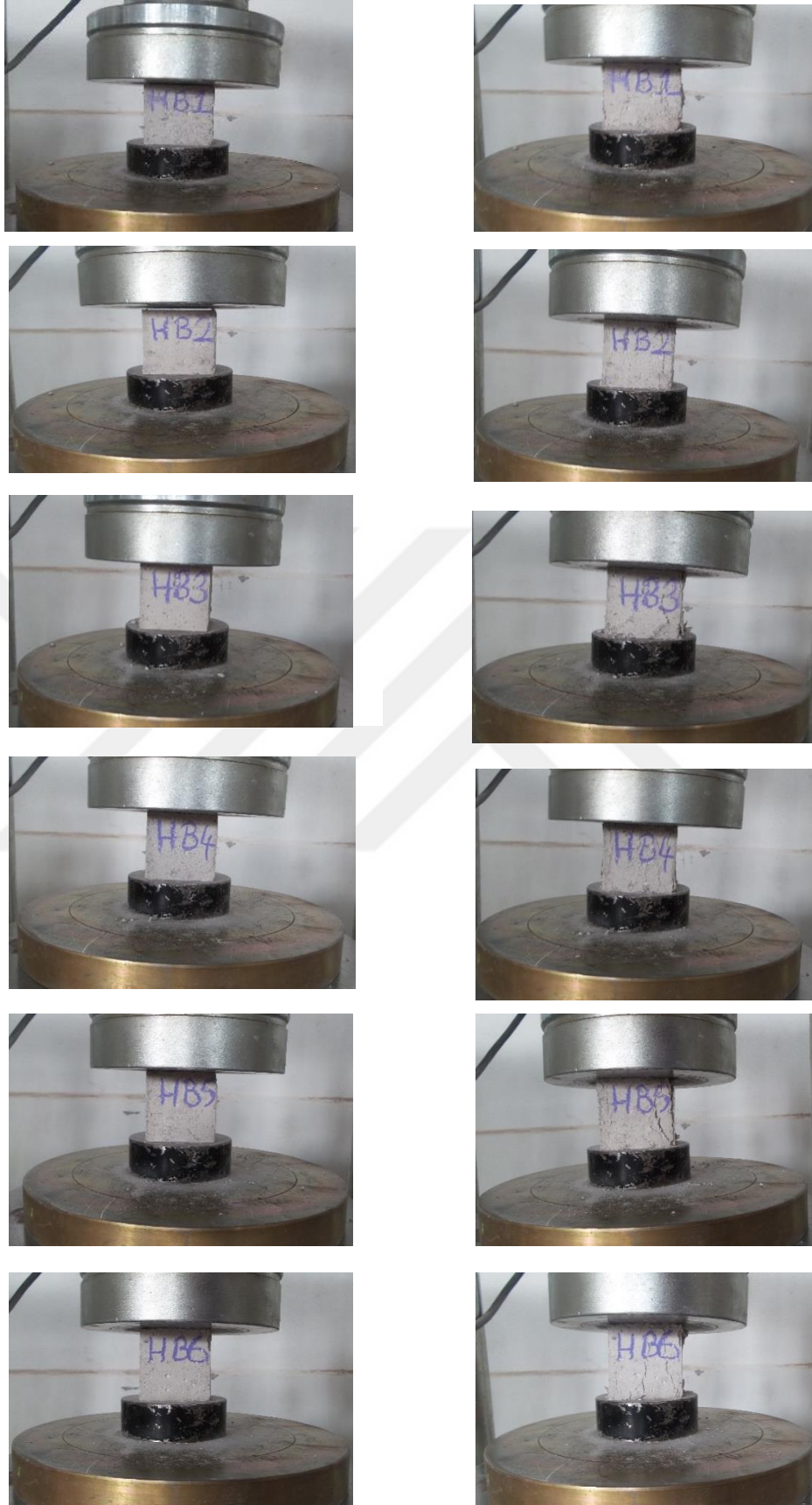
$$\sigma = \frac{P}{1600} \quad (3.3)$$

Burada; σ basınç dayanımını (MPa) temsil etmektedir. P ise uygulanan kuvveti (N) temsil etmektedir.

Eğilme (HEÇ) ve basınç (HB) deneylerine tabi tutulan harç numunelerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 3.6'da topluca verilmektedir. Basınç deneyine ait deney numuneleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Duvar deneylerde kullanılan harcın basınç ve eğilmede çekme deney sonuçları.

Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)	Numune No	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)
HB1	3,45	HEÇA	0,39
HB2	3,20	HEÇB	0,44
HB3	3,05	HEÇC	0,57
HB4	3,68	HEÇD	0,46
HB5	3,65	HEÇE	0,37
HB6	3,19	HEÇF	0,52
Ortalama	3,37		0,46



Şekil 3.5. Basınç dayanımı tayininde kullanılan deney düzeneği.

3.3 Gergi Çubuğunun Özellikleri

Deneylerde S235 (St-37) sınıfındaki malzemeden 3x10 mm² boyutlarında kesilen çelikten elde edilen gergi çubuğu kullanılmıştır. TS EN ISO 6892-1 (2011) (Metalik malzemeler-çekme deneyi) da belirtilen standartlara uygun olarak gergi çubuğu ile ilgili çekme testi gerçekleştirilmiş ve denklem (3.4) yardımıyla da hesaplamaları yapılmıştır.

$$R_m = F_m \quad (3.4)$$

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

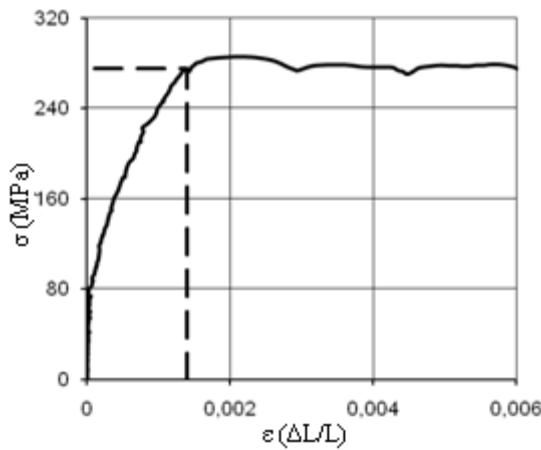
St-37 sınıfındaki malzemeden 2x10x250 mm³ boyutlarında kesilen çelikten elde edilen gergi çubuğu teste tabi tutulmuş elde edilen numerik sonuçlara göre de gerilme, şekil değiştirme grafiği çizilmiştir. Gergi çubuğu boyunca beş adet strain-gauge yerleştirilerek şekil değiştirme, kenarlara yerleştirilen iki adet LVDT ile de yer değiştirme ölçülmüştür. Elde edilen nümerik sonuçlarda şekil değiştirmeler milivolt (mV) olarak ölçülmüştür. Birim şekil değiştirmeyi ifade etmesi için ölçülen değerler kalibre edilerek birimi mm/mm'ye çevrilmiştir. Deney esnasında ölçülen boy uzama miktarı ilk boy uzunluğuna bölünerek birim uzama hesaplanmıştır. Çekme testlerinin yapıldığı deney düzeneği, gerilme-şekil değiştirme, şekil değiştirme kalibrasyon grafikleri ve LVDT'lerden elde edilen sonuçlara göre çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde deney numunesinin akma gerilmesi 275 MPa, buna karşılık gelen şekil değiştirme 0,00135 mm/mm ve elastisite modülü de 203704 MPa olarak ölçülmüştür. Gergi numunesi 0,013 şekil değiştirme değerine kadar uzamıştır ancak kopma şekil değiştirmesinden düşük bir değer olduğu için kopmamıştır.

Şekil değiştirmeleri ölçmek için 10 mm uzunluğunda, 120 ohm dirence sahip 5 adet strain-gauge deneye tabi tutulan gergi çubuğuna yapıştırılmıştır. Strain-gauge'lerden elde edilen sayısal verilerin ortalaması LVDT'lerden elde edilen birim şekil değiştirmeler ile karşılaştırılmıştır. Grafikten de okunduğu gibi, yaklaşık 5667 mV'a karşılık gelen 0,00156 birim uzama değerine kadar doğrusal davranış gözlenmektedir. Bazı strain-gaugeler'in yüzeyden ayrılması ve her köşesinde eşit

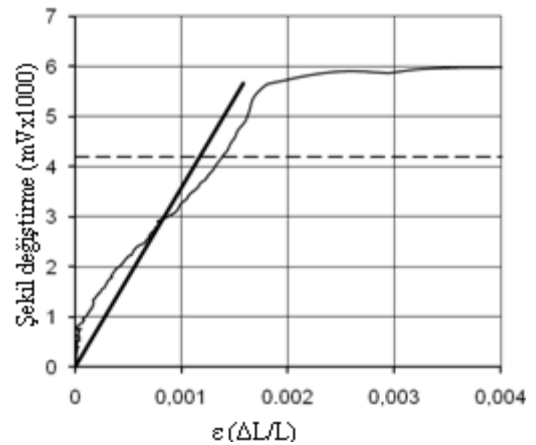
uzamaması sonucu farklılıklar oluşmuştur. Buna rağmen numunenin akma dayanımı ve doğrusal davranışın gözlendiği bölgede akmaya karşılık gelen şekil değiştirme Şekil 3.6’da açıkça görülmektedir. Çekme testi uygulanan numunenin akma değerleri strain-gauge’de 4200 mV, şekil değiştirmede ise 0,00135mm/mm olarak okunmuştur. Akma şekil değiştirmesinden daha küçük değerde olan şekil değiştirmeler için LVDT’ler ile strain-gauge’lerden elde edilen veriler arasında doğrusal bir ilişki kurulabilir. (doğru eğimi=3586708) Strain-gaugelerden alınan veriler 3586708 değerine bölünmüş ve birim şekil değiştirmeler mm/mm cinsinden hesaplanmıştır. Şekil 3.6’da deney düzeneği, şekil değiştirme ve şekil değiştirme kalibrasyon grafikleri gösterilmektedir.



(a) Gergi çubuğu için hazırlanan deney düzeneği



(b) Gerilme-şekil değiştirme grafiği



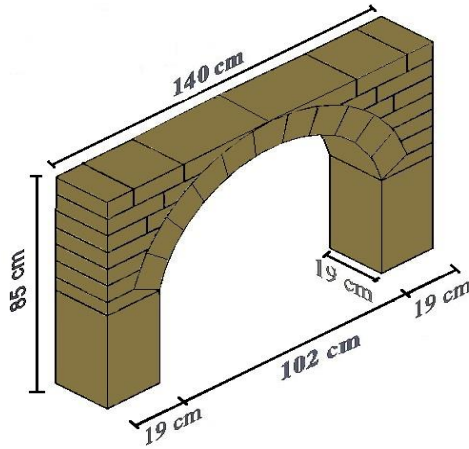
(c) Şekil değiştirme kalibrasyon grafiği

Şekil 3.6. (a) Gergi çubuğu için hazırlanan deney düzeneği, (b) Gerilme-Şekil değiştirme grafiği, (c) Şekil değiştirme kalibrasyon grafiği.

4. KEMER NUMUNE DENEYLERİ

4.1 Kemer Numunelerinin Hazırlanması

Deneyde kullanılacak kemer numunelerinin genel yapısı ve uygulama aşamaları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. 190 x 190 mm²’lik iki adet sütunun üzerine oturan kemerin açıklığı 1020 mm’dir. Kemerin yüksekliği ise 500 mm’dir. Sütunlardaki yatay ve düşey derz aralıkları 10 mm sütunların üstünde kalan yatay derz aralıkları 8 mm’dir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.1. Numunelerin yapım aşamaları, geometrik özellikleri, sütunlar, kemerler, kemerin üst kısmı.

Referans deney numunesinde herhangi bir gergi çubuğu uygulaması yapılmamıştır. Numune 1’de tarihi yapılarda sık rastlanan gergi çubuğu örneği tasarlanmıştır. Sütun en kesitinin ortasından açılan düşey delikten zıvana görevi görececek bir sonsuz dişli

geçirilmiştir. Gergi çubuğu sütuna yerleştirilen bu sonsuz dişliyi saracak şekilde sonsuz dişliye kaynaklanmıştır.

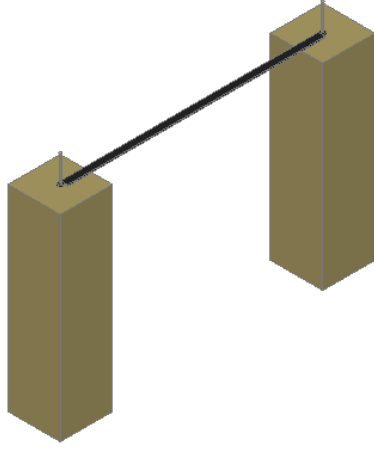
Numune 2’de ilk önce gergi çubuğu sonsuz dişliye kaynakla monte edilmiştir. Bu gergi sistemi sütun kemer birleşim bölgelerine matkapla açılan delikten geçirilmiş gerginin uç kısmı sütun dış yüzeyinden çıkarılmıştır. Gergi sisteminin dışarıda kalan sonsuz dişli bölümü bir plakanın üzerinden somon yardımıyla sıkıştırılarak gergi çubuğu sistemi sabitlenmiştir.

Numune 3’te gergi çubuğu sütunu çepeçevre saracak şekilde bilezik formunda bükülen $10 \times 3 \text{ mm}^2$ kesitindeki levhaya sütun iç yüzey kenarına denk gelen bilezik kenarının ortasından kaynaklanmıştır. Restorasyon çalışmalarında uygulandığı görülen bu sistem uygulama kolaylığı açısından tercih edilmektedir. Gergi çubuğu sistemi, taşa göre zayıf olan derz boşluğunun ezilmesi ihtimali göz önüne alınarak derz altından uygulanmıştır.

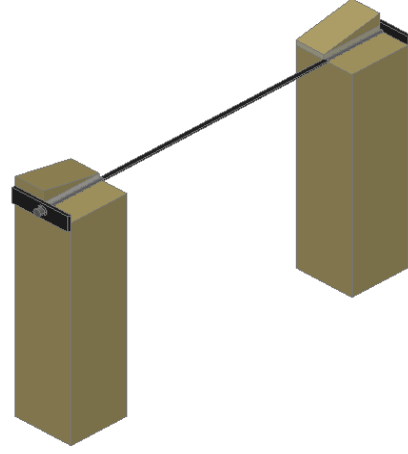
Numune 3’te yapılan uygulamanın revize edilmesiyle elde edilen Numune 4’te gergi çubuğu sütunu çepeçevre saracak şekilde bükülmüş, derzin üzerine gelecek şekilde sabitlenmiştir. Derzin zarar görmemesi için de $190 \times 50 \text{ mm}^2$ genişliğindeki plaka gergi çubuğu ile sütun dış yüzeyi arasından geçirilerek sabitlenmiştir.

Numune 5’te gergi çubuğu, sütunu kare biçimde saran bileziğe eşkenar üçgen şekilde kaynaklanmıştır. Bu uygulamayla yükün gergi çubuğuna iletiminin artırılması amaçlanmıştır.

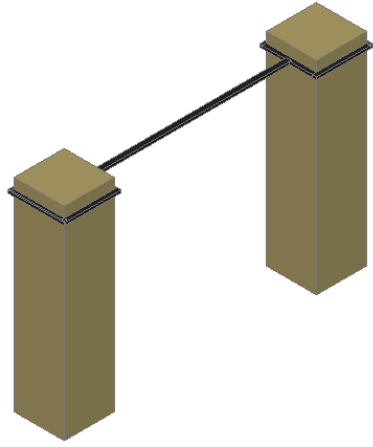
Numune 6’da sütun kemer birleşim bölgesinden gergi çubuğunun geçeceği şekilde delik açılmış, gergi çubuğu epoksi ile buraya sabitlenmiştir. Tarihi yapılarda sütun en kesitinin orta noktasında zıvana görevi görecek metal bağlantı elemanının kullanıldığı görülmektedir. Güçlendirme çalışmalarında ise bu metal bağlantı elemanının uygulanması oldukça güçtür. Numune 6’da, zıvana görevi görerek kemer ile gergi çubuğu arasındaki bağlantıyı sağlaması amacıyla epoksi reçinesinden faydalanılmıştır. Bu sebeple gergi çubuğu kemer sütun birleşim bölgesinden matkapla açılan deliğe yerleştirilmiş ve epoksi reçinesi yardımıyla sabitlenmiştir. Tüm Numunelere ait temsili çizimler Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



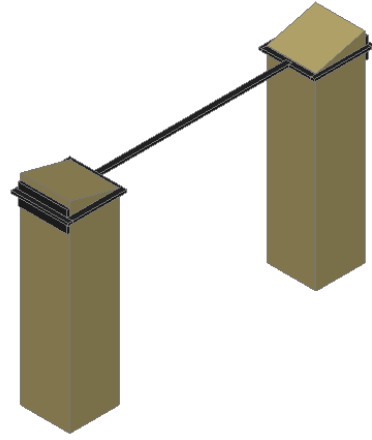
(a) Numune 1



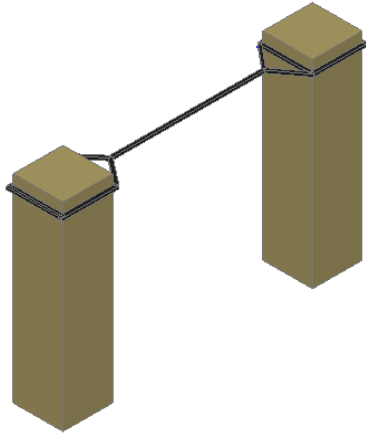
(b) Numune 2



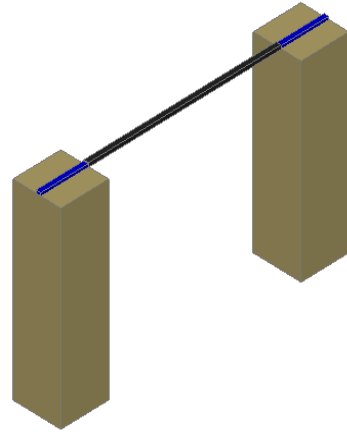
(c) Numune 3



(d) Numune 4



(e) Numune 5



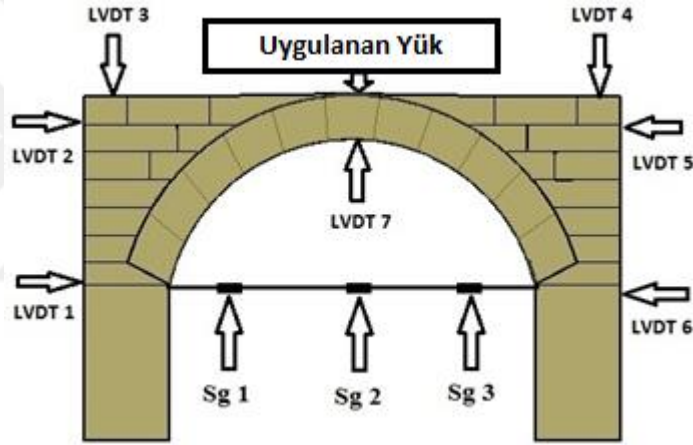
(f) Numune 6

Şekil 4.2. Kemer Numunelerinde kullanılan gergi çubuğu sistemlerine ait temsili çizimler.

