

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**TARİHİ YIĞMA YAPILARIN GÜVENLİKLERİNİN
ANALİTİK VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE
BELİRLENMESİ**

Emre ERCAN

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 624.03.00

Sunuş Tarihi: 08 / 10 / 2010

Bornova-İZMİR

2010

Emre Ercan tarafından DOKTORA tezi olarak sunulan “**Tarihi Yiğma Yapıların Güvenliklerinin Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 08.10.2010 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Serap Kahraman


.....

Raportör Üye : Yrd. Doç Dr. Ayhan Nuhoglu


.....

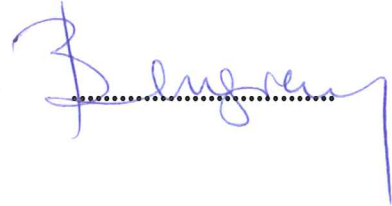
Üye : Prof. Dr. Alemdar Bayraktar


.....

Üye : Doç. Dr. Hasan Yıldız


.....

Üye : Yrd. Doç Dr. Bengi Arısoy


.....

ÖZET

TARİHİ YIĞMA YAPILARIN GÜVENLİKLERİNİN ANALİTİK VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

ERCAN, Emre

Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Ayhan NUHOĞLU

Ekim 2010, 223 sayfa

Bu tez çalışmasında, tarihi yığma yapıların güvenliklerinin belirlenmesinde kullanılan analitik ve deneysel yöntemlerin, İzmir’de bulunan iki örnek yapıda uygulaması yapılmıştır.

Tarihi yığma yapıların malzeme özelliklerini belirlemede kullanılan deneysel yöntemler, Vezir Su Kemer ve Urla Zeytinler Köyü’nde bulunan tarihi taş kemer köprüde uygulanmıştır. Yapıların malzeme özelliklerini belirlerken yapılar üzerinde tarihsel inceleme, tahribatlı ve tahribatsız malzeme testleri, dinamik inceleme, darbe-eko yöntemleri uygulanmıştır. Yapıların bulunduğu bölgelerde ise, zemin incelemeleri ile mikrotremor ölçümler yapılmış ve bölgelerin depremselliği incelenmiştir.

Yapıların taşıyıcı sistemini oluşturan taş, tuğla ve harç üzerinde yapılan malzeme testleri ile malzeme parametreleri elde edilmiştir. Bu özellikler kullanılarak yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemi ile modal analizi yapılmış ve dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Ele alınan tarihi yapılara Operasyonel Modal Analiz uygulaması yapılmış ve deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Deneysel ve analitik yöntemlerle bulunan dinamik sonuçlar karşılaştırılarak, malzeme testlerinin yeterliliği irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlarla yapıların doğrusal olmayan statik analizleri ve dinamik analizleri gerçekleştirilerek, yapıların güvenilirliği araştırılmıştır. Böylece, İzmir ilinde bulunan iki tarihi yapı ile birlikte bu tür yapıların deprem davranışlarının belirlenmesi ve değerlendirilmesi konularında katkılar sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elemanlar yöntemi, tarihi yığma yapılar, Operasyonel Modal Analiz, darbe-eko, mikrotremorlar.

ABSTRACT

STRUCTURAL SAFETY DETERMINING OF HISTORICAL MASONRY STRUCTURES BY ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

ERCAN, Emre

PhD Thesis in Department of Civil Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ayhan Nuhoglu

October 2010, 223 pages

Within the scope of this thesis, the analytical and experimental methods available for determination of safety levels of historical buildings were applied to two historical masonry structures in Izmir.

Experimental methods were applied to the Vezir aqueduct and the historical masonry bridge in Urla Zeytinler village in order to determine the mechanical properties of the materials used in these structures. For gathering material properties; historical investigation, dynamic monitoring, impact-echo tests and destructive and non-destructive material tests were applied to the structures. For the soil survey of the region microtremor tests were conducted and predominant periods of the soils were gathered experimentally.

The material properties obtained by the experiments for the stone brick and mortar that make up the carrying system were used in the finite element model. The dynamic responses of the structures were analyzed by finite element software. Also structural operational modal tests were performed on these structures and the results obtained from the tests were compared with that of the finite element analyses. This comparison was used in assessment of the validity of the material properties and the tests conducted to obtain these properties. Furthermore by means of this study conducted on two historical structures of Izmir a contribution to earthquake analyses and assessment of masonry structures is made.

Keywords: Finite element method, historical masonry structures, Operational Modal Analysis, impact-echo, microtremors.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yakın ilgisini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ayhan Nuhoğlu'na, teşekkürü bir borç bilirim. Bilgi, öneri ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. Serap Kahraman ve Yrd. Doç. Dr. Bengi Arısoy'a teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarda bana destek olan ve karşılaştığım problemelerin çözümünde önemli katkıları olan, Prof. Dr. Alemdar Bayraktar, Dr. Ahmet Can Altunışık, Yrd. Doç. Dr. Barış Sevim, Arş. Gör. Temel Türker, Doç. Dr. Recep Yılmaz, Prof. Dr. Yalçın Koca, Doç. Dr. Hasan Yıldız, Yrd. Doç. Dr. Ninel Ata Alver, Arş. Gör. Cihat Yüksel, Prof. Dr. Necdet Türk, Dr. Tuğba Eskişar Tefci, Müh. Zafer Yenier, Y. Müh. Engin Ünal, Arş. Gör. Mehmet Erkek, Arş. Gör. Altan Karakuş ve Dr. Onur Kırılı'ya teşekkürü bir borç bilirim. Her zaman beni destekleyen tüm aile fertlerime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ.....	xxv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yığma Yapılar Üzerinde Yapılmış Önceki Çalışmalar	7
1.2. Tez Çalışmasının Gelişimi.....	10
2. YIĞMA YAPILARI OLUŞTURAN MALZEMELER	12
2.1. Doğal Yapı Taşları.....	12
2.1.1. Doğal yapı taşlarının sınıflandırılması.....	13
2.2. Tuğla ve Kerpiç	14
2.3. Bağlayıcı Harçlar	18
3. YIĞMA YAPILARIN NÜMERİK MODELLEMESİ.....	22
3.1. Yığma Yapıların Modelleme Stratejileri	22
3.1.1. Yükleme şekli	22
3.1.2. Yığma yapının malzeme özellikleri.....	23
3.1.3. Modelleme teknikleri.....	24
3.1.4. Kırılma şekilleri	35
3.1.5. Yığma yapıların analizinde süre-maliyet.....	37
4. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN İNCELENMESİNDE UYGULANAN YÖNTEMLER.....	38
4.1. Tarihsel İnceleme.....	38