Tarihi yapılarda mevcut bulunan gergi sistemleri genellikle Numune 2’de modellendiği gibidir. Numune 3’teki sistem ise günümüzde yapılan bazı restorasyon çalışmalarında karşılaşılan bir uygulama olması nedeniyle denenmiştir. Bu sistemde kare kesitli olan sütun gergi çubuğu kalınlığında bir demir ile çepeçevre sarılmaktadır. Gergi çubuğu da sütunu saran demirin orta noktasından kaynaklanmıştır.

4.1.1 Yer değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi

Deneye tabi tutulan kemer numuneleri üzerindeki uzama ve kısalmaları ölçmek için 7 adet (LVDT) yer değiştirme ölçer kullanılmış ve yatay ve düşey yöndeki yer değiştirme okumaları sonucu elde edilen değerler kaydedilmiştir. LVDT’lerin kemer numunesi üzerindeki yerleşimi Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Deney numunelerine LVDT’lerin yerleştirilmesi.

4.1.2 Şekil değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi

Kemerlerdeki şekil değiştirmeleri ölçmek için şekil değiştirme ölçerler (strain-gaugeler) sıkça kullanılır. Birbirine paralel bağlantılı ince tellerden oluşan Strain-gaugeler elastik bir taşıyıcı üzerine yerleştirilmiştir. Şekil değiştirmesi ölçülecek kemer numunesinin yüzeyine yapıştırılan strain-gaugeler uygulanan yüklerle birlikte uzayıp kısılacaktır. Deney düzeneğinde kullanılan strain-gaugelerin yerleşimi Şekil 4.4’te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Deney numunelerine strain-gaugelerin yerleştirilmesi.

Şekil 4.5 ve Çizelge 4.1’de strain -gaugelerin ve LVDT’lerin veri toplama ünitesine bağlandıkları yerler gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Deney düzeneğindeki yük hücresinin, strain-gaugelerin ve LVDT’lerin veri toplama ünitesine bağlanması.

Çizelge 4.1. Deney düzeneğinde kullanılan yük hücresinin, strain-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		
LVDT4	1215		
LVDT5	1226		
LVDT6	1228		
LVDT7	1213		

4.2 Referans Numune

Gergi çubuğu sistemlerinin taş kemerler üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada ilk olarak referans numune imal edilmiştir. Referans numunede herhangi bir gergi çubuğu uygulaması yapılmamış numunenin kendi dayanımının tayin edilmesi amaçlanmıştır. Eğrisel yapıda kemer numunesi elde edebilmek için yarım daire şeklinde tasarlanan ve Şekil 4.6’da gösterilen kemer kalıbından faydalanılarak kemer numunesi örülmüştür. Şekil 4.7 ‘de kemerin örülme aşaması gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Kemer örümünde kullanılan kemer kalıbı.



Şekil 4.7. Kemer örümü.

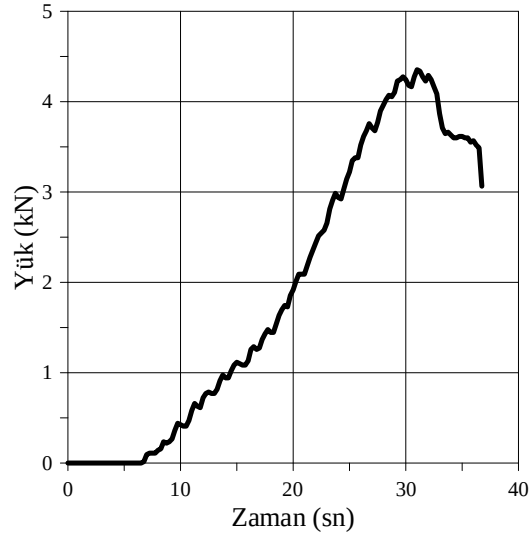
Deneyler, kemerin orta noktasındaki kilit taşı hizasından uygulanan düşey yük altında gerçekleştirilmiştir. Sütunlar epoksi yardımıyla deney sistemine kaynatılan demir plakalara yapıştırılarak ankastre mesnet elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede sütunların zeminle temas eden kısımlarındaki yer değiştirme ve dönme sınırlanmıştır. Şekil 4.8’de referans numunenin deney düzeneğindeki görünümü gösterilmiştir. Referans olarak üretilen deney numunesinde ilk çatlaklar arka arkaya

kilit taşının sağındaki derzde ve kemerin sağ üst tarafındaki taşların derz aralarında 2 kN'luk yükte oluşmuştur (Şekil 4.8). Gergi demiri uygulaması olmadığından dolayı maksimum yük taşıma kapasitesi 4,35 kN'da kalan kemer numunesinde sağ üzengi taşı ile sütun arasındaki derzde ayrılma görülmüştür. Göçme yükündeki düşey yer değiştirme 2,73 mm iken yatay yer değiştirme 3,93 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.8'e kontrol deney elemanının göçme sonucundaki hali gösterilmiştir.

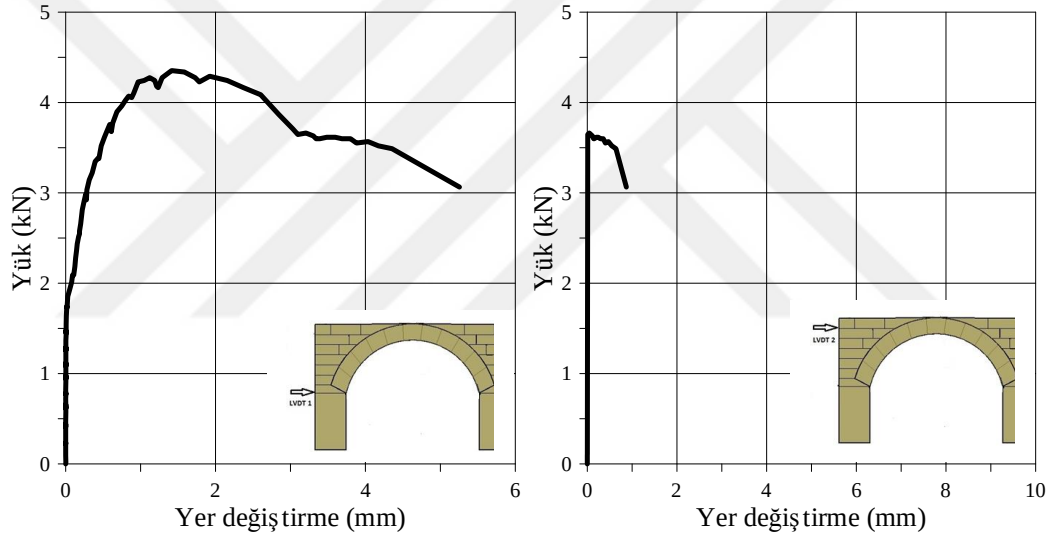


Şekil 4.8. Referans numunenin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.

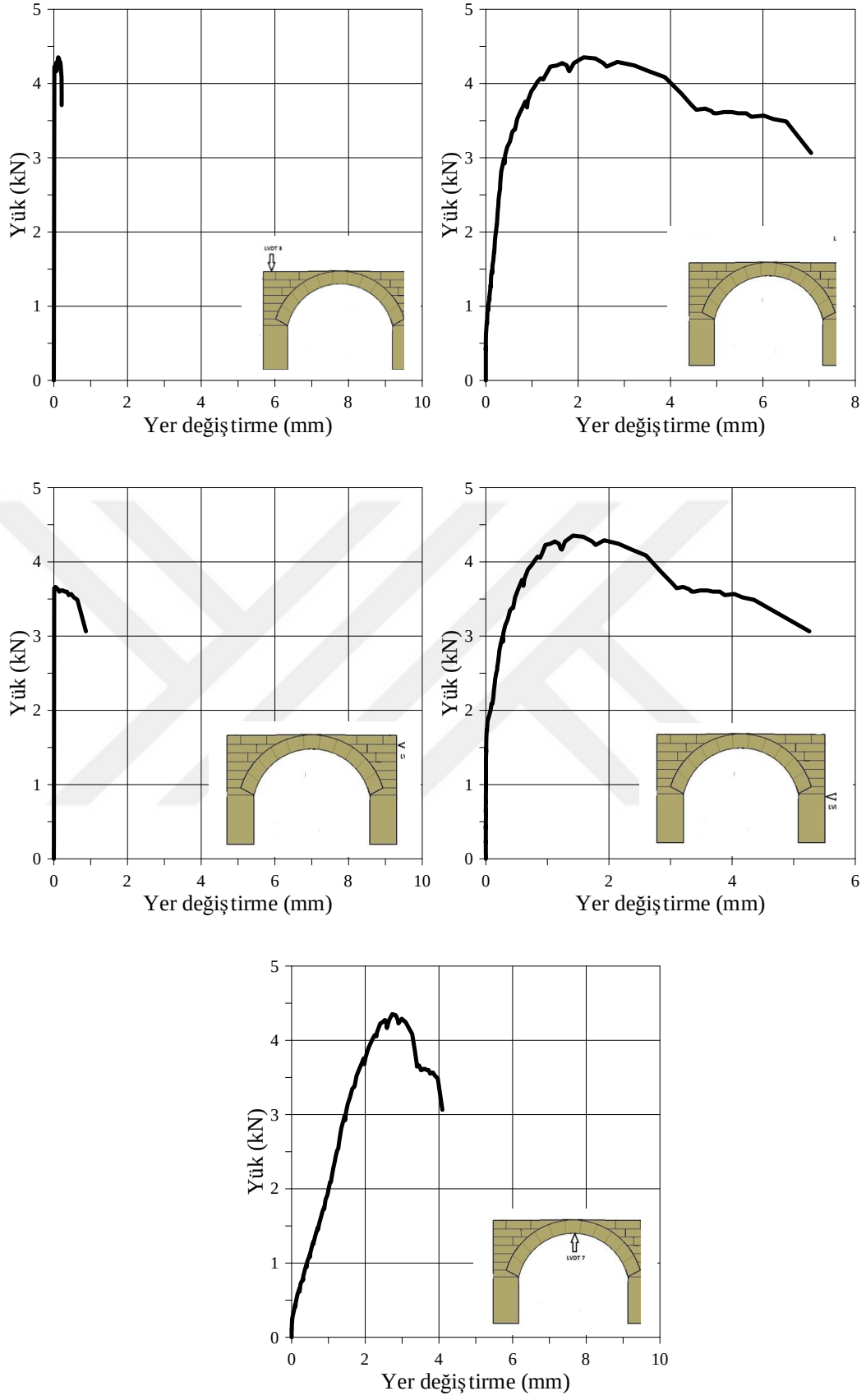
Referans numuneye ait Yük-zaman grafiği Şekil 4.9'da, LVDT'lerden elde edilen yer değiştirme sonuçları da Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Referans Numune Yük- Zaman grafiği.



Şekil 4.10. Referans numuneye ait yük- yer değiştirme grafiği.



şekil 4.10 (devam). Referans numuneye ait yük- yer değiştirme grafiği.

Kemer numunesinde meydana gelen yer değiştirmeleri ölçmek için yerleştirilen 7 adet LVDT'den en fazla yer değiştirme 9,68 mm ile LVDT 6'da, en az yer değiştirme ise LVDT 2'de okunmuştur. Referans numunede oluşan en büyük çatlaklar LVDT 6'nın bulunduğu yerde sütun tabanında meydana gelmiştir.

4.3 Numune 1

Tarihi yapılardaki gergi çubuğu sistemlerinden en çok tercih edilen tasarım Numune 1'de uygulanmıştır. Gergi çubuğu, sütun en kesitinin orta noktasından açılan düşey deliğe yerleştirilen sonsuz dişlinin etrafını saracak şekilde yerleştirilmiş ve kaynakla sabitlenmiştir. Bu gergi çubuğu örneğinin mevcut yapılardaki kemer-sütun birleşim bölgesine zarar verilmeden uygulanmasının zor olduğu açıktır. Referans numuneden sonra Numune 1'in de diğer numunelerin davranışını belirlemek adına referans alınabileceği söylenebilir.

şekil 4.11' de Gergi çubuğunun görünümü ve gergi çubuğunun kemere yerleştirilmiş hali gösterilmiştir. şekil 4.12'de ise bu tip gergi çubuğu kullanılarak tasarlanmış kemerlere örnek olarak 1492 yılında Üşküp de inşa edilen Mustafa Paşa Camii, Nuru Osmaniye Camii, Firuz Ağa camii, Topkapı Sarayı gösterilmektedir. Numune 1'de temsil edilen gergi çubuğu uygulaması tarihi yapılarda sıkça kullanılan uygulama olarak ifade edilebilir.



şekil 4.11. Numunede kullanılan gergi çubuğu.



a) Nuru Osmaniye Camii



b) Mustafa Paşa Camii



c) Firuz Ağa Camii

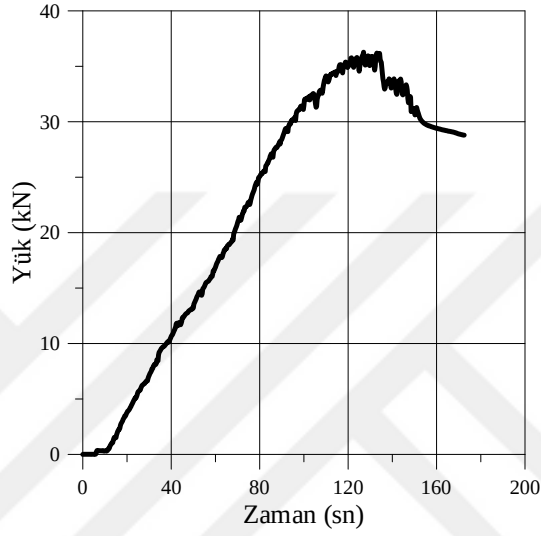


d) Topkapı Sarayı

Şekil 4.12. Numune 1'e örnek tarihi yapılarıdaki gergi çubukları.

Numune 1'e ait Yük-zaman grafiği Şekil 4.13'te gösterilmektedir. 36,27 kN'luk yük ile düşey kuvvet altında en fazla yük taşıyan deney numunesi tarihi yapılarda

hâlihazırda mevcut olan sisteme en yakın olan Numune 1 olmuştur. Deney numunesinde ilk çatlaklar 40. saniyede 10,46 kN'luk yük altında kilit taşıma bulunduğu derzde meydana gelmiştir. 84. saniyede 27 kN'luk taşıma yüküne ulaşan kemer numunesinde çatlaklar gözle görülür hale gelmiştir. İlk etapta kemer tarafından karşılanan yük daha sonra gergi çubuğuna da aktarılmıştır. Maksimum yük altında Numune 1'de meydana gelen düşey yer değiştirme miktarı 13,49 mm iken yatay yer değiştirme 17,31 mm olarak ölçülmüştür.

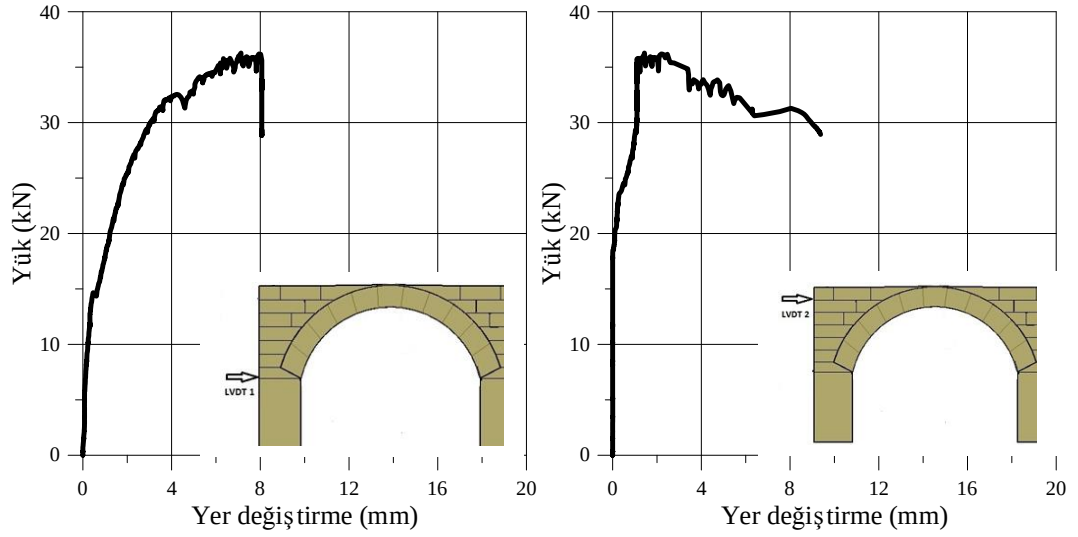


Şekil 4.13. Numune-1 Yük- Zaman grafiği.

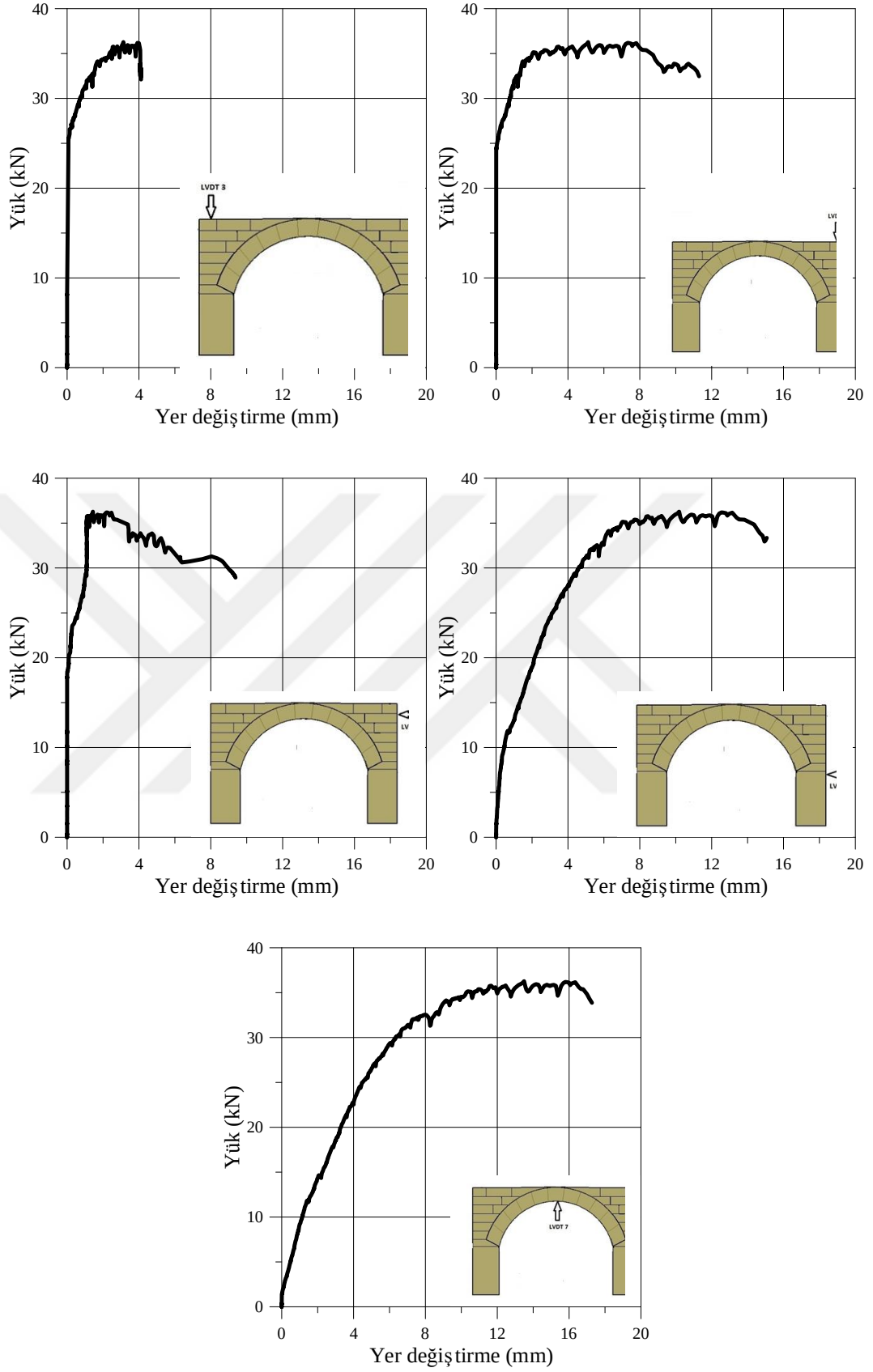
Maksimum yük altındayken 127. saniyede kemerin orta noktasında bulunan 7 numaralı LVDT'de 13,49 mm'lik düşey yer değiştirme meydana gelirken gergi çubuğundaki şekil değiştirme 0,0009 mm/mm olarak ölçülmüştür. Gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçmek için kemer numunesine yerleştirilen LVDT'ler ve strain-gaugeler'in deney düzeneğindeki görünümü ve göçme sonrasında kemer numunesinin son hali Şekil 4.14'de, deney sonrasında elde edilen yük (kN) -yer değiştirme (mm) grafiği ise Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.14. Numune 1 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.



Şekil 4.15. Numune 1'e ait yük- yer değiştirme grafiği.



şekil 4.15 (devam). Numune 1'e ait yük- yer değiştirme grafiği.

Numune 1 tarihi yapılarda mevcut olan gergi çubuklarına en yakın deney numunesi örneğidir. Kemerin sütunla birleşim bölgesine bu şekilde bir uygulamanın yapının bütününe zarar vermeden gerçekleştirilmesi mümkün gözükmemektedir. Bu sebepten dolayı güçlendirme çalışmalarında uygulanabilirliğinin zor olacağı görünen bir gerçektir. Aslına en uygun deney numunesi olması sebebiyle de ikinci referans numunesi olarak dikkate alınabilir.

4.4 Numune 2

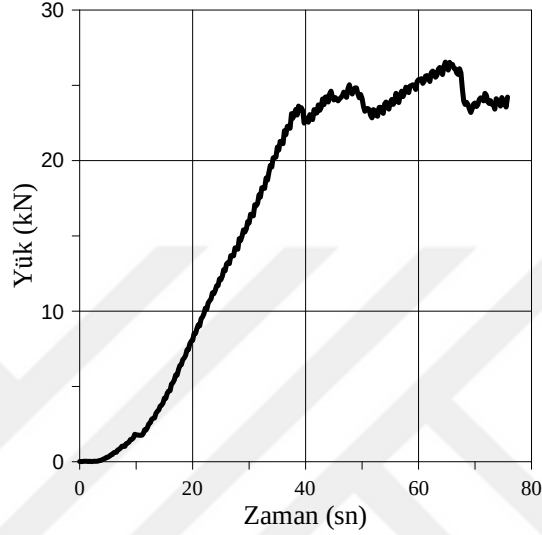
Numune 2’de iki ucu sonsuz dişliye kaynaklanmış olan gergi çubuğu matkap yardımıyla sütun ile derz arasında açılan delikten geçirilerek dışarı çıkarılmıştır. Dışarıda kalan uç kısımları 190x50 mm² boyutunda imal edilen plakalara somon yardımıyla sabitlenmiştir. Numune 2’de uygulanan gergi çubuğu sistemine örnek Şekil 4.16’da gösterilmiştir. 1821 yılında aynı yerdeki başka bir kilisenin üzerine inşa edilen Aziz Nikolaos kilisesi, Noel baba adına Gelebeç’li Rum’lar tarafından yapılmıştır. Doğu batı yönünde dikdörtgen plana sahip kilisenin dıştan dışa ölçüleri 25,90×12,85 metredir.



Şekil 4.16. Gelebeç Aziz Nikolaos Kilisesi.

Kemerin orta noktasındaki kilit taşı hizasından uygulanan düşey yük altında kemer numunesinde oluşan ilk çatlaklar 9,82 kN’da iken yükün uygulandığı taşın derzinde oluşmuştur. Yükün 19,56 kN ulaşmasıyla numunenin sağındaki kemer taşının sağ derzinde çatlaklar meydana gelmiştir. 24,12 kN’luk yük altındayken ise numunenin sol tarafındaki kemer sırtı boyunca uzanan derzde çatlaklar görülmüştür. Kemer numunesi göçme yüküne ulaştığında zamanla oluşan çatlaklar belirgin hale gelmiş ve numunenin solundaki kemer taşı kırılmıştır.

Şekil 4.17’de gösterildiği gibi Numune 2’nin maksimum yük taşıma kapasitesi 26,54 kN iken yapmış olduğu yatay yer değiştirme 5,66 mm düşey yer değiştirme miktarı ise yaklaşık olarak 9,08 mm’dir. Maksimum yük altındayken 64,75. saniyede kemerin orta noktasında bulunan 7 numaralı LVDT’de 9,08 mm’lik düşey yer değiştirme meydana gelirken gergi çubuğundaki şekil değiştirme 0,00088 mm/mm olarak ölçülmüştür.

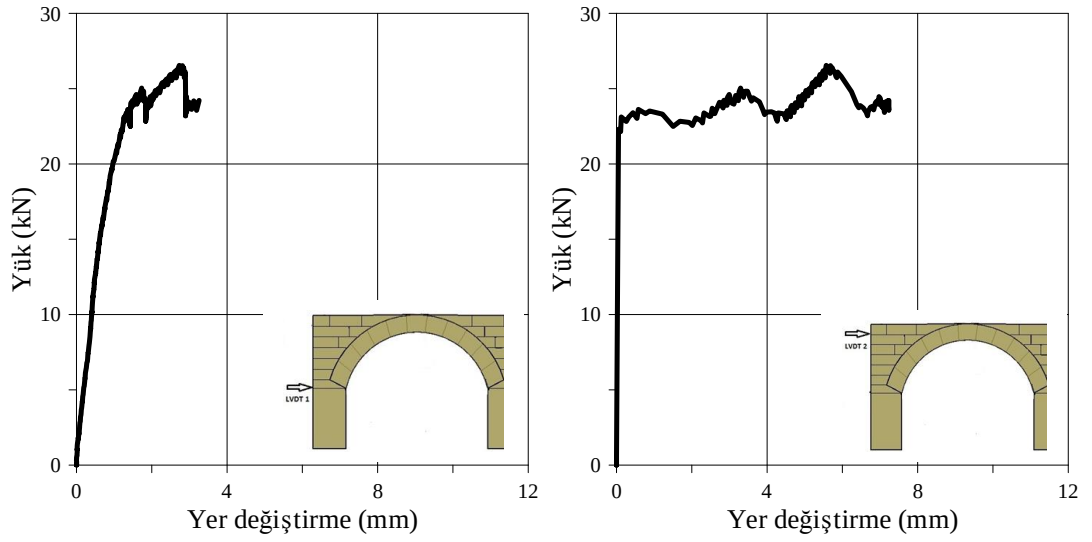


Şekil 4.17. Numune 2 Yük- Zaman grafiği.

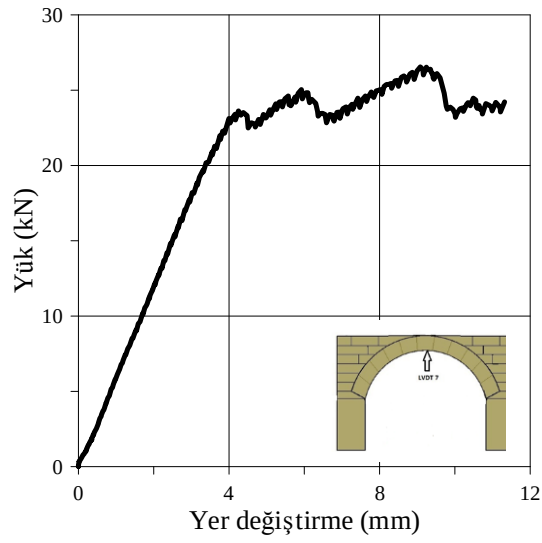
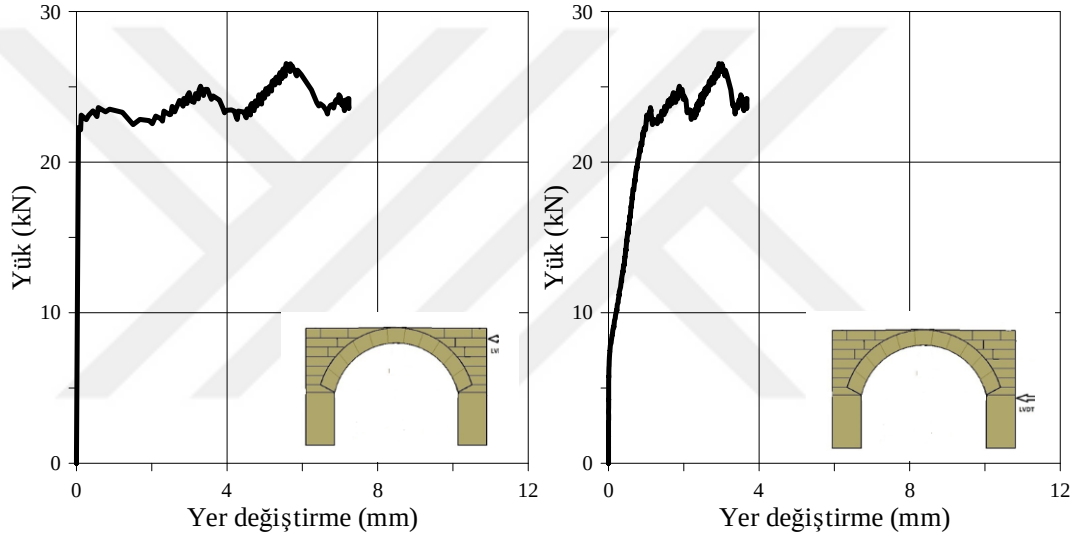
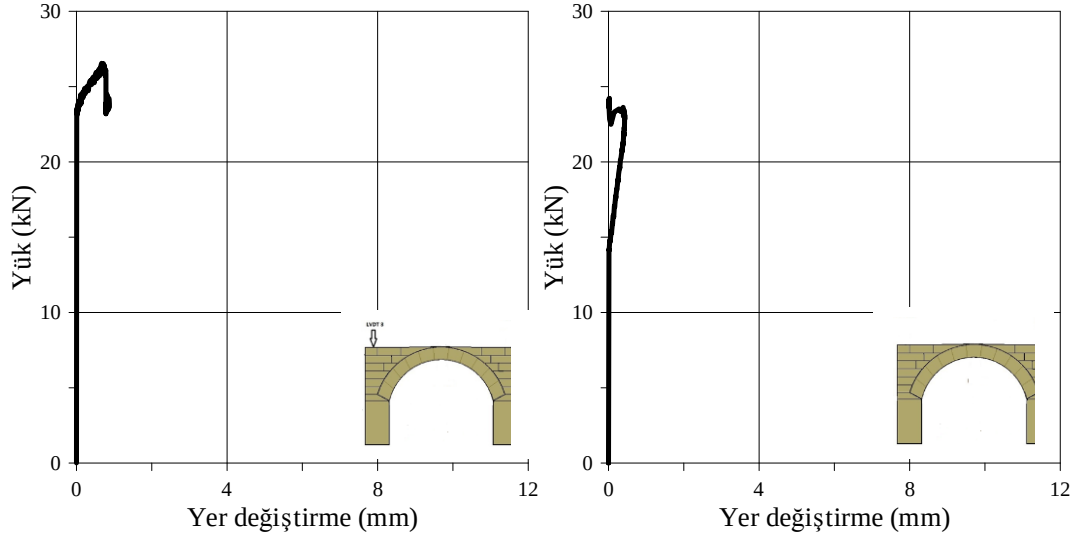
Gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçmek için kemer numunesine yerleştirilen LVDT’ler ve strain-gaugeler’in deney düzeneğindeki görünümü ve göçme sonrasında kemer numunesinin son hali Şekil 4.18’de, deney sonrasında elde edilen yük- yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.18. Numune 2 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.



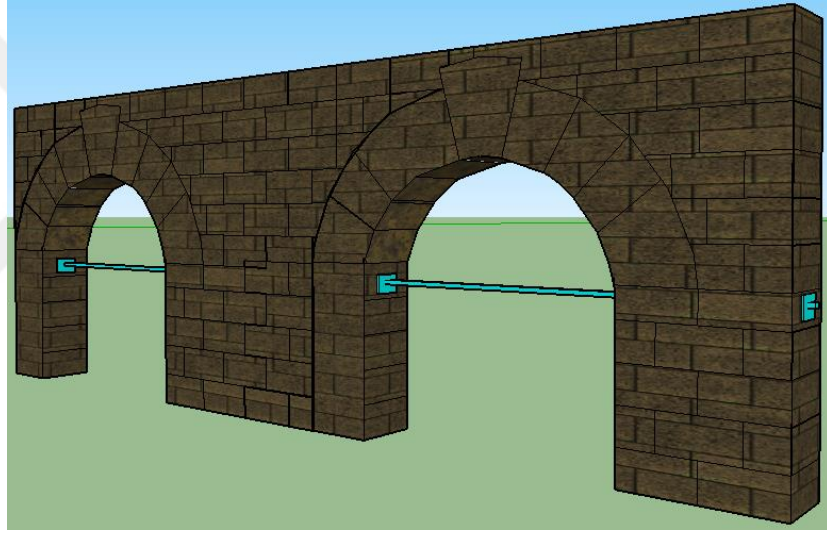
Şekil 4.19. Numune 2'ye ait yük- yer değiştirme grafiği.



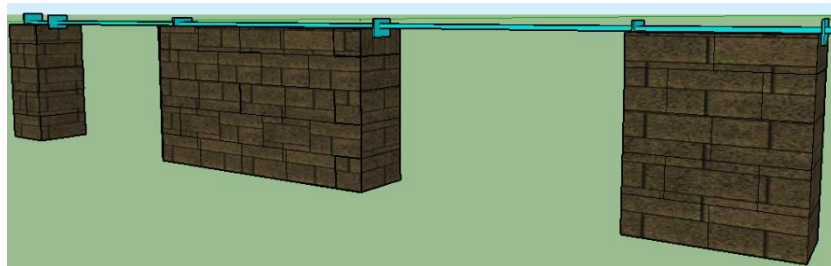
Şekil 4.19 (devam). Numune 2'ye ait yük- yer değiştirme grafiği.

Numune 2’de LVDT’lerden elde edilen en büyük yer değiştirme değeri 12,07 mm ile LVDT 7’de ölçölürken, en az yer değiştirme LVDT 2’de ölçölümüştür.

Numune 2’nin uygulanma biçimi göz önüne alındığında sadece kenar ve köşe sütunlarda kolaylık sağlayacağı düşünölse de kemerin iç sütunları içinde kullanılabilirliği mümkündür. Sütun kemer birleşim bölgelerine matkapla açılan deliğe iki adet gergi çubuğu geçirilerek elde edilecek sistemle problem giderilebilir. Numune 2’nin kemer sistemindeki görünümü ve kemerin iç sütunları için tarif edilen uygulama şekil 4.20’deki gibi yapılabilir. Kemer sütun birleşim yerlerine zarar vermeden uygulanacak bu sistemde, kemer üzengi taşı ile sütunun birleşim bölgelerinden açılan tek bir delikten geçirilen iki gerginin kemer dışından rijit levhalarla sabitlenerek uygulanabilirliği gösterilmiştir.



(a)



(b)

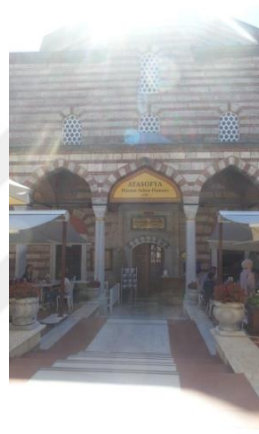
şekil 4.20. (a) Numune 2 için yapılabilir uygulama örneğindeki gerginin gösterimi, (b) Numune 2 için yapılabilir uygulama örneğindeki sütunlar için gergi uygulamasını gösterimi.