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa No

4.2. Görsel İnceleme ve Röleve Çalışmaları.....	38
4.3. Uzun Dönem Gözlemleri	39
4.4. Arazi Testleri.....	40
4.4.1. Yassı kriko (yerinde basınç) deneyi.....	40
4.4.2. Yerinde kayma testi	42
4.4.3. Çekip çıkarma testi.....	43
4.4.4. Dinamik izleme	43
4.4.5. Kızılötesi termografi testi.....	52
4.4.6. Radyoaktif metotlar.....	53
4.4.7. Sonik (ultra ses) testler.....	53
4.4.8. Darbe-eko ve puls-eko yöntemleri	54
4.4.9. Georadar yöntem.....	59
4.4.10. Endoskopik yöntem.....	59
4.5. Yığma Yapıyı Oluşturan Birimler Üzerinde Yapılan Testler	59
4.5.1. Schmidt çekici testi	60
4.5.2. Tek eksenli basınç testi	61
4.5.3. Yarmada çekme (Brezilya) testi.....	62
4.5.4. Yoğunluk ve porozite testleri	63
4.5.5. Ultra ses darbe testi	64
4.5.6. Nokta yükü testi	66
4.5.7. X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve EDX testleri	68
4.6. Temel ve Zemin Araştırması.....	69
4.6.1. Zemin hakim periyodunun mikrotremor ölçümlerle belirlenmesi	69
4.7. Yığma Yapılara Uygulanan Testlerin Değerlendirilmesi	71
5. ÖRNEK OLAY ÇALIŞMASI: VEZİR SU KEMERİ VE ZEYTİNLER KÖPRÜSÜ	73
5.1. Yapıların Tarihsel İncelemesi ve Tanımı.....	73

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa No

5.1.1. Vezir Su Kemerı	73
5.1.2. Zeytinler Köprüsü	77
5.2. Yapıların Rölevelerinin Çıkarılması ve Üç Boyutlu Modellerinin Oluşturulması	79
5.3. Vezir Su Kemerini Oluşturan Malzemeler Üzerinde Yapılan Testler	82
5.3.1. Taşıyıcı sistemi oluşturan taşlar üzerinde yapılan testler	82
5.3.2. Su kemerinin kemerlerini oluşturan tuğla üzerinde yapılan testler	93
5.3.3. Su kemerini oluşturan harç üzerinde yapılan testler	96
5.4. Zeytinler Köprüsü'nü Oluşturan Malzemeler Üzerinde Yapılan Testler	107
5.4.1. Köprünün ayak ve yan duvarlarını oluşturan taşlar ile düzgün kesilmiş kemer taşları üzerinde yapılan testler	107
5.4.2. Köprü kemerini oluşturan taşların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ...	116
5.4.3. Köprüyü oluşturan harç üzerinde yapılan testler	116
5.5. Bölgesel Zemin Araştırmaları ve Sismik Risk Belirleme	125
5.5.1. Yapıların bulunduğu bölgelerin sismik risk durumu	125
5.5.2. Yapıların bulunduğu zeminlerin incelenmesi	134
5.5.3. Mikrotremör ölçümler	135
5.6. Dinamik İzleme	141
5.6.1. Yapıların OMA ile dinamik parametrelerinin belirlenmesi	142
5.7. Darbe- eko metoduyla yapıların test edilmesi	155
6. VEZİR SU KEMERİ VE ZEYTİNLER KÖPRÜSÜ'NÜN SONLU ELAMANLAR YÖNTEMİ İLE ÜÇ BOYUTLU ANALİZLERİ	161
6.1. Drucker-Prager Malzeme Modeli	166
6.2. Yapıların 3 Boyutlu Katı Modellerinin FEM Analizi İçin Hazırlanması	168
6.3. Yığmalara Ait Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi	171
6.3.1. Vezir Su Kemerı'ne ait yığma parametrelerinin belirlenmesi	173

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa No

6.3.2. Köprü'ye ait yığma parametrelerinin belirlenmesi	175
6.4. Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi	177
6.4.1. Su kemeri modal analiz ve sonlu elemanlar model iyileştirmesi.....	177
6.4.2. Kemer köprü modal analiz ve sonlu elemanlar model iyileştirmesi.....	181
6.5. Yapıların Ölü Yük Altında Analizi	186
6.5.1. Vezir Su Kemerı ölü yük analizi.....	186
6.5.2. Kemer köprü ölü yük analizi.....	189
6.6. Yapıların Davranış Spektrumu Analizi.....	191
6.6.1. Vezir Su Kemerı davranış spektrumu analizi	193
6.6.2. Zeytinler Köprüsü davranış spektrumu analizi	198
6.7. Yapıların Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizi	202
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	209
KAYNAKLAR DİZİNİ	212
ÖZGEÇMİŞ	223

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
1.1. Jericho kenti ve Jericho’da bulunan kerpiç kule.....	2
1.2. Kılıçaslan Camii Selçuk İzmir.....	4
1.3. Alliano kazı alanı ve Alliano Köprüsü	4
1.4. Kızılçullu Su kemerleri Buca İzmir.....	5
1.5. Dandalas Köprüsü Karacasu Aydın.....	5
1.6. Dicle (Silvan) Köprüsü	6
1.7. Büğrüm Köprüsü Köprülü Kanyon	6
2.1. İran'daki Çoga Zanbil Zigguradı.....	15
2.2. Babil’de bulunan Alay Yolu ve İştar Kapısı	16
2.3. Düşey yükler altında kemer sistemde ve kirişte meydana gelen gerilme dağılımı.....	17
3.1. Yığma yapıların modellemesinde kullanılan kıstaslar.....	22
3.2. Yığma yapıların maruz kaldığı yükleme durumları.....	23
3.3. Yığma yapıların malzeme özellikleri.....	23
3.4. Yığma yapıların modelleme teknikleri	24
3.5. Ayırık modellemede yığmayı oluşturan elemanlar.....	25
3.6. Yığma yapıların modellenmesi.....	26
3.7. Ayırık modellemede mikro model; blok, harç ve arayüz elemanları	27
3.8. Mikro model ile eksenel ve yatay yük etkisi altında yığma bir duvarda oluşan çatlaklar	28
3.9. Harç birleşim bölgelerinin çökme şartı grafiği.....	28
3.10. Harç birleşim bölgelerinin çökme şartı grafiği	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
3.11. Deneysel ve çeşitli FEM programları ile analiz edilmiş modelin karşılaştırılması	31
3.12. Yığma yapılar için kompozit ortotropik akma yüzeyi	33
3.13. Ganz ve Thürlimann (1984) yapmış olduğu deney düzeneği	34
3.14. Lourenço'nun modelinde nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	34
3.15. Yığma yapıların kırılma şekillerinin sınıflandırılması.....	35
3.16. Yığma yapıların kırılma (göçme) mekanizmaları	36
3.17. Yığma yapıların analizinde süre ve maliyeti etkileyen faktörler	37
4.1. Tekli ve ikili yassı krikonun yığmaya yerleştirilme şeması.....	41
4.2. Yassı krikonun yığmaya yerleştirilmesi, tekli yassı kriko deneyinin tuğla yığma yapı için uygulama şeması	41
4.3. İkili yassı kriko deneyinin taş yığma yapıda uygulama şeması taş yığma yapıda ikili yassı kriko deneyinin yapılışı.....	42
4.4. Mevcut yığma duvarda kayma testi uygulama şeması.....	42
4.5. Mevcut yığma duvarda çekip çıkarma testi	43
4.6. İvmeölçerler	44
4.7. Hidrolik titreştirici ve hidrolik donanımı	45
4.8. Operasyonel Modal Analiz uygulaması.....	45
4.9. Teorik ve deneysel modal analiz işlem sırası.....	47
4.10. Deneysel modal analiz işlem sırası	47
4.11. Operasyonel Modal Analiz işlem sırası	48
4.12. Ultra ses ile doğrudan ve dolaylı olarak ölçüm yapma.....	54
4.13. Ultra ses ile çatlak derinliği ve çatlak yönünü belirleme	54
4.14. Beton testinde kullanılan şematik bir puls-eko yöntemi.....	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa No</u>
4.15. Darbe-eko yöntemine ait bir diyagram	56
4.16. Spektral görüntüleme modeli.....	58
4.17. Schmidt çekici testi (L tipi)	61
4.18. Karot numunelerinin laboratuarda alınması	61
4.19. Karot numunelerinin kesilmesi, hazırlanmış numuneler ve basınç testi.....	62
4.20. Yarmada çekme testi ve kırılmış numune	63
4.21. Ultra ses cihazı ve ölçümü	64
4.22. Nokta yükü test cihazı	66
4.23. Zemin hakim periyodunun tespiti ve 3 eksenli mikrotremor cihazı.....	71
5.1. Vezir Su Kemerı	74
5.2. Vezir Su Kemerı Doğu Cephesi	74
5.3. Vezir Su Kemerı su yolu	75
5.4. İzmir'e su ileten başlıca su yollarının geçkileri.....	75
5.5. Vezir Su Kemerı kuzey bölümü ve güney bölümleri	76
5.6. Tuğla kemer	77
5.7. Vezir Su Kemerı kuzey tarafında bulunan ve kemer enince uzanan çatlaklar.....	77
5.8. Zeytinler Köprüsü	78
5.9. Zeytinler Köprüsü	79
5.10. Zeytinler Köprüsü AutoCAD çizimi	80
5.11. Zeytinler Köprüsü 3-boyutlu katı modeli	80
5.12. Vezir Su Kemerı 3-boyutlu katı modeli.....	81
5.13. Karot alma ve numunelerin kesilmesi	82
5.14. Hazırlanmış karot numuneleri	83