4.5 Numune 3

Numune 3'te gergi çubuğu sütunu çepeçevre saracak şekilde bilezik formunda bükülen 10x3 mm² kesitindeki levhaya sütun iç yüzey kenarına denk gelen bilezik kenarının ortasından kaynaklanmıştır. Restorasyon çalışmalarında uygulandığı görülen bu sistem uygulama kolaylığı açısından tercih edilmektedir. Gergi çubuğu sistemi, taşa göre zayıf olan derz boşluğunun ezilmesi ihtimali göz önüne alınarak derz altından uygulanmıştır. Şekil 4.21'de bu tip gergi çubuğu kullanılarak tasarlanmış kemerlere örnek olarak Sultanahmet camii, Hürrem Sultan hamamı, Topkapı sarayı örnek gösterilebilir.



a) Sultanahmet Camii



b) Ayasofya Hürrem Sultan Hamamı

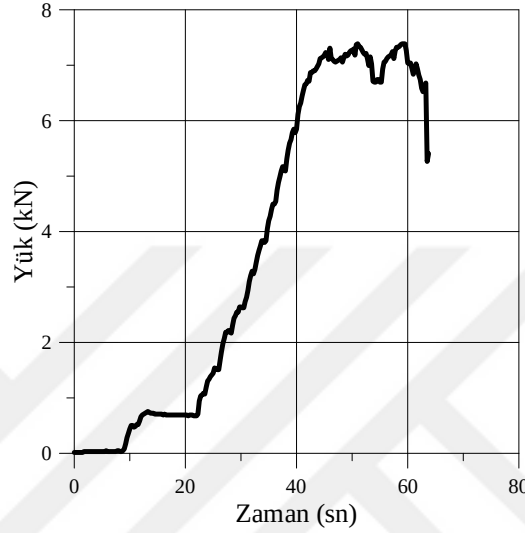


c) Topkapı Sarayı

Şekil 4.21. Numune-3'e örnek tarihi yapılardaki gergi çubukları.

Numune 3, sütunu çepeçevre saracak şekilde tasarlanan, restorasyon çalışmalarında sık uygulanan gergi çubuğu sistemi örneğidir. Kemer numunesinde ilk çatlaklar 20.

saniyede 0,69 kN'luk yükte kilit taşının sağındaki derzde meydana gelmiştir. 40. saniyede 5,84 kN'luk yüke ulaşan kemer numunesinin sağ tarafında üzengi taşı ile sütunun arasındaki derzde ayrılma meydana gelmiştir. Bu ayrılmadan sonra gergi çubuğu sistemi işlevini yitirmiş olup kemer sağa doğru kaymaya başlamıştır. Şekil 4.22'de görüldüğü gibi maksimum yük taşıma kapasitesi 7,38 kN iken yaptığı düşey yer değiştirme değeri 3,58 mm yatay yer değiştirme değeri de 4,59 mm'dir.

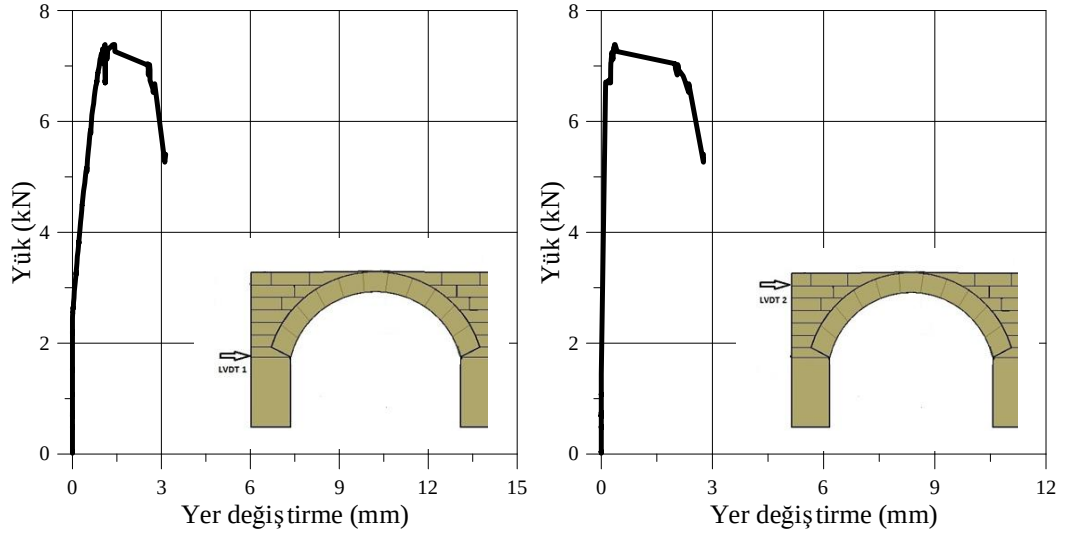


Şekil 4.22. Numune 3 Yük- Zaman grafiği.

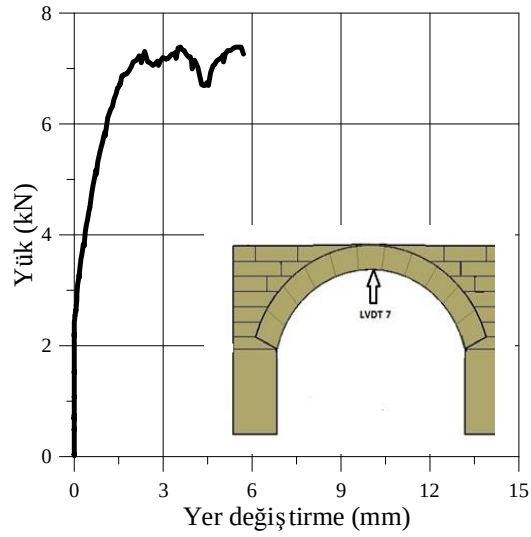
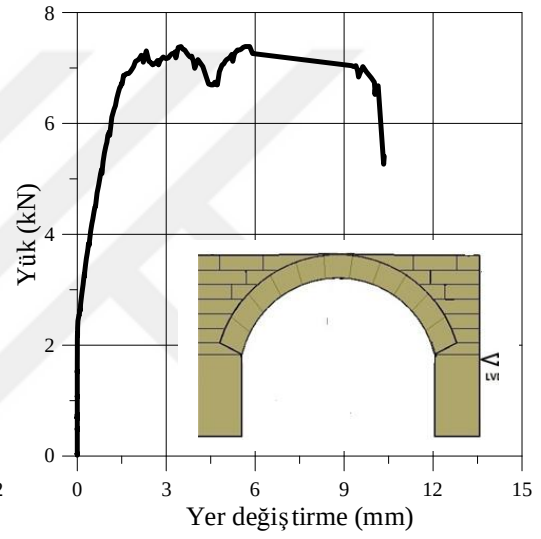
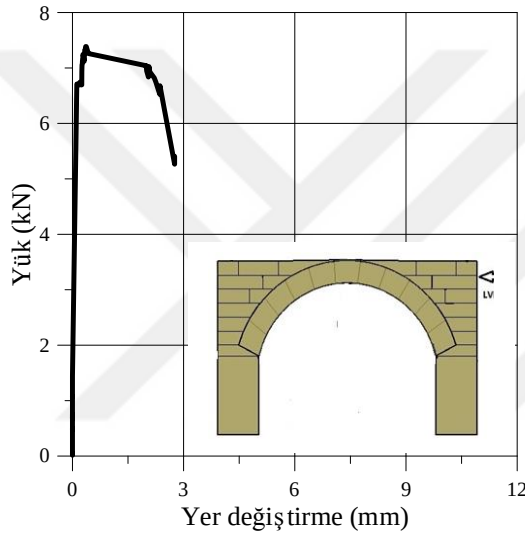
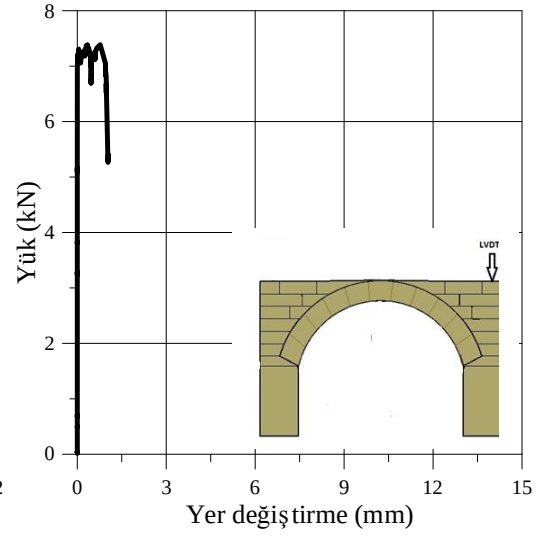
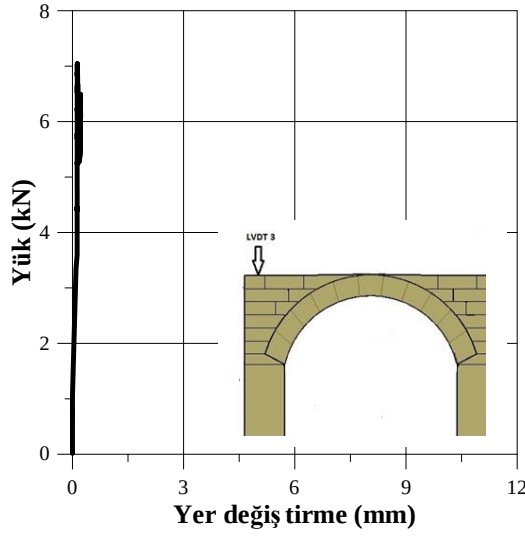
Maksimum yük altındayken 59. saniyede kemerin orta noktasında bulunan 7 numaralı LVDT'de 5,45 mm'lik düşey yer değiştirme meydana gelirken gergi çubuğundaki şekil değiştirme 0,0000112 mm/mm olarak ölçülmüştür. Numune 3'te en fazla yer değiştirme LVDT 6 ve LVDT 7'den ölçülmüştür. Gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçmek için kemer numunesine yerleştirilen LVDT'ler ve strain-gaugeler'in deney düzeneğindeki görünümü ve göçme sonrasında kemer numunesinin son hali Şekil 4.23'te, deney sonrasında elde edilen yük- yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.24'de verilmiştir.



Şekil 4.23. Numune 3 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.



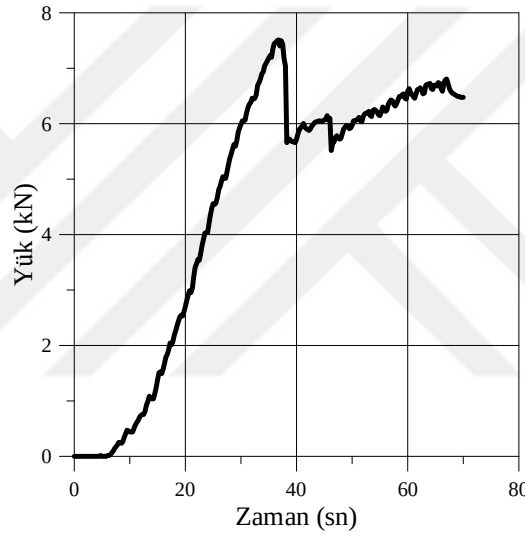
Şekil 4.24. Numune 3'e ait yük- yer değiştirme grafiği.



Şekil 4.24 (devam). Numune 3'e ait yük- yer değişirme grafiği.

4.6 Numune 4

Numune 4'te gergi çubuğu sistemi, Numune 3'ten farklı olarak derz altından değil derz üzerinden uygulanmıştır. Derzin ezilmemesi için gergi çubuğu sistemi plaka yardımıyla desteklenmiştir. Kemer numunesinde ilk çatlaklar kilit taşının sağındaki derzde oluşmuştur. Kemer numunesinin sağ tarafında üzengi taşı ile sütunun arasındaki derzde de ezilme meydana gelmiştir. Maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşan numunenin sağ mesnetinin iç bölgesinde çekme gerilmelerinden dolayı çekme çatlağı meydana gelmiştir. Şekil 4.25'de görüldüğü gibi 7,51 kN'luk göçme yüküne karşılık gelen düşey yer değiştirme değeri 7,02 mm yatay yer değiştirme değeri ise 5,22 mm'dir.

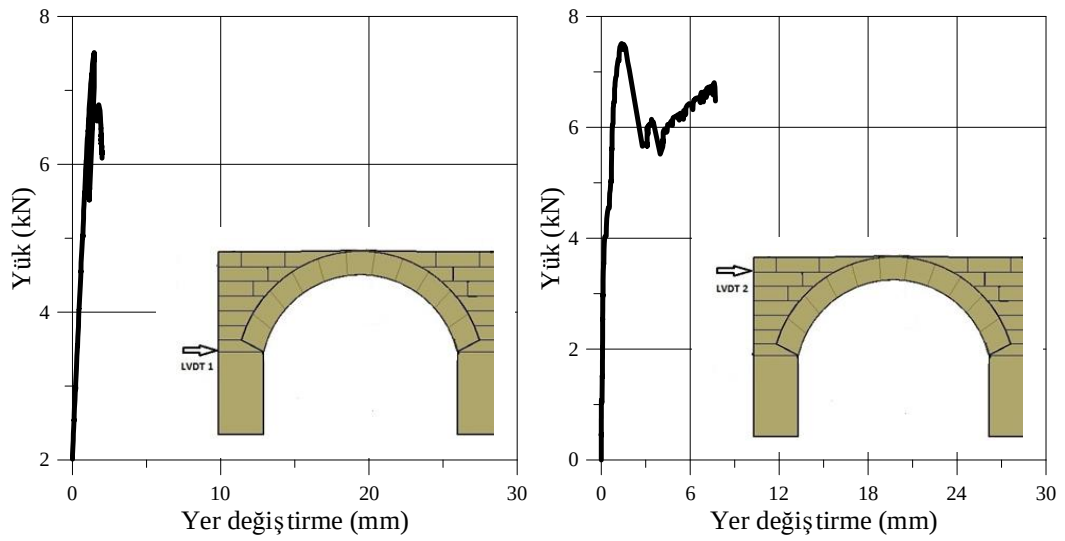


Şekil 4.25. Numune 4 Yükleme- Zaman grafiği.

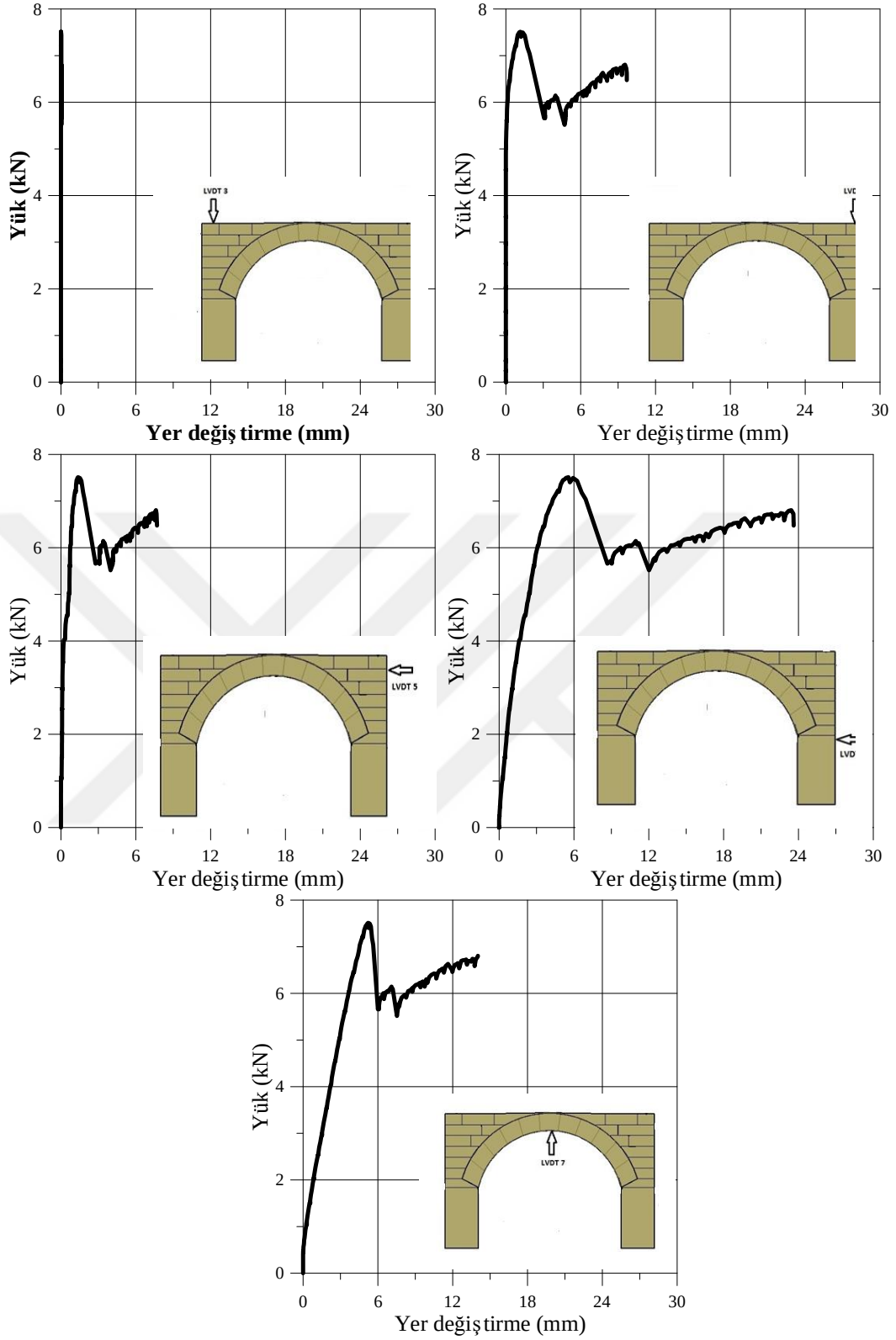
Gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçmek için kemer numunesine yerleştirilen LVDT'ler ve strain-gaugeler'in deney düzeneğindeki görünümü ve göçme sonrasında kemer numunesinin son hali Şekil 4.26'da, deney sonrasında elde edilen yük- yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.26. Numune 4 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.



Şekil 4.27. Numune 4'e ait yük- yer değiştirme grafiği.

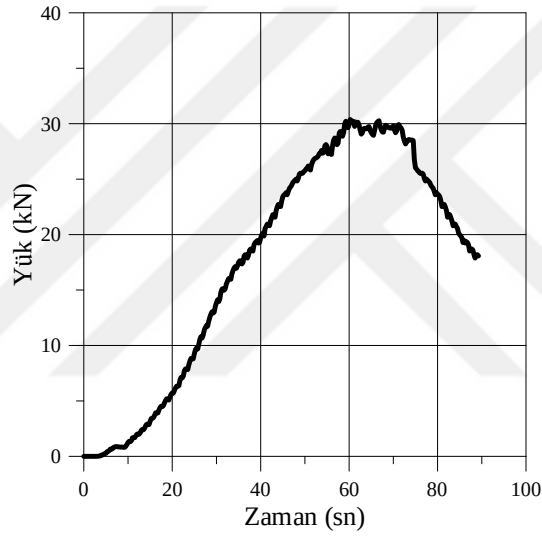


Şekil 4.27 (devam). Numune 4'e ait yük- yer değiştirme grafiği.

Maksimum yük altındayken 36,75. saniyede kemerin orta noktasında bulunan 7 numaralı LVDT'de 5,22 mm'lik düşey yer değiştirme meydana gelirken gergi çubuğundaki şekil değiştirme -0,0000223 mm/mm olarak ölçülmüştür.

4.7 Numune 5

Sütunu kare biçimde saran bileziğe eşkenar üçgen şekilde kaynaklanan gergi çubuğunun uygulandığı Numune 5, en fazla yükü taşıyan ikinci numune olmuştur. Kemer numunesinde ilk çatlaklar numunenin sol tarafındaki kemer sırtı boyunca uzanan derzde oluşmaya başlamıştır. 30,38 kN'luk göçme yükünde numunenin sol tarafındaki kemer sırtı boyunca uzanan derzde çatlaklar belirginleşmiş, numunenin sağındaki kemer taşı da kırılmıştır. Sağ mesnetinin iç bölgesinde çekme gerilmelerinden dolayı çekme çatlağı meydana gelmiştir. Kemer numunesinin göçme yükü altında yapmış olduğu düşey yer değiştirme miktarı 6,62 mm iken yatay yer değiştirme miktarı 7,64 mm olarak Şekil 4.28'de okunmaktadır.

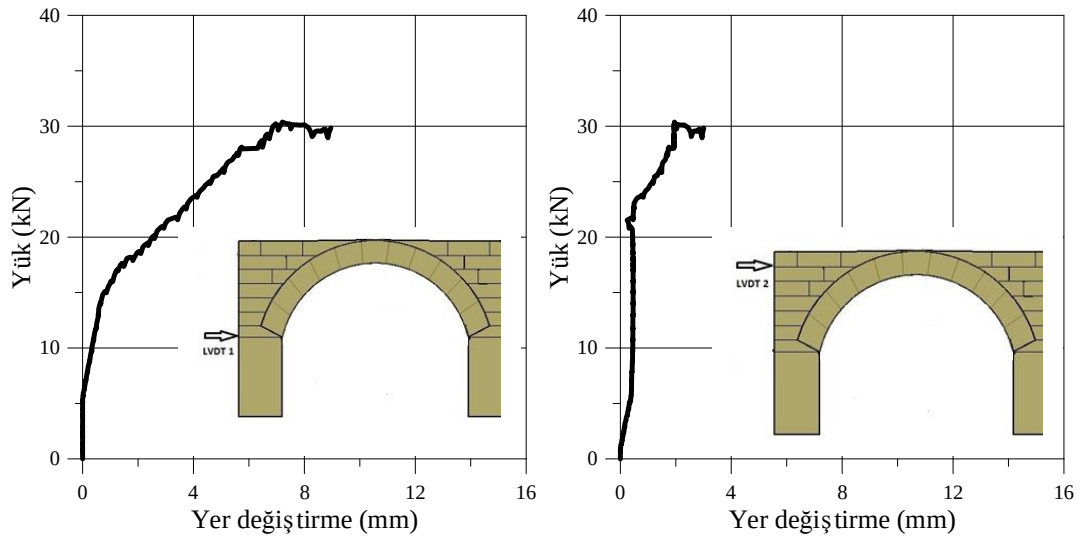


Şekil 4.28. Numune 5 Yük- Zaman grafiği.

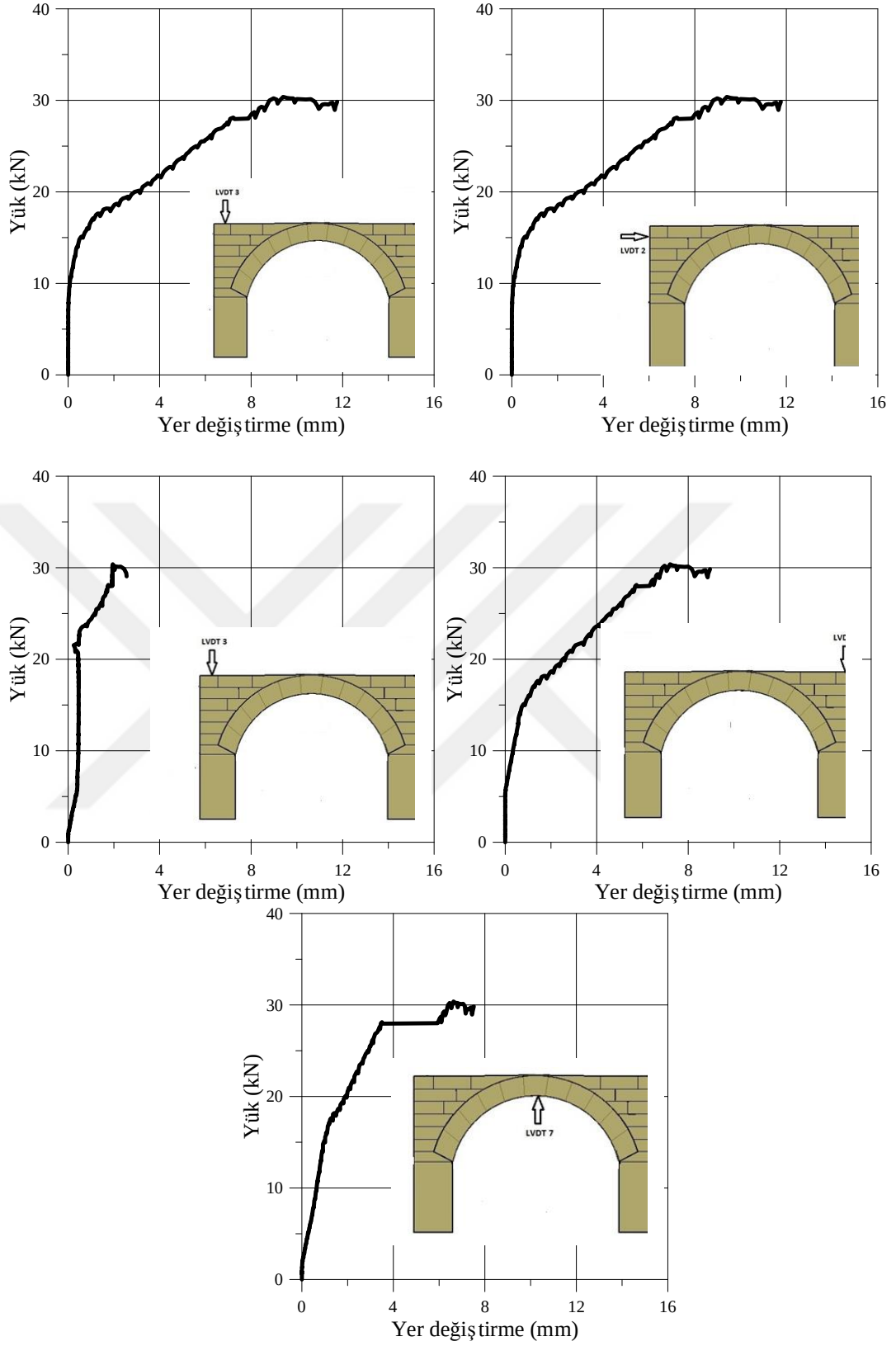
Gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçmek için kemer numunesine yerleştirilen LVDT'ler ve strain-gaugeler'in deney düzeneğindeki görünümü ve göçme sonrasında kemer numunesinin son hali Şekil 4.29'da, deney sonrasında elde edilen yük- yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.29. Numune 5 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.



Şekil 4.30. Numune 5'e ait yük- yer değiştirme grafiği.



şekil 4.30 (devam). Numune 5'e ait yük- yer değiştirme grafiği.

Maksimum yük altındayken 203. saniyede kemerin orta noktasında bulunan 7 numaralı LVDT’de 6,629 mm’lik düşey yer değiştirme meydana gelirken gergi çubuğundaki şekil değiştirme 0,00092 mm/mm olarak ölçülmüştür. Numune 5’te kullanılan gergi çubuğu sisteminde sütun etrafını saran kare kesitli bileziğin ve buna eşkenar üçgen şekilde kaynaklanan gerginin birleşim bölgelerindeki detaylandırmanın çok iyi yapılması gerekmektedir. Uygulanan yük sonucunda oluşabilecek kayma gerilmesi etkisiyle gergi çubuğundaki birleşim bölgelerinde ayrılma görülebilir.

4.8 Numune 6

Numune 6’da matkap yardımıyla sütun ile derz arasında delik açılmıştır. Açılan bu deliğe epoksi esaslı, iki bileşenli, tamir, ankraj ve montaj harcı olan Concessive 1406 doldurulmuş sonrasında gergi çubuğu deliklerden geçirilmiştir. Concessive 1406’nın karışım oranları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. 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; 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 4.3’te, Concessive 1406’nın teknik özellikleri verilmiştir.

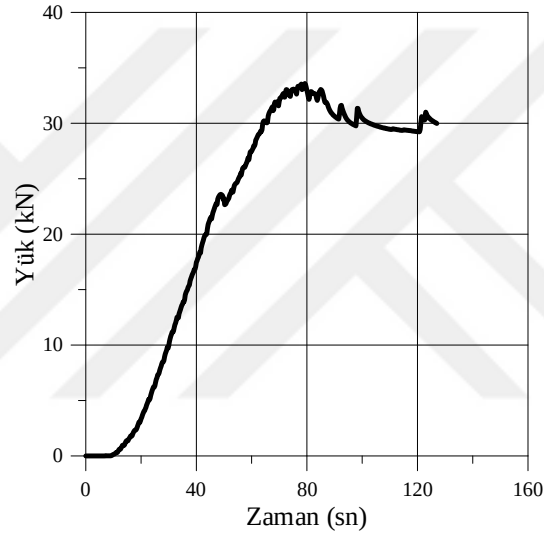
Çizelge 4.3. Concessive 1406'nın teknik özellikleri (URL-3).

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

Çizelge 4.4. Epoksi reçinesi özellikleri (URL-4).

Görünüm/ renk	Reçine A Bileşeni : macun kıvamlı Sertleştirici B Bileşeni: macun kıvamlı Renk: A Bileşeni : beyaz B Bileşeni : gri A+B bileşenleri: açık gri
Karışım	A Bileşeni : B Bileşeni = 4 : 1 ağırlıkça
Birim Ağırlık	Reçine karışımı: 1,31 kg/l (+23 °C'de)
Viskozite	6000 mPas (+23 °C'de)
Termal Genleşme Katsayısı	45 x 10 ⁶ / °C (-10 °C ile +40 °C arasında)
Çekme Dayanımı	30 N/mm ² (+23 °C'de 7 günlük)
Elastisite Modülü	Eğilme: 3800 N/mm ² (+23 °C'de 7 günlük) Çekme: 4500 N/mm ² (+23 °C'de 7 günlük)
Kopma Uzaması	%0,9 (+23 °C'de 7 günlük)
Sarfiyat	Genel olarak: 0,7 – 1,5 kg/m ²
Tam kürünü alma	5 gün (+23 °C'de)

Numune 6’da ilk çatlaklar 27. saniyede 7,92 kN’luk yükte kilit taşının solundaki derzde oluşmuştur. Yükün 17,06 kN’ a ulaşmasıyla numunenin sağında kemer taşlarının derzlerinde çatlaklar görülmüştür. Deney numunesinin solunda 21,4 kN yük altında kemer taşlarının derzlerinde çatlaklar meydana gelmiştir. Numunenin göçme anında taşıdığı yük 33,3 kN olup sol tarafındaki kemer sırtı boyunca uzanan derzde ve kilit taşının sağındaki derzde çatlaklar oluşmuştur. Kemer numunesinin sağ mesnetinin iç bölgesinde de çekme gerilmelerinden dolayı çekme çatlağı meydana gelmiştir. Şekil 4.31’de maksimum taşıma yüküne ulaşan Numune 6’da düşey yer değiştirme miktarı yaklaşık olarak 6,21 mm yatay yer değiştirme miktarı 8,93 mm okunmuştur.

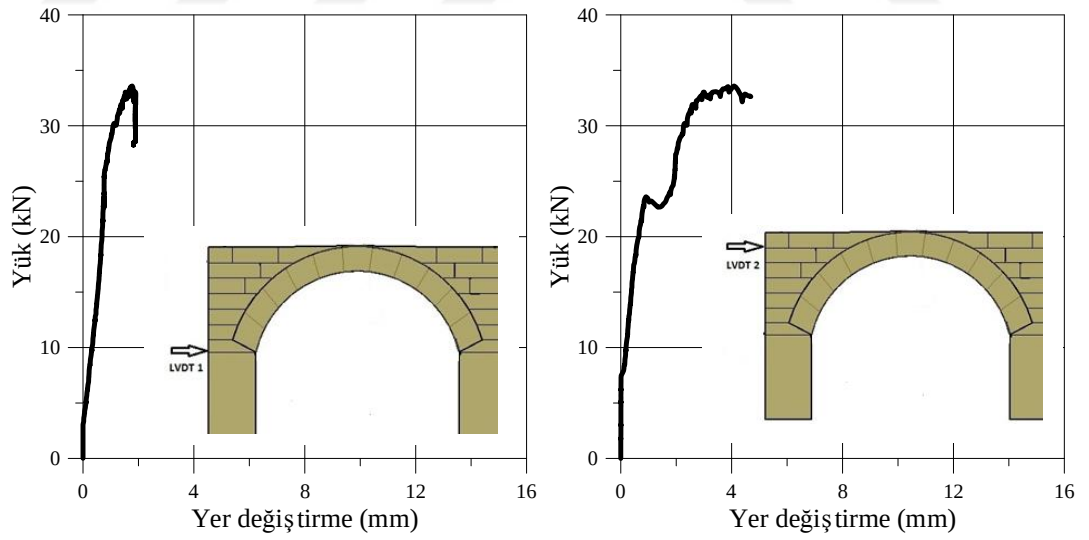


Şekil 4.31. Numune 6 Yük- Zaman grafiği.

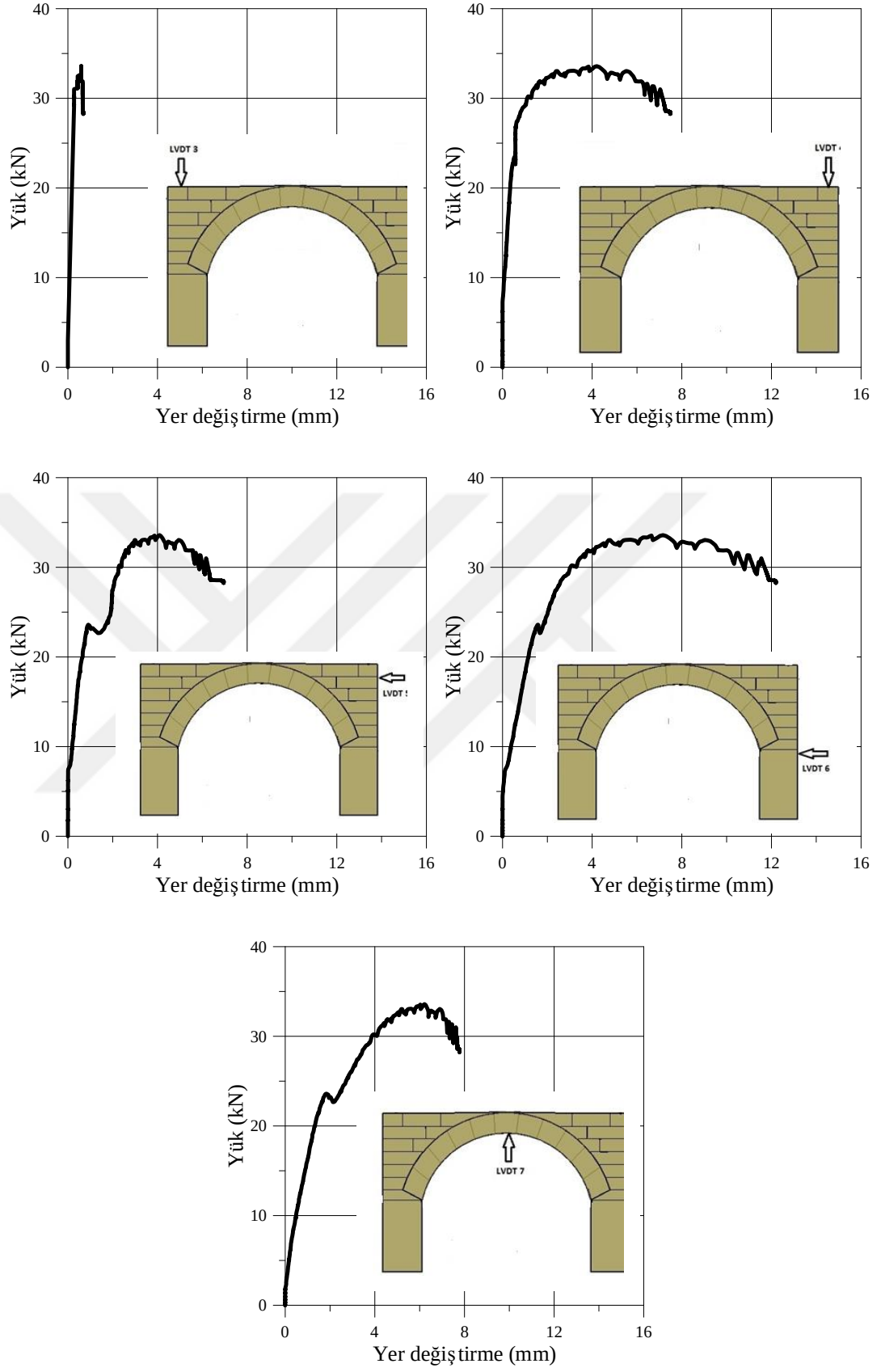
Gerilme ve şekil değiştirmeleri ölçmek için kemer numunesine yerleştirilen LVDT’ler ve strain-gaugeler’in deney düzeneğindeki görünümü ve göçme sonrasında kemer numunesinin son hali Şekil 4.32’da, deney sonrasında elde edilen yük- yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.32. Numune 6 deney numunesinin deney öncesi, sonrası görünümü ve çatlak detayları.