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
5.15. Vezir Su Kemerı Schmidt çekici testi ve kalibrasyon kovası	83
5.16. Yüzey sertliği ve basınç mukavemeti arasındaki ilişki.....	84
5.17. Ultra ses darbe testi	85
5.18. Etüvde kurutulan numuneler ve Arşimet terazisi.....	86
5.19. Deplasman kontrollü ve yük kontrollü yükleme cihazları	87
5.20. Yarmada çekme testi.....	87
5.21. Su kemerı taşlarına ait porozite-basınç mukavemeti arasındaki ilişki.....	88
5.22. Su kemerı taşlarına ait porozite-çekme mukavemeti arasındaki ilişki.....	88
5.23. Su kemerı taşlarına ait porozite-ultra ses hızı arasındaki ilişki.....	89
5.24. Su kemerı taşlarına ait ultra ses hızı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki	89
5.25. Su kemerı taşlarına ait ultra ses hızı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki	90
5.26. Su kemerı taşlarına ait ultra ses hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki.....	90
5.27. Su kemerı taşlarına ait yüzey sertliği ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki	91
5.28. Su kemerı taşlarına ait yüzey sertliği ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki	91
5.29. Su kemerı taşlarına ait yüzey sertliği ile elastisite modülü arasındaki ilişki	92
5.30. Su kemerı taşlarına ait basınç mukavemeti ile elastisite modülü arasındaki ilişki	92
5.31. Tuğlaya uygulanan Schmidt testi	93
5.32. Ultra ses darbe testi	94
5.33. Etüvde kurutulan numuneler	94

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa No</u>
5.34. Deplasman kontrollü yükleme cihazı	95
5.35. Yarmada çekme testi	96
5.36. Hazırlanmış karot numuneleri	107
5.37. Kemer köprü Schmidt çekici testi.....	108
5.38. Ultra ses darbe testi.....	109
5.39. Porozite-basınç mukavemeti arasındaki ilişki	111
5.40. Porozite-çekme mukavemeti arasındaki ilişki	111
5.41. Porozite-ultra ses hızı arasındaki ilişki	112
5.42. Ultra ses hızı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki.....	112
5.43. Ultra ses hızı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki.....	113
5.44. Ultra ses hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki.....	113
5.45. Yüzey sertliği ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki	114
5.46. Yüzey sertliği ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki	114
5.47. Yüzey sertliği ile elastisite modülü arasındaki ilişki	115
5.48. Basınç mukavemeti ile elastisite modülü arasındaki ilişki.....	115
5.49. İzmir ve yakın çevresindeki tarihsel dönem depremlerinin diri fay haritası üzerindeki dağılımı	126
5.50. İzmir ve çevresinde son yüzyılda meydana gelmiş kuvvetli depremler	127
5.51. Torbalı depreminin etki alanı.....	127
5.52. İzmir ve çevresinde meydana gelmiş diğer bazı depremlere ilişkin makrosismik haritalar	128
5.53. Vezir Su Kemerinin ve Zeytinler Köprüsü'nün yerlerinin uydudan görünümü	129

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
5.54. Vezir Su Kemerî'nin, ve Zeytinler Köprüsü'nün yakınında bulunan İzmir fayı ve Gülbahçe (Karaburun) fayı.....	129
5.55. İzmir için beklenen depremlerin MSK şiddet haritası	131
5.56. İzmir için beklenen depremlerin etkin yer ivme haritası	131
5.57. İzmir jeoloji haritası	135
5.58. Vezir Su Kemerî mikrotremor ölçümü	136
5.59. Zeytinler Köprüsü mikrotremor ölçümü	136
5.60. CMG-5 tipi üç bileşenli dijital ivmeölçer cihazı.....	137
5.61. Su kemerî civarı mikrotremor ölçümler ve ölçüm sonucu belirlenen hakim frekans aralığı.....	138
5.62. Su kemerî civarı mikrotremor ölçümler ve ölçüm sonucu belirlenen hakim frekans aralığı.....	139
5.63. Köprü civarı mikrotremor ölçümler ve ölçüm sonucu belirlenen hakim frekans aralığı.....	140
5.64. Köprü civarı mikrotremor ölçümler ve ölçüm sonucu belirlenen hakim frekans aralığı.....	141
5.65. Vezir Su Kemerî, OMA testi için ivmeölçerlerin yerleşim şeması.....	143
5.66. 0-50 Hz aralığındaki titreşimlere duyarlı, 10 V/g hassasiyetinde ivmeölçer.....	144
5.67. İvmeölçerler ve veri toplama cihazı arasında iletimi sağlayan kablolar.....	144
5.68. Su kemerine ivmeölçerlerin yerleştirilmesi	145
5.69. Vezir Su Kemerî için, ivmeölçerlerden alınan veri.....	145
5.70. Vezir Su Kemerî için, SSI yöntemiyle elde edilen stabilizasyon diyagramı	146