Şekil 4.33. Numune 6'ya ait yük- yer değişime grafiği.

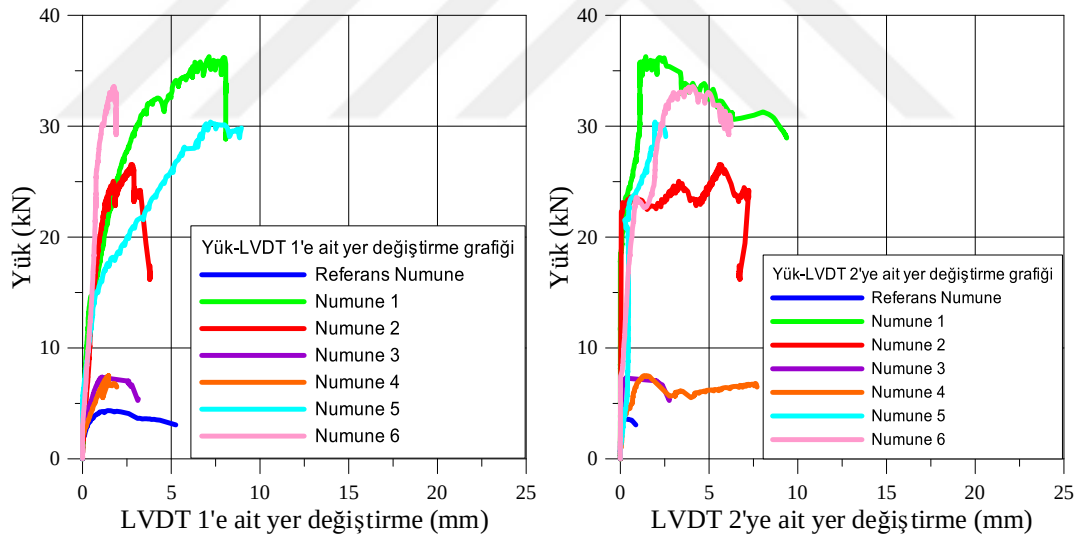


Şekil 4.33 (devam). Numune 6'ya ait yük- yer değiştirme grafiği.

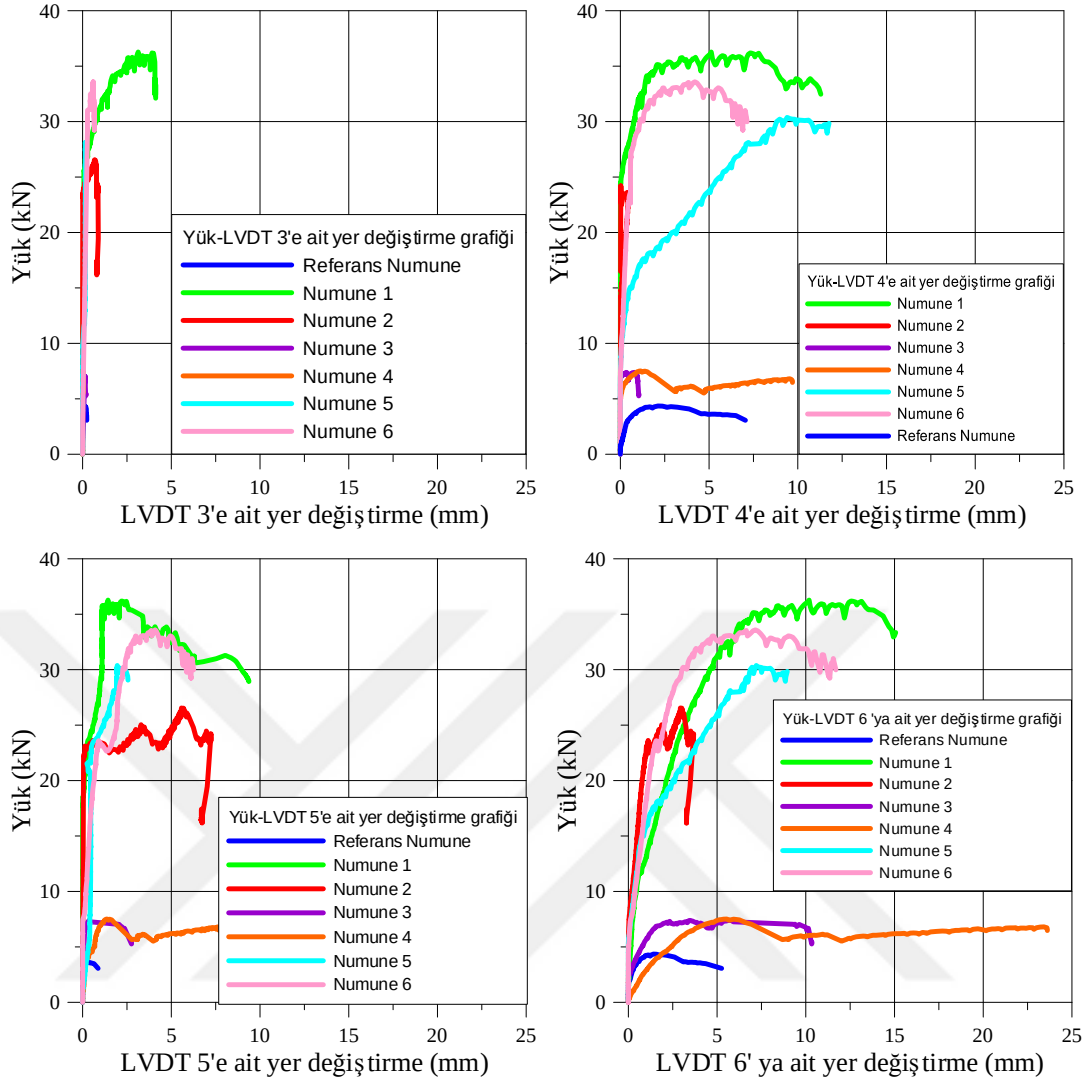
Her ne kadar tarihi yapıların atmosferine uygun olmadığı düşünülse de FRP ve epoksi reçinesinin onarım ve güçlendirmede tercih edilen bir malzeme olduğu görülmektedir. Gergi çubuklarının kemere sabitlenmesinde kullanılan epoksi reçinesinin tasarlanan bu güçlendirmeye etkisi ve bu tekniğin işlevselliği araştırılmıştır. Çalışma yapılırken gergi çubuğu ile epoksi reçinesi arasındaki aderansın yeterli olmayıp ayrılmanın olabileceği düşünülse de deney sonucunda böyle bir problem ile karşılaşmadığı aksine bu şekilde bir uygulamanın iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

4.9 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bütün kemer numunelerinde her bir LVDT aynı geometrik bölgeye bağlanmıştır. Örneğin LVDT 7 hep kilit taşının altına, LVDT 1 sütun ile üzengi taşının birleştiği yere bağlanmıştır. Her bir Numune için LVDT'lerden elde edilen ölçümler Şekil 4.34'de verilen yük-yer değiştirme grafiklerinde kıyaslanmıştır.



Şekil 4.34. Yük-yer değiştirme grafikleri.



Şekil 4.34 (devam). Yük-yer değiştirme grafikleri.

Şekil 4.34'den de görüldüğü gibi LVDT 1'de yatay yer değiştirme en fazla 7,13 mm ile Numune 1'de olurken, en az yatay yer değiştirme 0,43 mm ile Numune 5'te gerçekleşmiştir. Deney sonrası fotoğraflar incelendiği zaman, sadece Numune 1'de LVDT 1'in bulunduğu sol sütunda çatlama ve açılma olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple buradaki yer değiştirme diğer Numunelere oranla daha fazladır.

Numune 5'de 30,38 kN'luk göçme yükünde numunenin sol tarafındaki kemer sırtı boyunca uzanan derzde çatlaklar belirginleşmiş ve LVDT 2'nin bulunduğu kemer duvarı üzerindeki açılma diğerlerine göre çok daha fazla olmuştur. Böylece LVDT 2'de en fazla yer değiştirme 2,12 mm ile Numune 5'te okunurken, en az yer değiştirme ise 0,48 mm ile Referans numunede okunmuştur.

LVDT 3'te en fazla yer değiştirmeyi yapan 3,13 mm ile Numune 1, en az yer değiştirmeyi yapan ise 0,003 mm ile Numune-3 olmuştur. Numune 1' de en fazla çatlak oluşumu numunenin sol tarafında meydana gelmiştir. Sütün ayağındaki açılmanın etkisiyle sol st köşe yukarı doğru esnemiş ve açılma nedeniyle LVDT 3'te yer değiştirme artmıştır.

LVDT 4 için ise en fazla yer değiştirme 9,39 mm ile Numune-5'te gözlemlenirken, en az yer değiştirme -0,117 mm ile Numune 2'te gözlemlenmiştir. LVDT 4'te ölçülen yer değiştirme miktarı stndaki açılma ve kemer duvarındaki çatlama nedeniyle Numune 5'te daha fazladır.

LVDT 5'te yatay yer değiştirme en fazla 5,57 mm ile Numune 2'de olurken en az yatay yer değiştirme -0,24 mm ile Numune 3'te gerçekleşmiştir. Numune 5'te kemerin sağ tarafındaki sütün ayağında meydana gelen açılma nedeniyle LVDT 5'te yer değiştirme artmıştır.

LVDT 6 için en fazla yatay yer değiştirme 10,18 mm ile Numune 1'de en az yatay yer değiştirme ise 1,41 mm ile Referans numunede görülmüştür. LVDT 6'nın bulunduğu yerde üzengi taşının hizasında sadece Numune 1'de çatlak meydana gelmiştir ve buradaki yer değiştirme diğer numunelere göre daha fazla olmuştur.

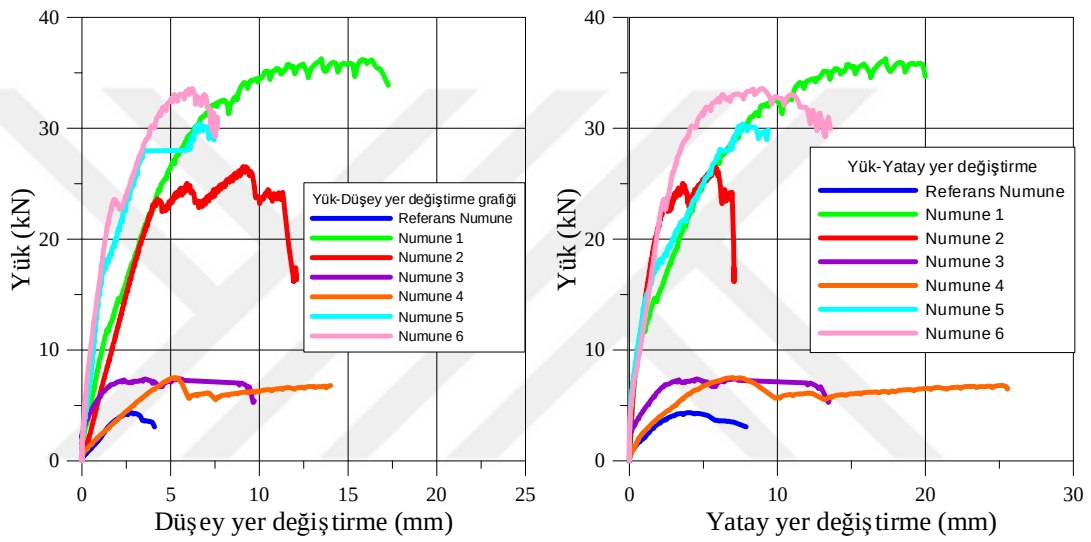
LVDT 7 için en fazla düşey yer değiştirme 13,4 mm ile Numune-1'de, en az düşey yer değiştirme ise 2,73 mm ile Referans numunede görülmüştür. Numune-1 düşey yükü en fazla taşıyan kemer numunesi olması sebebiyle orta noktasında diğer numunelere oranla daha fazla açılma olmuştur. Bu sebeple burada ölçülen yer değiştirme daha fazla olmuştur.

Kemer Numunelerinin ortasından düşey yönde yk uygulanmıştır. Düşey yer değiştirme değerleri kemerin orta noktasında bulunan 7 numaralı LVDT yardımıyla bulunurken, yatay yer değiştirme değerleri ise stnların kemer ile birleştiği düzlemdeki iki adet yatay LVDT'lerden (LVDT 1 ve LVDT 6) elde edilen değerlerin toplamı hesaplanarak bulunmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar izelge 4.5'te ve yük-yer değiştirme grafikleri şekil 4.35'da verilmektedir.

Çizelge 4.5. 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)
Referans	4,35	0	2,73	3,93
Numune 1	36,27	906,7	13,49	17,31
Numune 2	26,54	650	9,08	5,66
Numune 3	7,38	184,5	3,58	4,59
Numune 4	7,51	187,7	5,22	7,02
Numune 5	30,38	759,5	6,62	7,64
Numune 6	33,58	832,5	6,21	8,93

^aNumunelerin kontrol deney elemanına göre basınç dayanımlarındaki yüzdelik artış miktarı



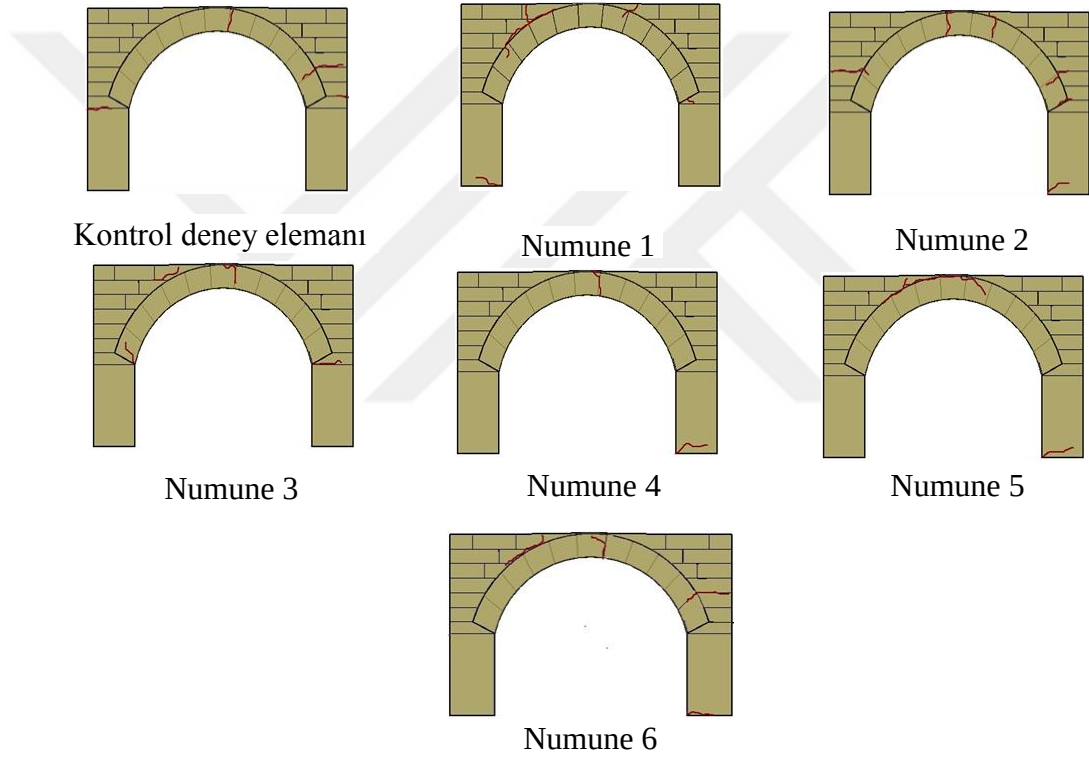
Şekil 4.35. Yük-düşey ve yatay yer değiştirme grafikleri.

Gerek Çizelge 4.5'ten gerekse Şekil 4.35'ten görüleceği üzere Numune 1 36,27 kN'luk düşey bir kuvvet ile en fazla yükü taşıyan deney numunesi olmuştur. Maksimum yüke ulaştığında Numune 1'de meydana gelen düşey yer değiştirme miktarı 13,49 mm civarındadır.

Deney numuneleri arasında en fazla yükü taşıyan ikinci numune ise epoksi uygulaması yapılan Numune 6 olmuştur. Numune 6'nın maksimum yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak 33,58 kN civarında iken yapmış olduğu düşey yer değiştirme miktarı 6,21 mm civarındadır. Davranış açısından benzerlik gösteren ve bazı restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında karşılaşılan gergi çubuğu sistemini temsil etmek için hazırlanan Numune 3 ve Numune 4'ün maksimum yük taşıma kapasitesi sırasıyla 7,38 kN ve 7,51 kN'dur. Bu değere karşılık gelen düşey yer

değiştirme miktarı ise 3,58 mm ve 5,22 mm'dir. Numune 3 grafiğindeki ani düşüşün sebebi kemer numunesinde meydana gelen ani kırılmalardır.

Numune 1'e yakın tasarımdaki Numune 2'nin maksimum yük taşıma kapasitesi 26,54 kN olarak elde edilmiştir. Bu yük düzeyinde elde edilen düşey yer değiştirme miktarı ise yaklaşık olarak 9,08 mm'dir. Kontrol elemanı olarak üretilen deney numunesinde herhangi bir gergi çubuğu olmadığından maksimum yük taşıma kapasitesi 4,35 kN civarında kalmıştır. Aşağıdaki Şekil 4.36'da deneye tabi tutulan tüm numunelerde meydana gelen çatlaklar, koyu çizgiler ile temsili kemer Numuneleri üzerinde gösterilmiştir.

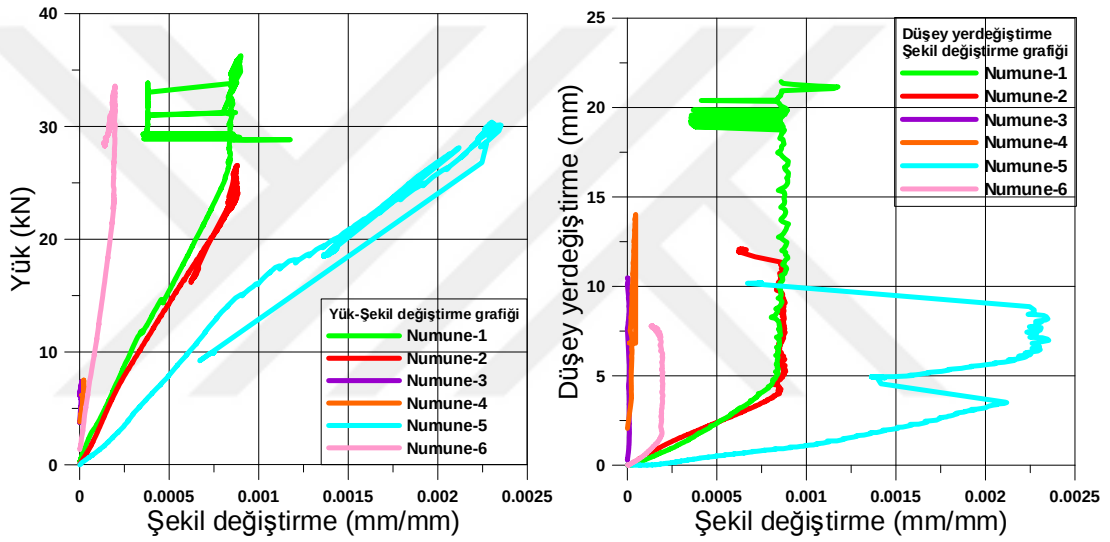


Şekil 4.36. Kemer numunelerinde meydana gelen çatlaklar.

4.10 Gergi Çubuğu Davranışının İncelenmesi

Deneyler sırasında, Numune-1, Numune-2, Numune-5 ve Numune-6'da farklı şekilde uygulanan gergi çubuklarındaki şekil değiştirmeler ve deformasyonlar gözle görülebilecek şekilde meydana gelmiştir. Numune-3'te ise uygulanan yükün etkisiyle sütunda yanal açılma meydana geldiğinden dolayı gergi çubuğunda dikkate değer bir şekil değiştirme meydana gelmeden kemer göçmüştür. Sütundaki açılmayı gergi

çubuğunun karşılaşması beklenmektedir. Ancak Numune-3'teki bu gergi çubuğu sistemi sütun kemer birleşim bölgesindeki derzden değil derzin altından uygulanmıştır. Bu sebeple gergi çubuğu tarafından karşılanmayan yük kemer tarafından karşılanmıştır. Sabit olan sütunlar üzerine oturtulan kemer kısmı sağ üzengi taşının altındaki derzden kayarak ayrılmıştır. Numune 4'te ise sütunu saran bilezikte açılma meydana gelmiştir. Taşıma kapasitesine ulaşan kemer numunesinde yük gergi çubuğuna iletilemeden göçme meydana gelmiştir. Numune-3 ve Numune-4'teki gergi çubuklarında şekil değiştirme miktarı sınırlı seviyede kalmıştır. Şekil 4.37'de strain-gaugelerden elde edilen şekil değiştirmeler ile düşey yöndeki yer değiştirmeler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.37. Gergi çubuklarındaki şekil değiştirmelerin; kemer üzerinden uygulanan düşey yük ve düşey yer değiştirme ile grafiği.

Düşey yük-şekil değiştirme grafiğine göre Numune-1, Numune-2 ve Numune-5'te yükün uygulandığı ilk aşamada kemer numunesi ile birlikte gergi çubuğunun da yük taşımaya başladığı ve şekil değiştirmeler meydana geldiği görülmektedir. Gergi çubuğunda şekil değiştirme miktarı ilk başlarda minimum seviyelerde başlayıp yüklerle orantılı olarak artmaktadır. Numune-3 ve Numune-4'te ise kemer üzerine etkiyen yükün artmasıyla beraber sütunlar yanal olarak açılmakta kare bilezikte şekil değiştirmeler başlamaktadır. Gergi sisteminin bilezik kısmında meydana gelen açılma sebebiyle gergi çubuğu ilk aşamada yük taşıyamamaktadır. Kemer numunesinin taşıdığı yük artmasına rağmen gergi çubuğuna iletiminde yaşanan sıkıntıdan dolayı şekil değiştirmenin düşük seviyede kaldığı gözlenmektedir.

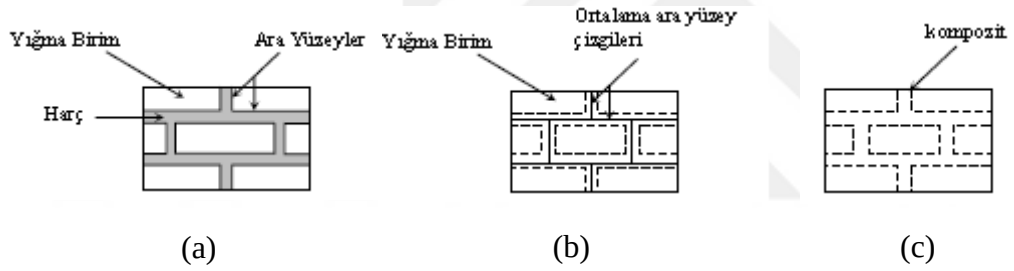
Maksimum yükte maksimum şekil değıştirmenin gerçekleştiği Numune-1 tarihi yapılarda hâlihazırda mevcut olan sisteme en yakın olan gergi çubuğu sistemidir.

Numune-2'den elde edilen şekil değıştirme değeri Numune-1'e yakın olsa da Numune-2'nin ulaştığı maksimum taşıma yükünün Numune-1'e göre düşük seviyede kaldığı da okunmaktadır. Gergi çubuğunun kemer sütun birleşim bölgesinden matkapla açılan deliğe epoksi reçinesi yardımıyla sabitlenmesiyle elde edilen Numune-6'da yük değeri en yüksek olan Numune-1'e yaklaşmış olsa da şekil değıştirme yükü orantılı olarak artmamış ve düşük seviyelerde kalmıştır. Numune-3 ve Numune-4'te gergi çubuğunda şekil değıştirmenin sınırlı seviyede kaldığı görölmektedir. Kare bileziğin yükü iletilmesindeki yetersizliği kemer numunesinin düşük seviyede yük taşımasına sebep olmaktadır. Bu sebeple düşük yük seviyesinde taşıma kapasitesini tamamlayan kemer numunelerinde yer değıştirme değeri de düşük seviyelerde kaldığı görölmektedir. Tarihi yapılarda uygulamasına rastlanılan Numune-1 'in düşey yer değıştirme değeri diğer kemer numunelerine göre yüksek olduğu görölmektedir.

5. KEMER NUMUNELERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Günümüzde yaygın olarak kullanılan yığma yapıların hesaplamaları için getirilen çözümler betonarme ve çelik yapılara kıyasla yetersiz kalmıştır. Ancak son zamanlarda yapılan bilimsel araştırmalarda, ilerleyen teknoloji sayesinde sayısal yöntemleri barındıran çözümler üretilmiş ve kısa zamanda büyük yapılarla ilgili Modellerin hesaplamaları yapılabılır hale gelmiştir.

Nümerik modeller Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak LUSAS, (2013) yapısal analiz programında oluşturulmuştur. Yapılan literatür incelemelerine göre yığma yapıların analizi için üç farklı Modelleme tekniğinin kullanıldığını söylemek mümkündür. Bunlar; Detaylı mikro Modelleme, Basitleştirilmiş mikro Modelleme, Makro Modellemedir. Şekil 5.1’de yığma duvarlardaki modelleme teknikleri gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Yığma duvarlardaki Modelleme teknikleri a)Detaylı mikro Modelleme, b)Basitleştirilmiş mikro Modelleme, c)Makro Modelleme.

Lourenço (1996), açıkladığı teknikler, yığma yapıların analizinde elde edilmek istenilen sonuca göre tercih edilmektedir. Mikro Modellemeler yığma duvarların detaylı incelenmesinde, kritik bölgelerin analizinde tercih edilirken, makro Modellemeler karmaşık ve büyük sistemlerde, tüm yığma binanın analizinde tercih edilmektedir. Uygun sonlu elemanlara ayırmak suretiyle yapılan makro Modelleme zaman açısından tasarruf sağlandığı için tercih edilmektedir (Ural, 2009).

Detaylı mikro Modellemede, yığma yapı elemanını oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri Elastisite modülleri, Poisson oranları ve elastik olmayan diğer özellikleri ayrı ayrı ifade edilmektedir. Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Lourenço, 1996). Bu Modelleme tekniğine ilişkin yapılan çalışmalardan bazıları; Milani vd., (2005ab), Pina ve Lourenço, (2004), Zucchini ve Lourenço, (2002) olarak belirtilebilir.

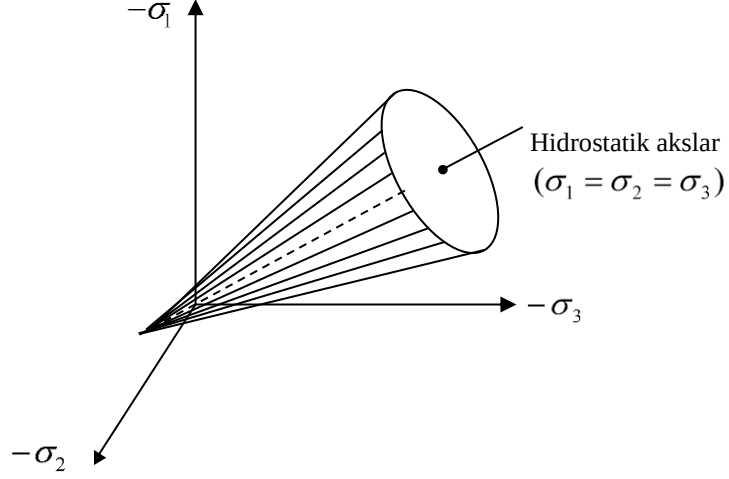
Basitleştirilmiş Mikro Modelleme tekniği kullanılarak yapılan Modellemelerde, muhtemel göçme mekanizmalarının tümünün dikkate alınmaması önemli sorunlardan birisidir (Ural, 2009). Oluşturulan Numunelerde ara yüzey olarak tanımlanan kısımların hem çekme hem de kayma davranışlarını birlikte ifade etmesi gerekmektedir.

Yığma birim ve harcın özelliklerinin birçok homojenleştirme işleminden geçmesiyle uygulanan makro Modellemede, yığma duvar kompozit bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Çok büyük boyutlardaki sistem rijitlik matrisi ve yapısal analiz programların oluşturacakları sonuç dosyalarının boyutunun çok büyük olmasından dolayı büyük sistemler için en uygun Modelleme tekniği makro modellemedir (Ural, 2009). Bu Modelleme tekniği ile ilgili bilgiler Cecchi vd., (2005), Sab (2003), Anthoine (1997) yayınlarında daha ayrıntılı olarak verilmektedir. Basınç kuvvetine karşı dayanım gösteren yığma duvarlar çekme kuvveti karşısında oldukça zayıf dayanım göstermektedirler. Araştırmalar sonucunda yığma yapıların analizi için kullanılan Modelleme tekniklerinde elastik ötesi davranışı ifade etmek için bazı kırılma kriterleri kullanılmaktadır. Drucker- Prager, Rankine ve Hill makro Modelleme tekniğinde sık tercih edilen kırılma kriterleridir.

Drucker- Prager Kriteri genellikle makro Modellemelerde kullanılmakta ve enerji hipotezlerinden Von-Mises kriterinin basitleştirilmiş halidir. Drucker-Prager kriterinde Von-Mises kriterindeki hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim ile dikkate alarak denklem (5.1)' deki şekilde ifade edilmektedir (Drucker and Prager, 1952).

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

Burada α ve k pozitif malzeme sabitleridir. I_1 ; gerilme tansörünün birinci invariantını, J_2 ; deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantını göstermektedir. Kriter $\alpha = 0$ olduğunda Von-Mises kriterine eşit olmaktadır. Üç boyutlu gerilme hali için Drucker-Prager kırılma yüzeyi Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



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

Drucker-Prager kriteri, Mohr-Coulomb kriterine oldukça yakındır. Örneğin, Drucker-Prager daresi, 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 denklem (5.2) 'teki şekilde belirlenmektedir (Chen ve Mizuno, 1990).

$$\alpha = \frac{2 \sin \theta}{\sqrt{3}(3 - \sin \theta)} \quad (5.2)$$

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

Mohr-Coulomb kırılma yüzeyindeki altıgen piramidi çevreleyen dış sınır görünümü Denklem (5.3)'teki sabitlerle belirlenen koni yardımıyla elde edilmiştir. $\theta = 0^\circ$ ile belirlenecek çekme meridyeninden geçen iç koninin elde edilmesini sağlayan sabitler Denklem (5.3)'teki gibi hesaplanmaktadır.

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

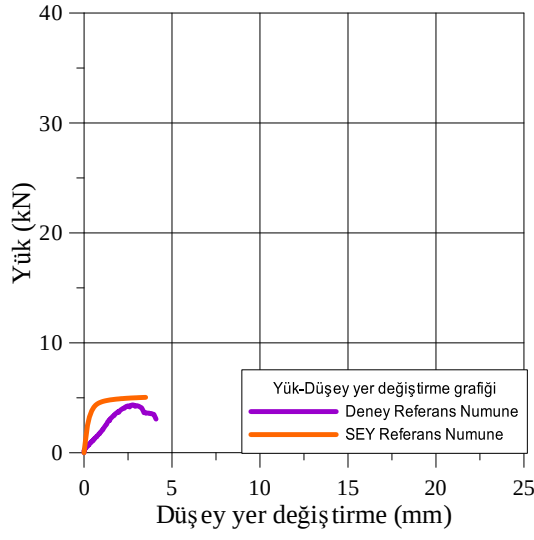
$$k = \frac{6c \cos \theta}{\sqrt{3}(3 + \sin \theta)} \quad (5.3)$$

Bu çalışmada, θ ve c parametreleri için $c=0,255$ MPa ve $\theta=26^\circ$ değerleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar numunelerinde üç boyutlu katı (solid) elemanlar kullanılarak duvar ve gergi elemanı tanımlanmıştır. Bu elemanlar 8 düğüm noktası ve her düğüm noktasının da 3'er adet yer değiştirme serbestliklerinden oluşmuştur.

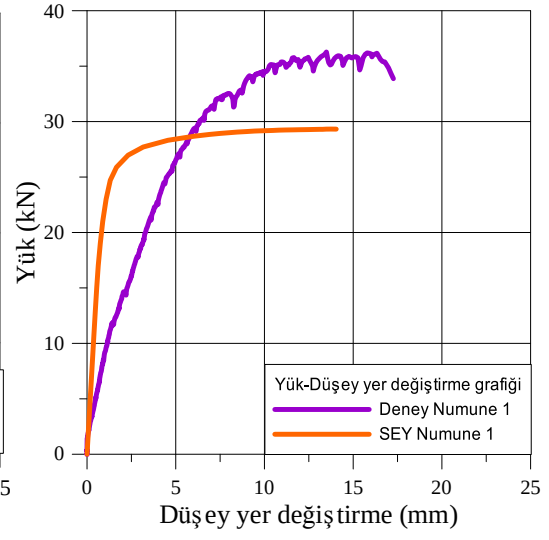
Deney numuneleri, kemer açıklığının orta noktasından düşey yönde uygulanan yük etkisine maruz bırakılmıştır. Sütunların alt kısımları ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar Numunelerinde kullanılan malzemelerin doğrusal ve doğrusal olmayan özellikleri Çizelge 5.1'de ifade edildiği şekilde tanımlanmıştır. Numunelerin modellenmesinin yapıldığı programda sonlu elemanlar yöntemine göre analizler yapılmış ve sonuçlar deneyden elde edilen verilerle karşılaştırmalı olarak Şekil 5.3' de gösterilmiştir. Deney ve analiz sonuçları ise Şekil 5.4'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 Numunelerinin davranışları birbirine oldukça yakın çıkmıştır.

Çizelge 5.1. Numunelerin malzeme özellikleri.