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
5.71. Vezir Su Kemerı için, Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler.....	146
5.72. Deneysel Modal analiz yöntemine göre su kemerinin ilk dört mod şekli ve PP yöntemine göre frekans değerleri.....	147
5.73. Kemer köprü 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli	149
5.74. 0–50 Hz aralığındaki titreşimlere duyarlı, 10 V/g hassasiyetinde ivmeölçer	149
5.75. Kemer köprü OMA testi için ivmeölçerlerin yerleşim şeması	149
5.76. Zeytinler Köprüsü referanslı ölçüm için ivmeölçerlerin yerleşim şemaları.....	150
5.77. İvmeölçerler ve veri toplama cihazı arasında iletimi sağlayan kablolar	150
5.78. Köprüye ivmeölçerlerin yerleştirilmesi ve veri toplama cihazı.....	151
5.79. Zeytinler Köprüsü referanssız ölçüm için ivmeölçerlerden alınan veri.....	151
5.80. Zeytinler Köprüsü referanssız ölçüm için, SSI yöntemiyle elde edilen stabilizasyon diyagramı	152
5.81. Zeytinler Köprüsü için, Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler.....	152
5.82. Zeytinler Köprüsü referanslı ölçüm için, SSI yöntemiyle elde edilen stabilizasyon diyagramı	152
5.83. Zeytinler Köprüsü referanslı ölçüm için, Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler	153
5.84. Deneysel Modal analiz yöntemine göre köprünün ilk dört mod şekli ve PP yöntemine göre frekans değerleri	154
5.85. Vezir Su Kemerı üzerinde darbe-eko testi.....	155
5.86. Zeytinler’de bulunan kemer köprü üzerinde darbe-eko testi.....	156

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
5.87. Su kemerinin Kuzey yönün ilk kemerinin test sonucu	157
5.88. Su kemerinin Kuzey yığma duvarındaki çatlak derinliğinin tespiti.....	158
5.89. Darbe-eko testinin köprü ayaklarında uygulanması.....	159
5.90. Köprü kemeri darbe-eko testi.....	159
5.91. Köprü kemeri darbe-eko testi.....	160
6.1. Altı yüzlü Hex eleman	162
6.2. Drucker-Prager kriteri	167
6.3. Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması,	168
6.4. Vezir Su Kemerini oluşturan yığma taş duvarlar, payandalar ve yığma tuğla kemerler	169
6.5. Vezir Su Kemerini üç boyutlu katı modeli	169
6.6. Zeytinler Köprüsü yan duvarlar ve taşıyıcı kolon ayaklar	170
6.7. Zeytinler Köprüsü dolgu malzemesi	170
6.8. Zeytinler Köprüsü bozunmuş andezit (yumuşak taş) taşından oluşan kemer.....	171
6.9. Zeytinler Köprüsü	171
6.10. Su kemeri Mod 1	177
6.11. Su kemeri Mod 2, Mod 3 ve Mod 4	178
6.12. Su kemeri Mod 5, Mod 6 ve Mod 7	179
6.13. Su kemeri Mod 8, Mod 9 ve Mod 10	180
6.14. Kemer köprü Mod 1, Mod 2 ve Mod 3 mod şekilleri	182
6.15. Kemer köprü Mod 4, Mod 5 ve Mod 6 mod şekilleri	183
6.16. Kemer köprü Mod 7, Mod 8 ve Mod 9 mod şekilleri	184
6.17. Kemer köprü Mod 10 mod şekli	185
6.18. Su kemerinin ölü yük altında yaptığı deformasyon	187

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa No</u>
6.19. Su kemeri ölü yük altında S11 gerilmeleri	187
6.20. Su kemeri ölü yük altında S22 gerilmeleri	188
6.21. Su kemeri ölü yük altında S33 gerilmeleri	188
6.22. Su kemeri ölü yük altında SMaks gerilmeleri	189
6.23. Su kemeri ölü yük altında SMin gerilmeleri.....	189
6.24. Köprünün ölü yük altında yaptığı deformasyon	190
6.25. Köprünün ölü yük altında S11 gerilmeleri	190
6.26. Köprünün ölü yük altında S22 gerilmeleri	191
6.27. Köprünün ölü yük altında S 33 gerilmeleri	191
6.28. Spektrum katsayısı.....	192
6.29. Su kemeri X yönündeki spektral etki sonucu oluşan deformasyon.....	194
6.30. Su kemeri X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S11 gerilmeleri.....	194
6.31. Su kemeri X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S22 gerilmeleri.....	195
6.32. Su kemeri X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S33 gerilmeleri.....	195
6.33. Su kemeri Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan deformasyon.....	196
6.34. Su kemeri Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S11 gerilmeleri.....	196
6.35. Su kemeri Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S22 gerilmeleri.....	197
6.36. Su kemeri duvar-kemer birleşim yerindeki mevcut çatlak.....	197
6.37. Su kemeri Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S33 gerilmeleri.....	198
6.38. Köprü X yönündeki spektral etki sonucu oluşan deformasyon	199
6.39. Köprü X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S11 gerilmeleri	199
6.40. Köprü X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S22 gerilmeleri	200
6.41. Köprü X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S33 gerilmeleri	200
6.42. Köprü Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan deformasyon	201
6.43. Köprü Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S11 gerilmeleri	201

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**Sekil****Sayfa No**

6.44. Köprü Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S22 gerilmeleri	202
6.45. Köprü Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S33 gerilmeleri	202
6.46. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Düzce Doğu-Batı bileşeni kaydı.....	203
6.47. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Düzce Kuzey-Güney bileşeni kaydı.....	203
6.48. Su kemeri 2. kemerin kilit taşında zamana karşılık gelen X yönü deplasmanı	204
6.49. Su kemeri 2. kemerin çatlak bölgesinde zamana karşılık gelen X yönü deplasmanı	204
6.50. Su kemeri 2. kemerin kilit taşında zamana karşılık gelen S11 gerilmesi.....	205
6.51. Su kemeri 2. kemerin kilit taşında zamana karşılık gelen S22 gerilmesi.....	205
6.52. Su kemeri 2. kemerin kilit taşında zamana karşılık gelen S33 gerilmesi.....	206
6.53. Köprü orta kemeri kilit taşları zamana karşılık gelen Y yönü deplasmanı	207
6.54. Köprü orta kemer kilit taşında zamana karşılık gelen S11 gerilmesi	207
6.55. Köprü orta kemer kilit taşında zamana karşılık gelen S22 gerilmesi	208
6.56. Köprü orta kemer kilit taşında zamana karşılık gelen S33 gerilmesi	208