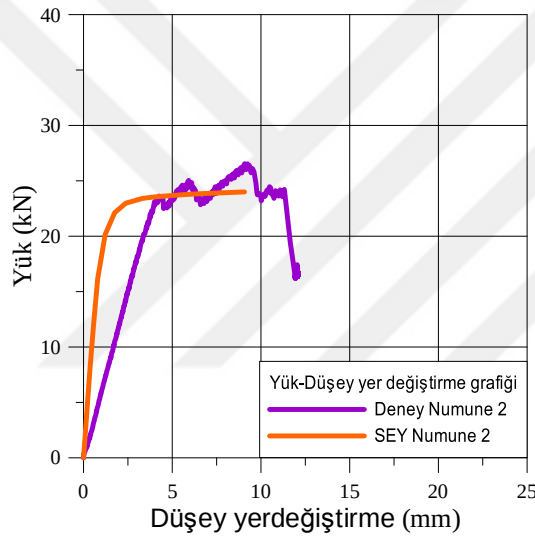
Malzemeler	Özellikler	Değerler
Taşın Özellikleri	Elastisite modülü(MPa)	1460
	Poisson Oranı	0,15
	Kohezyon (MPa)	0,255
	İçsel sürtünme açısı	26
Çelik gergi çubuğu	Elastisite modülü (MPa)	210000
	Poisson oranı	0,3
	Tek eksenli akma gerilmesi (MPa)	280
	Çekmede pekleşme eğimi	212,1
	Plastik şekil değiştirme	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



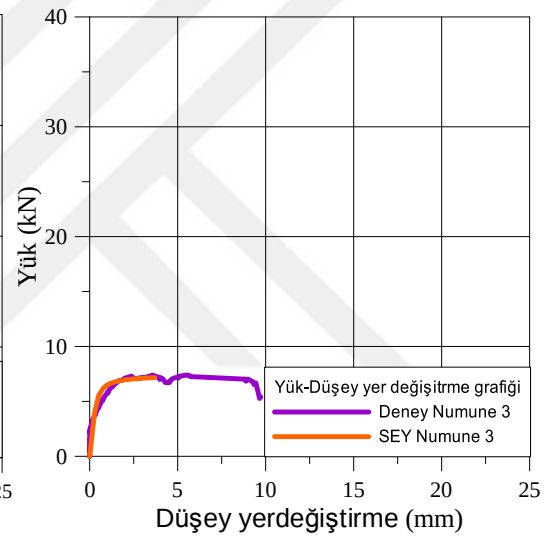
(a)



(b)

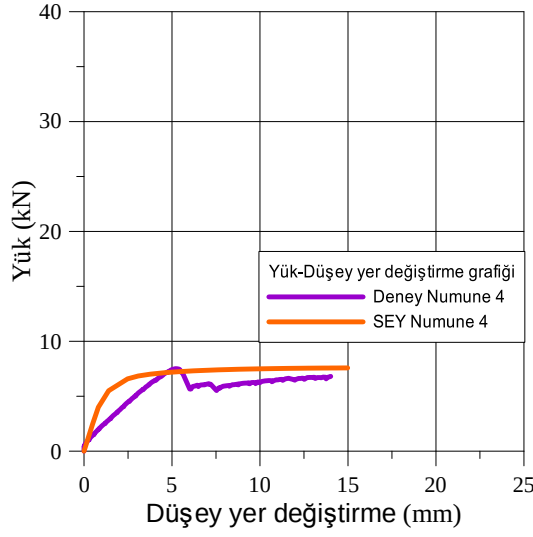


(c)

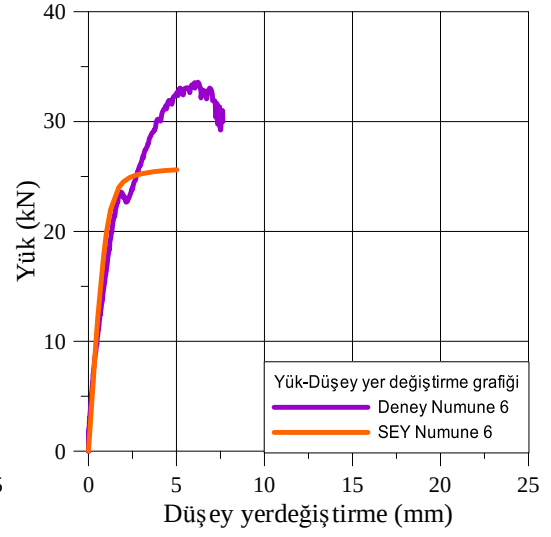


(d)

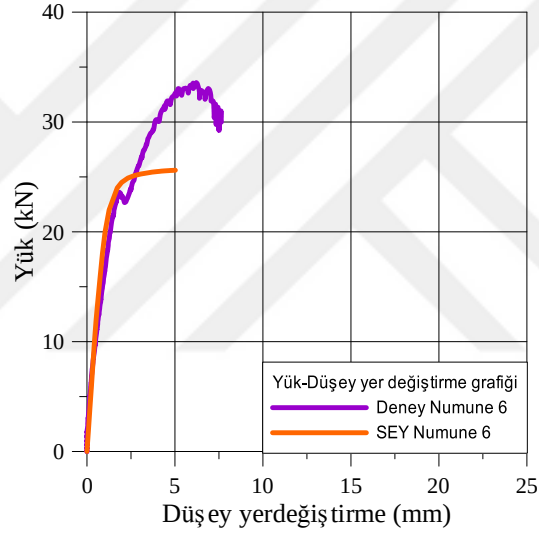
Şekil 5.3. Sonlu elemanlar Modelleriyle yapılan analizlerden elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.



(e)



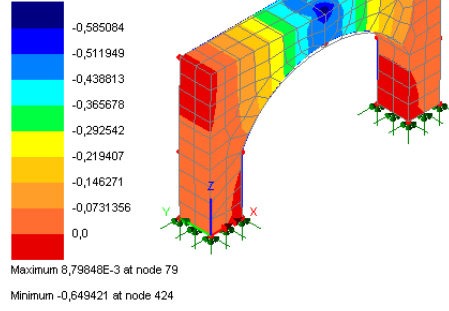
(f)



(g)

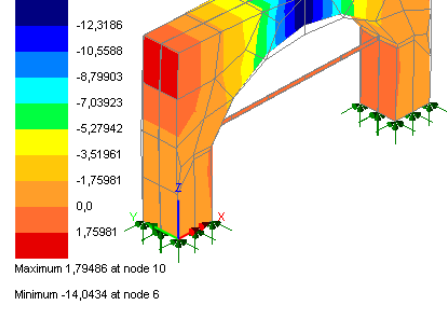
Şekil 5.3 (devam). Sonlu elemanlar Modelleriyle yapılan analizlerden elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Loadcase: 6:Increment 6 Load Factor = 4.31008
Results file: reffffffffff.mys
Entity: Displacement
Component: DZ



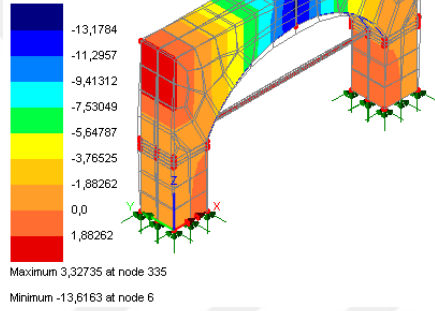
(a)Referans Numune.

Loadcase: 38:Increment 38 Load Factor = 29.3192
Results file: Numune-1.mys
Entity: Displacement
Component: DZ



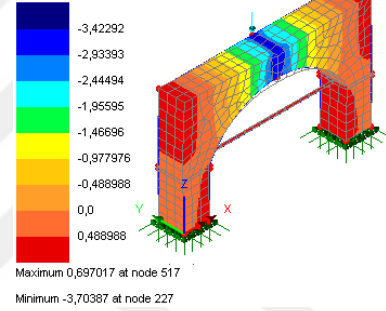
(b) Numune-1.

Loadcase: 19:Increment 19 Load Factor = 24.2154
Results file: Numune-2.mys
Entity: Displacement
Component: DZ



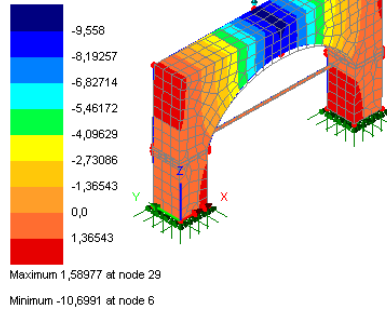
(c) Numune-2.

Loadcase: 26:Increment 26 Load Factor = 7.15845
Results file: Numune-3.mys
Entity: Displacement
Component: DZ



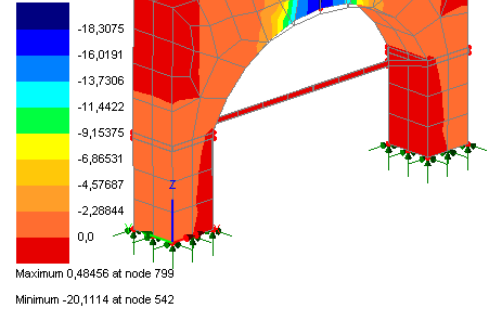
(d) Numune-3.

Loadcase: 19:Increment 19 Load Factor = 7.51559
Results file: Numune-4.mys
Entity: Displacement
Component: DZ



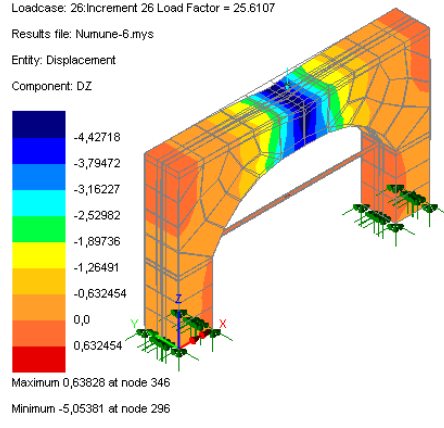
(e) Numune-4.

Loadcase: 42:Increment 42 Load Factor = 25.4769
Results file: Numune-5.mys
Entity: Displacement
Component: DZ



(f) Numune-5.

Şekil 5.4. Deney ve analiz sonuçları.



(g) Numune-6.

Şekil 5.4 (devam). Deney ve analiz sonuçları.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada altı adet farklı tasarımdaki gergi çubuğu sisteminin kemer numunesinin davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla birisi gergisiz referans numune olmak üzere 6 adet farklı tasarımdan oluşan gergi çubuk sistemlerinin uygulandığı kemer numuneleri örülmüştür. Kilit taşı doğrultusunda düşey tekil yük uygulanan deney numunelerinin davranışına gergi çubuğu sistemlerinin etkisi incelenmiştir. Aşağıda bu çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde sıralanmıştır.

Düşey tekil yük altındaki kemerli yapılarda gergi çubuğunun davranışa etkisi önemlidir. Deney sonuçlarına göre gergi çubuğu bulunan kemer numunesinin dayanımı gergi çubuksuz numuneye göre en az %184,5 kat artmıştır. Gergi çubuklarının asıl amacı düşey tekil yük altında sütunlarda ve kemer yapılarında oluşan çekme gerilmelerini karşılamaktır.

Tarihi yapılardaki kemerlerde hâlihazırda bulunan gergi çubuğu sistemi, Numune 1’de Modellenen sisteme çok benzemektedir. Günümüz restorasyon çalışmalarında bu şekilde tasarlanan gergi çubuğu uygulamasının güç olduğunu söylemek mümkündür. Sütun kemer birleşim bölgesine zarar vermeden uygulanmayı gerektiren bu Numune, kemere zarar vererek dayanımının azalmasına sebep olabilecek riskli bir uygulamadır. Deney sonuçlarından da anlaşılabileceği gibi Numune-1, 36,27 kN yük ile düşey tekil yük altında en fazla dayanımı sağlayan numune olmuştur. Buradaki amacımız, tasarlanan gergi çubuklarından gerçeğe en yakın şekilde uygulanıp en fazla dayanımın elde edildiği örneği belirlemektir.

Tarihi yapılarda uygulanan gergi çubuğu sistemine yakın bir tasarım elde etmek amacıyla oluşturulan Numune-2’de sütun ile derz arasında açılan delikten geçirilen gergi çubuğu dışarıdan plaka yardımıyla sabitlenmiştir. Numune-1’in maksimum yük taşıma kapasitesi 26,54 kN’a ulaşarak düşey yük altında en fazla dayanım sağlayan dördüncü numune olmuştur.

Numune-3 ve Numune-4’te kullanılan gergi çubuğu, sütunu çepeçevre saracak şekilde bükülen 3 mm kalınlığındaki sacdan 10 mm genişliğinde kesilen bileziğe tek ve orta noktadan sabitlenmiştir. Plakalı ve plakasız olarak tasarlanıp uygulanan gergi çubuğu sistemlerinde sütunun yapısı kare kesitli olduğundan dolayı önce bilezik kısmında açılmalar oluşmuştur. Gergi sisteminin bilezik kısmında meydana gelen

açılma sebebiyle gergi çubuğu ilk aşamada yük taşıyamamaktadır. Kemer numunesinin taşıdığı yük artmasına rağmen gergi çubuğuna iletiminde yaşanan sıkıntıdan dolayı şekil değiştirmenin düşük seviyede kaldığı gözlenmektedir. Bu durum kare kesitli tasarlanan gergi çubuğu sisteminin yetersizliğini göstermektedir. Burada beklenen davranış, kemer numunesine yük uygulanmaya başladığı anda gergi çubuğunun da çekme kuvvetini karşılamasıdır. Diğer bir ifadeyle gevrek olan yığma birimden önce sünek olan gergi çubuğu yük taşımaya başlamalıdır.

Numune-3 ve Numune-4'teki yetersizliği gidermek için Numune-5'teki gergi çubuğu sistemi eşkenar üçgen şekilde tasarlanmıştır. Burada da bilezikte açılma meydana gelmiş ancak eşkenar bağlanan çubuklar sayesinde yük iletilmiş ve yük yüklendiği anda gergi çubuğu tarafından taşınmaya başlamıştır. Maksimum yük taşıma kapasitesi 30,38 kN olan Numune-5 düşey yük altında en fazla dayanım sağlayan üçüncü numune olmuştur. Sağladığı yüksek dayanım sebebiyle Numune-3 ve Numune-4'teki gergi çubuğu sistemlerinin yerine tercih edilebilir.

Numune 6'da, zıvana görevi görerek kemer ile gergi çubuğu arasındaki bağlantıyı sağlaması amacıyla epoksi reçinesinden faydalanılmıştır. Bu sebeple gergi çubuğu kemer sütun birleşim bölgesinden matkapla açılan deliğe yerleştirilmiş ve epoksi reçinesi yardımıyla sabitlenmiştir. 33,3 kN'luk maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşan Numune-6 düşey yük altında en fazla dayanım sağlayan ikinci numune olmuştur. Bu uygulamada epoksi reçinesinin gergi çubuğundan sıyrılarak ayrılması beklenmiş ancak bunun aksine kuvvetli bir aderans sağladığı görülmüştür.

Tarihi yapılarda uygulanan sisteme yakın dayanım sağladığı ve uygulaması kolay olduğu için Numune-5'teki gergi çubuğu sisteminin kullanılmasının uygun olduğu ifade edilebilir.

KAYNAKLAR

- Anthoine, A. 1997. Homogenization of Periodic Masonry: Plane Stress, Generalized Plane Strain or 3D Modeling, Communications in Numerical Methods in Engineering, 13, 319-326.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2007. Tarihi köprülerin deprem davranışına sonlu eleman Numune iyileştirilmesinin etkisi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 29-39.
- Birinci, F., 2010. Taş kemer köprülerin sonlu eleman Numunelerinin 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.
- Cecchi, A., Milani, G. ve Tralli, A. 2005. Validation of Analytical Multiparameter Homogenization Models for out-of-plane Loaded Masonry Walls by Means of the Finite Element Method, Journal of Engineering Mechanics, 131, 185-198.
- 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.
- 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.
- Drucker, D.C. ve Prager W., 1952. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design, Q. Applied Mathematics, 10, 2, 157-175.
- Elmalich, D. ve Rabinovitch, O., 2009. Masonry and monolithic circular arches strength ened with composite materials – A finite element Numune, 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.
- Hasol, D., 1998. Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü, s. 245, YEM Yayınları, İstanbul.
- 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.

Kuban, D., 1998. Mimarlık Kavramları, s. 47- 48, YEM Yayınları, İstanbul.

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 Numune, 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 University of Technology, Delft, Netherland.

LUSAS, 2013. Finite element analysiss of tware products. United Kingdom: finite element system, FEA Ltd.

Milani, G., Lourenço, P.B. ve Tralli, A. 2005-a. A Micro Mechanical Model for the Homogenized Limit Analysis of out-of-plane Loaded Masonry Walls, 10th International Conference on Civil, Structural Environmental Engineering Computing, Rome, Italy.

Milani, G., Lourenço, P.B. ve Tralli, A. 2005-b. A Simple Homogenized Micro Mechanical Model for the Analysis at the Collapse of out-of-plane Loaded Masonry Walls, XVII Congresso AIMETA di Meccacica Teorica e Applicata, 1-12, Frenze, Italy.

Milani, G. ve Bucchi, A., 2010. Kinematic FE homogenized limit analysis Numune for masonry curved structures streng thened 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.

Özkahraman, M., 1994. Anadolu Selçuklu Mimarisinde Kemerlerin Analitik İncelenmesi, s.3, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Pina-Henriques, J. ve Lourenço, P.B., 2004. Masonry Micro Modeling Adopted a Discontinuous Framework, Proceedings of Seventh International Conference on Computational Structures Technology, Lisbon, Portugal.

- Sab, K., 2003. Yield Design of Thin Periodic Plates by a Homogenization Technique an Application to Masonry Walls, *Comptes Rendus Mecanique*, 331, 641-645.
- 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.
- Tuğrülçü, Ş., 2014. Düşey yüklenen tuğla kemerlerdeki gergi çubukların davranışa etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, ASÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- TS EN 771-6, 2007. Kâgir birimler-özellikleri-bölüm 6: Doğal taş kâgir birimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-1, 2012. Kâgir birimler-deney yöntemleri-bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772-6, 2004. Kâgir birimler-deney metodları-bölüm 6: Beton kâgir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-11, 2000. Kâgir harcı-deney metodları-bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN ISO 6892-1, 2011. Metalik malzemeler-çekme deneyi-bölüm 1: Oda sıcaklığında deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ural, A., 2009. Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ünal, Ö.Ç., 2007. Bilecik-Osmaneli (Lefke’de) Hagios Georgios Rum Kilisesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünay, A. İ., 2002. Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı, s. 56, ODTÜ Mimarlık Fak. Basım İşliği, Ankara.
- Zucchini, A. ve Lourenço, P.B. 2002. A Micro Mechanical Model for the Homogenization of Masonry, *International Journal of Solids and Structures*, 39, 3233-3255.
- URL-1 < <https://gezievreni.com/stonehenge-hakkinda-bilgiler/>>, Erişim tarihi: 10.06.2018.
- URL-2 < <http://www.totalwarturkiye.com/twforum/index.php?topic=28391.0>>, Erişim tarihi: 13.11.2014.
- URL-3 < <http://imeryapi.com.tr/wp-content/uploads/CONCRETSIVE1406.pdf>>, Erişim tarihi: 6.11.2014.

URL-4 < http://tur.sika.com/tr/solutions_products/02/02a015/02a015sa11/02a015sa11300/02a015sa11301.html>, Erişim Tarihi: 12.11.2014



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Mehtap SANCAR
Adres : Büyük Bölcek Mh. 40. Cad. Çakır Apt. Kat:1 No: 2
Merkez/AKSARAY
E-posta adresi : msancar6155@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, 2007-2012
Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, 2013-2018

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. İz Yapı Denetim/ Yaz Stajı
2. Su Proje Ofisi/ Yaz Stajı
3. Başak Su Yapıları Denetim
4. Aytu Yapı Denetim
5. İkien Mühendislik