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa No</u>
3.1. Yığma yapılar için mikro ve makro modelleme tekniklerinin kıyaslanması	27
5.1. Vezir Su Kemer Schmidt testi değerleri	97
5.2. Vezir Su Kemer taş karotların basınç mukavameti, ultra ses, yoğunluk- porozite test sonuçları	98
5.3. Vezir Su Kemer taş karotların çekme mukavameti, ultra ses, yoğunluk- porozite test sonuçları	101
5.4. Vezir Su Kemer kemer tuğlaları üzerinde yapılan Schmidt testi	103
5.5. Vezir Su Kemer kemer tuğlaları basınç, ultra ses ve yoğunluk porozite testleri	104
5.6. Vezir Su Kemer kemer tuğlaları çekme, ultra ses ve yoğunluk porozite testleri	105
5.7. Vezir Su Kemer harç nokta yükü testi.....	106
5.8. Kemer köprü Schmidt çekici testi.....	117
5.9. Kemer köprü basınç, ultra ses, yoğunluk porozite testleri.....	119
5.10. Kemer köprü çekme, ultra ses, yoğunluk porozite testleri	122
5.11. Kemer köprü harç numunler nokta yükü testi	124
5.12. İzmir ve yakın çevresinde tarihsel dönemde hasara yol açmış büyük depremler	132
5.13. İzmir ve yakın çevresinde son yüzyılda gelişmiş büyük depremler	133
5.14. Su kemeri 1. ölçüm için deneysel ve teorik frekans değerleri.....	146
5.15. Su kemeri 2. ölçüm için deneysel ve teorik frekans değerleri.....	147

TABLÖLAR DİZİNİ (devam)**Tablo****Sayfa No**

5.16. Su kemeri ilk 5 moduna ait deneysel ve teorik frekansların kıyaslanması.....	147
5.17. Kemer köprü referanssız ölçüm için deneysel ve teorik frekans değerleri	153
5.18. Kemer köprü referanslı ölçüm için deneysel ve teorik frekans değerleri ...	154
5.19. Kemer köprü ilk moduna ait deneysel ve teorik frekansların kıyaslanması.....	154
6.1. Vezir Su Kemer Malzeme Parameterleri	174
6.2. Köprüye ait Malzeme Parameterleri	176
6.3 . Su kemerinin analitik ve deneysel frekansların karşılaştırılması.....	181
6.4 Su kemerinin sonlu elemanlar iyileştirmesinden sonra elde edilen malzeme parameterleri	181
6.5. Köprünün analitik ve deneysel frekansların karşılaştırılması	185
6.6. Köprünün sonlu elemanlar iyileştirmesinden sonra elde edilen malzeme parameterleri	186

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Acıklama</u>
A	Konik uçların değme noktalarından geçen örnek düzlemin en küçük kesit alanı.
A_c	Durum matrisi.
α_o	Pürüzlülük açısı.
B_c	Girdi matrisi.
C	Çıktı matrisi.
c	Kohezyon dayanımı.
C^*	Sönümleme matrisi.
C_p	Boyuna dalga hızı.
D	Çıktı matrisi.
D_e	Eşdeğer karot çapı.
d_h	Hacimsel kütle (Görünür yoğunluk).
d_o	Özgül ağırlık (Gerçek yoğunluk).
Δt	Kaydedilmiş dalga hızı örneklem zamanı.
E	Elastisite modülü sabiti.
f	Frekans.
f_c	Tek eksenli basınç kırılma yükü.
$f_{yç}$	Yarmada çekme mukavemeti.
Φ	İçsel sürtünme açısı.
Φ_1, Φ_2	Elastik ve plastik bölgeyi ayıran limit fonksiyonları.
Ψ_k	k. mod şekli vektörü.
G	Kayma modülü.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
G_k	Kuru ağırlık.
G_{ds}	Doygun haldeki numunenin su içindeki kütlesi.
G_{dh}	Doygun haldeki numunenin havadaki kütlesi.
$G_{xx}(w)$	Etki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu.
$G_{yy}(w)$	Tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu.
H	Frekans davranış fonksiyonu.
I_s	Yükleme dayanımı.
K	Rijitlik matrisi.
L	Numune yüksekliği.
M	Kütle matrisi.
m	Poisson oranı.
μ	Dilatasyon açısı.
P	Porozite.
P_k	Kırılma Yüğü.
R	Yüzey sertlik değeri.
ρ	Numune kütle yoğunluğu.
S_i, s_{ij}	Tekil değeerlerden oluşan diyagonal matris.
T_p	Basınç ultra ses dalgasının numune içinden geçiş süresi.
T_s	Kayma ultra ses dalgasının numune içinden geçiş süresi.
U_i, u_{ij}	Tekil vektörlerden oluşan birim matris.
V	Ultra ses dalga hızı.
ν_{dyn}	Poisson oranı.
V_p	Basınç ultra ses darbe hızı.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
V_s	Kayma ultra ses darbe hızı.
v_k	Sensördeki belirsizliklere bağlı ölçüm gürültüsü.
w_n	Doğal açısal frekanslar.
<u>Kısaltmalar</u>	
<i>CQC</i>	Tam Karesel Birleştirme.
<i>DEM</i>	Ayrık eleman metodu.
<i>EDX</i>	Enerji dağılımlı X-Işını.
<i>FEMDE</i>	Süreksiz elemanlı sonlu eleman yöntemi.
<i>FFT</i>	Hızlı Fourier Dönüşümü.
<i>FRF</i>	Frekans tepki fonksiyonu.
<i>NExT</i>	Doğal Uyarma Metodu.
<i>OMA</i>	Operasyonel Modal Analiz.
<i>PP</i>	Piklerin Seçimi.
<i>SEM</i>	Taramalı elektron mikroskobu.
<i>SSI</i>	Stokastik altalan belirleme.
<i>XRD</i>	X-Işını difraksiyonu.

1. GİRİŞ

İnsanoğlu ihtiyaç duyduğu yapıları inşa ederken, daha çok yaşadığı coğrafyada bulabileceği yapı malzemelerini tercih etmiştir. Esas olarak taş malzemesinin kullanıldığı yığma yapılar tarih boyunca ayakta kalabilmiş ve günümüze kadar gelebilmiştir. Son çeyrek asırda yığma yapıyı oluşturan malzemelerde önemli gelişmeler sağlanmışsa da, yığma yapıyı oluşturma tekniği ilk günden bugüne aynı prensibe dayanır.

Yığma yapı sisteminin en önemli özelliği onun basitliğidir. Taş veya tuğla bloklarının üst üste harçlı veya harçsız olarak yerleştirilmesi oldukça pratik bir uygulamadır. Diğer önemli bir özelliği ise estetik üstünlüğüdür. Günümüzde bile birçok yapı estetik görünmesi için yığma olarak yapılmaktadır. Yığma yapıların diğer temel karakteristik özellikleri; sağlamlık, durabilite, az bakım gereksinimi, ses ve ısı yalıtımı, yangına karşı dayanıklılık ve çok amaçlı kullanılabilirleridir.

Günümüzde ekonomik yönden zayıf olan her bölgede, yığma yapılar ile ucuz barınma imkanı sağlanır. Ancak yığma yapıların kontrolsüz yapılması, yeterli tasarım kurallarının olmaması, bu yapıların sismik kuvvetlere karşı dayanıklı olmasını engeller.

Arkeolojik araştırmalar sonucunda en eski yığma yapılara M.Ö. 10.000 – 8.000 yıllarında İsrail'in Hullen Gölü çevresinde rastlanmıştır (Lourenço, 1996). Bu yapılar harçsız taş ile örülmüş, yarısı toprağa gömülü, 3 ila 9 m çaplı dairesel kesitli barakalardır. Konutların bulunduğu ilk büyük kent Konya Çatalhöyük'tür. Konya Çatalhöyük'te, M.Ö. 6.500–7.000 yıllarında kerpiç tuğlalardan yapılmış 25- 30 m²'lik evler ortaya çıkarılmıştır (Sevin, 1999; Hodder, 1996). M.Ö. 2800–2000 yıllarında Mısır'ın Giza Platosunda piramitler firavun mezarları olarak inşa edilmiştir. Piramitler büyük blok taşların üst üste yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur ve en büyüğü Keops Piramidi olup 138 m yüksekliğindedir. M.S. 0–1200 yıllarında Roma mimarisinin gelişmesiyle, yığma yapılardan formlarını bularak, tapınaklar, saraylar, su kemerleri, köprüler vb. inşa edilmiştir. M.S. 1300 yılında Osmanlı mimarisi gelişerek Anadolu'ya ve Avrupa'ya birçok eser kazandırmıştır. Aynı dönemde Avrupa'da da Gotik mimari gelişerek birçok yığma yapı yapılmıştır (Straub, 1964).

İlk yığma yapıların taştan yapıldığı düşünülmektedir. Ancak taşa şekil vermek zor olduğu için sonraları güneşte kurutulmuş kil tuğladan yapılar inşa edilmiştir. Filistin'in Jericho şehrinde, M.Ö. 8350 ila 7350 yılları arasında güneşte kurutulmuş çamurdan yapılmış tuğlalardan (kerpiç) inşa edilmiş yuvarlak ve oval şekilli 5 m çapında kuleler bulunmuştur (Şekil 1.1). Bu evlerde kullanılan tuğlalar somun şeklindedir ve tuğlaların dışbükey yüzlerinde oyuklar mevcuttur. Bu oyuklar kilden yapılan harç için sürtünme yüzeyini arttırıyordu. Taş yerine toprak tuğla kullanılması birçok avantaj getirmiştir. Tuğlaya şekil vermek kolaydı ve tuğla taşa göre daha hafifti. Mısır'da M.Ö. 5000 yılından M.S. 50 Roma işgaline kadar ana yapı malzemesi olarak Nil nehrinden çıkarılan çamurdan yapılmış ve güneşte kurutulmuş kerpiç tuğlalar kullanılmıştır (Türkteki, 2010; Tuğla ve Kiremit Sanayicileri Derneği, 2010).



Şekil 1.1. Jericho kenti ve Jericho'da bulunan kerpiç kule (Türkteki, 2010)

Genel olarak bakıldığında yığma yapı tarzı günümüzde de kullanılan en eski yapı sistemidir.

Tarihi yığma yapıları oluşturan ana malzemeler taş, tuğla ve bunları birbirine bağlayan harçtır. Bu malzemelerle inşa edilen ve yapının taşıyıcı sistemini oluşturan sistemler; kubbe, tonoz, kemer, sütun ve duvarlardır. Tarihi yapıların servis sürelerini belirleyen iki ana etken; zemin problemleri ve depremdir. Bunların yanında çevre ve doğa şartları, insanların neden olduğu hasarlar bu süreci ikinci derecede etkileyen faktörlerdir. Uzun yıllar ayakta kalabilmeyi başarmış bir yapı için, genellikle zemin-yapı etkileşiminin belli bir dengeye ulaştığı düşünülür ve dışarıdan bir müdahale yoksa fazla bir zemin hareketi beklenmez. Ancak, depremlerin geçmişte pek çok tarihi yapıyı yıktığı

düşünülürse, ağır kütleyle sahip bu yapılar için her zaman büyük bir tehlike olduğu unutulmamalıdır. Dünyada yılda, yapılarda olumsuz sonuçlara neden olan ortalama 700 adet deprem meydana gelmektedir. Depremlerin oluşmasını önlemek veya oluşacağı zamanı tespit etmek mümkün olmamakla birlikte, yaratacağı hasarları asgariye indirmek için önlemler alınabilmektedir.

Yığma yapılar, genel olarak depreme karşı klasik betonarme ya da çelik yapılara göre daha az dayanıklıdır. Az gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde, kırsal kesimde ve şehirlerin kontrolsüz yapılaşan bölgelerinde konutlar; taş, kerpiç, briket veya pişmiş toprak tuğlalardan yığma yapı şeklinde inşa edilmektedir. Bu yapılar, deprem gibi yatay yükler altında iyi dayanım gösterememektedir. İran'da (6 Ocak 2004 Bam depremi) ve Türkiye'de (17 Eylül 1999 Kocaeli ve 24 Kasım 1999 Düzce depremleri) meydana gelmiş olan depremlerde özellikle kırsal kesimlerde can kaybı büyük olmuştur. Özellikle az gelişmiş ülkelerin kırsal kesimlerinde, çatı toprak olarak yapılmakta, her mevsim bu çatılar üzerine yeni toprak tabakası serilerek sıkıştırılmakta ve çatı iyice ağırlaşmaktadır. Bu ağır çatının deprem esnasında kullanıcıların üzerine göçmesi, büyük felaketlere neden olmaktadır. Yığma yapıyı oluşturan; taş, tuğla, kerpiç, harç ve beton gibi malzemelerin basınç dayanımları, çekme dayanımına kıyasla yüksektir. Bu malzemeler gevrek olduklarından dolayı, basınç ve çekme etkisine maruz kaldıkları zaman çok az bir deformasyona uğrarlar. Deprem kuvvetlerinden veya zeminde meydana gelen değişikliklerden doğan çekme gerilmelerini karşılayamazlar. Çekme gerilmelerini karşılayamayan taşıyıcı elemanlarda, çekme çatlakları meydana gelir. Deprem hareketiyle birlikte bu çatlakların yönleri veya çatlak şekilleri; yapının işçiliğine, kullanılan malzemelere ve duvarlardaki boşluk alanlarına göre değişiklikler gösterir. Bu tür çatlaklar genellikle pencere ve kapı boşlukları çevresindeki bölümlerde meydana gelir. Yığma yapılarda deprem hareketleriyle meydana gelen bu çatlakların veya diğer hasarların giderilmesi için, çeşitli güçlendirme yöntemleri uygulanmaktadır.

Anadolu coğrafyası, tarihte birçok medeniyete ev sahipliği yapmış olduğundan, bu bölgede birçok tarihi yığma yapı mevcuttur. 14. Yüzyılda inşa edilmiş İzmir Selçuk'ta bulunan Kılıçaslan Camii (Şekil 1.2), Antik Şehir Alliano'i'de bulunan (Bergama, İzmir) M.Ö. III. Yüzyıla ait Alloini Köprüsü (Şekil 1.3), İzmir Buca'da Melez Çayı üzerinde bulunan Roma yapısı Kızılçulla Su Kemerleri (Şekil 1.4), Aydın Karacasu'da bulunan Dandalas Köprüsü (Şekil 1.5), Dicle Nehri üzerinde bulunan Silvan Köprüsü (Şekil 1.6), Köprülü kanyonda bulunan Büğrüm Köprüsü (Şekil 1.7) bu yapılara birkaç örnektir.



Şekil 1.2. Kılıçaslan Camii Selçuk İzmir (14. yy.)



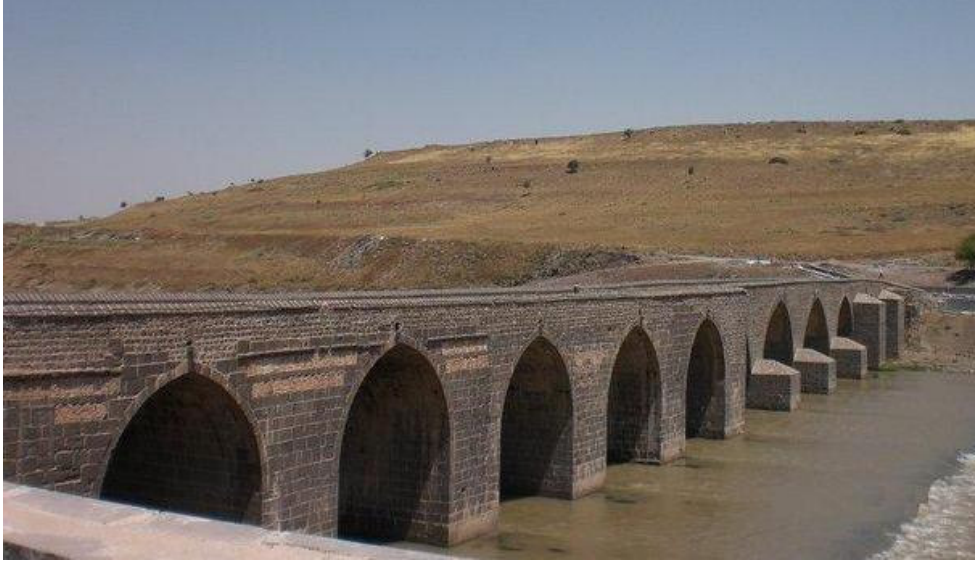
Şekil 1.3. Allianoi kazı alanı ve Allianoi Köprüsü (2-3 yy.)



Şekil 1.4. Kızılçullu Su kemerleri Buca İzmir (M.Ö. 1. yüzyıl) (Wowturkey, 2010)



Şekil 1.5. Dandalas Köprüsü Karacasu Aydın



Şekil 1.6. Dicle (Silvan) Köprüsü (1065)



Şekil 1.7. Büğrüm Köprüsü Köprülü Kanyon

Anadolu’da sayısız yığma yapı inşa edilmiştir ancak; bu yapıların birçoğu erozyonla toprak altında kalmış, meydana gelen depremlerle yıkılmış ya da başka yığma yapıların yapımı için devşirilmiştir.

Son yüz yılda tarihi yapıların ortaya çıkarılması, onarılması ve korunması bilinci artan bir önem kazanmıştır. Özellikle bu konuda gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin desteklediği çeşitli projeler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmalarda birçok tarihi yapı ayağa kaldırılmış, onarılmış ve/veya

güçlendirilmiştir. Tarihi yapıların, gerek uzun zaman süreci içerisinde değişik tekniklerle ve malzemelerle inşa edilmiş olmaları gerekse yine uzun zaman içerisinde birçok tesir (meteorolojik ve deprem) altında kalmış olmalarından dolayı yapısal olarak analizlerinin gerçekleştirilmesi oldukça zor ve karmaşıktır. Neredeyse her bir tarihi yapının kendine ait özel bir durumu ortaya çıkmaktadır. Bu olumsuzlukları bertaraf etmek için yapılan genel yaklaşımlar ve kabuller, elde edilen sonuçların gerçeğinden daha da uzaklaşmasında önemli faktörler olabilmektedir.

Tarihi yapılar kültürel mirasımızın en önemli parçalarıdır ve deprem kuşağında bulunan Türkiye'nin tarihi ve kültürel mirasının gelecek nesillere aktarılması için, tarihi yapıların ve anıtların çok iyi bir şekilde korunması ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Geçmişimizin aynası olan ve geçmiş ile günümüz arasında köprü niteliği taşıyan bu yapıların birçoğu özgün işlevini yitirerek terk edilmiştir. Kullanılmayan ve korunmayan yapıların durumu Eski Eserler ve Anıtlar Yüksek Kurulu, yerel yönetimler ve üniversiteler tarafından yapılan çalışmalar ve araştırmalarla sürekli gündemde tutulmaktadır. Bu çalışmalar arasında bilimsel ve akademik platformlarda yaygın olarak kullanılan “bilgisayar simülasyonu yoluyla tarihi yapıların deprem karşısında gösterebilecekleri davranışların incelenmesi” konusu son yıllarda ülkemizde de önem kazanmıştır.

Bu tez çalışmasında, yapısal analizde günümüz koşullarında geline aşamada, tarihi yığma yapıların statik ve dinamik hesaplarının daha gerçekçi ve daha pratik olarak yapılabilmesine önemli katkılar sağlanabileceği düşünülmektedir. Çalışmada, iki örnek tarihi yığma seçilerek yapıların özellikleri belirlenmiş ve çeşitli nümerik yöntemler ile statik ve dinamik analizleri yapılmış ve yapıların mevcut durumu hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

1.1. Yığma Yapılar Üzerinde Yapılmış Önceki Çalışmalar

Tarihi yığma yapıların statik ve dinamik analizleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ancak her yapı kendine özgü malzeme ve geometri özelliklerine sahip olduğu için her çalışma kendine özgü değerler içermektedir.

Sofraïne ve diğerleri (Sofraïne et al., 2001) Drucker-Prager akma kriterini model olarak Steple Kilisesi'ni analiz etmiştir. Koçak (Koçak, 1999) aynı akma kriterini model olarak Küçük Ayasofya Camisi'ni modellemiştir. Giordano vd.

(Giordano et al., 2002) süreksiz ve ayrık elemanlar kullanarak yığma sistemleri başarıyla modellemiştir.

Lourenço (Lourenço, 1996) mikro modellemeyi geliştirerek yığma yapıların modellemesinde önemli katkılar sağlamıştır. Lourenço (Lourenço, 2004) 1698 yılında inşa edilen Portekiz'deki Outerio Kilisesi'nin malzeme özelliklerini deneysel olarak belirlemiş ve tarihi yapının duvarlarına açtığı küçük sondajlara boroskopik kameralar yerleştirilerek içyapıyı tespit etmiş ve içyapıdaki hareketleri uzun dönemde gözlemlemiştir. Elde ettiği veriler doğrultusunda yapıyı güvenli hale getirmek için güçlendirme projesi hazırlamıştır.

Lionello vd. (Lionello et al., 2005) tarafından Venedik'te bulunan Aziz Stefano Kulesi üzerinde karot testleri, yassı kriko testleri gibi mekanik deneyler ile video kamera ile çatlak genişliği izleme, termal izleme, şakul (eğim) takibi gibi uzun dönem gözlemleri iki yıl boyunca sürdürülerek yapının bu süre zarfında sergilediği davranışlar ortaya çıkartılmıştır. Daha sonra mekanik deneylerden elde edilen veriler kullanılarak yapının malzeme parametreleri belirlenmiştir. Bu parametrelerle elde edilen sonlu elemanlar modeli, yapının uzun zaman içerisinde yaptığı hareketler dikkate alınarak iyileştirilmiştir ve yapının gerçek modeli ortaya konmuştur.

Teomete (Teomete, 2004), İzmir Urla'da bulunan tarihi Kemanlı Camisi üzerinde 18 ay süren uzun dönem gözlemleri yaparak yapıda oluşan çatlak genişlikleri ve oturmaları takip etmiştir. Yapıyı oluşturan malzemeler üzerinde tahribatlı ve tahribatsız testler yapmış ve yığmaya ait malzeme parametrelerini elde etmiştir. Elde ettiği bu verileri kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapıda meydana gelmiş çatlakların sebeplerini ortaya koymuştur.

Bayraktar vd. (Bayraktar vd., 2007a) tarafından, Trabzon Akçaabat'ta bulunan tarihi tek açıklıklı bir yığma taş kemer köprünün, Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak; doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve deneysel sonuçlara göre sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi yapılmıştır. Çalışmada başlangıç malzeme parametreleri literatürdeki benzer çalışmalardan belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, tarihi yapıların gerçek davranışlarını elde etmede analitik modelin iyileştirilmesinin gerekliliği ortaya konulmuş ve iyileştirme sonucunda da teorik ve deneysel dinamik karakteristiklerin birbirine oldukça yakın elde edildiği gösterilmiştir.

Bayraktar vd. (Bayraktar vd., 2010a) tarafından, Rize Çamlıhemşin’de bulunan Osmanlı dönemine ait tarihi iki açıklıklı yığma taş kemer köprünün Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak; doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Literatürden elde edilen malzeme parametrelerine sonlu elemanlar iyileştirmesi yapılarak, deneysel ve analitik frekanslar arasındaki ortalama fark %7 ye kadar düşürülmüştür.

Bayraktar vd. (Bayraktar vd., 2007b) tarafından, analitik model iyileştirmenin, yığma binaların deprem davranışları üzerine etkisini belirlemek için; yarım bodrum, zemin kat ve çatı katından oluşan yığma bir binanın rölevesi çıkarılmış ve binanın analitik modeli oluşturulmuştur. Bu model kullanılarak yapılan analitik modal analiz sonucunda, binanın yaklaşık frekans aralığı ve mod şekilleri belirlenmiştir. Daha sonra, yığma bina üzerinde Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiş ve binanın doğal frekansları ile modal sönüm oranları deneysel olarak belirlenerek, sonlu elemanlar iyileştirmesi yapılmıştır. İyileştirme yapılmış ve yapılmamış analitik modellerin, 1992 Erzincan depremi ivme kaydı kullanılarak deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Analitik model iyileştirmenin yığma binanın deprem davranışı üzerine etkisi ortaya konulmuştur. Yapılan dinamik analizlerden, iyileştirilmiş model üzerinde elde edilen yer değiştirmelerin iyileştirilmemiş modele göre yaklaşık dört kat, gerilmelerin ise yaklaşık iki kat arttığı anlaşılmıştır. Sonuç olarak, yapının mevcut haliyle bölgede oluşabilecek depremlerden beklenenden fazla zarar görebileceği belirlenmiştir.

Bayraktar vd. (Bayraktar vd., 2007c, 2008, 2010b) tarafından, tarihi yığma minarelerin dinamik karakteristikleri ve deprem davranışları sonlu eleman analizleri ve deneysel ölçüm verileri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Bayraktar vd. (Bayraktar vd. 2009) tarafından, Trabzon’da bulunan Aya Sofya Kulesi Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile incelenmiştir. M.S.1250 – 1260 yılları arasında inşa edilen ve 5.0mx5.5m boyutlarında dikdörtgen kesitli 23 m uzunluğundaki kulenin üç boyutlu sonlu eleman modeli ANSYS programında oluşturulmuştur. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri, bu tür yapılar için literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda; frekans değerleri ve mod şekilleri, eğilme ve burulma modları olarak belirlenmiştir. Daha sonra, kulenin deneysel doğal frekanslarını ve titreşim modlarını elde edebilmek amacıyla, on yedi farklı noktadan üç eksenli ve tek eksenli ivmeölçerler kullanılarak titreşim verileri toplanmıştır. Deneysel ve

analitik sonuçlar karşılaştırılarak, kulenin gerçek malzeme parametrelerine ulaşılmıştır.

Mendes vd. (Mendes et al., 2005), 16. yüzyılda da inşa edilen, 1755 Lizbon depreminde hasar gördükten sonra restorasyon çalışmalarına maruz kalan N. Sra. do Carmo kulesinin dinamik karakteristiklerini sonlu eleman analizleri ve deneysel ölçümler sonucunda elde etmişlerdir.

Ivorra ve Pallares (Ivorra et al., 2006), Valencia’da bulunan Nuestra Sra. dela Misericordia kulesinin dinamik karakteristiklerini, analitik ve deneysel yöntemler kullanarak belirlemişlerdir. Deneysel ölçüm verileri dikkate alınarak kulenin sonlu eleman modeli iyileştirilmiş ve deprem güvenliği belirlenmiştir.

Brencich ve Sabia (Brencich and Sabia, 2008), 1866 yılında inşa edilen tarihi Tanaro köprüsünü incelemişlerdir. Köprü üzerinde dinamik testler gerçekleştirilerek doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmiştir.

1.2. Tez Çalışmasının Gelişimi

Tez çalışmasının ilk bölümünde, yığma yapıların tarihsel gelişimi ve mevcut tarih yapılar üzerinde yapılmış çalışmalar anlatılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, yığma yapıyı oluşturan malzemeler; taş, tuğla ve harcın tarihsel süreç içerisinde gelişimi anlatılmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, yığma yapıların nümerik modellemesi için genel stratejiler, yapılara gelen yükler, yığma sistemin malzeme özellikleri ve modelleme teknikleri sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, tarihi yapıların incelenmesinde uygulanan yöntemler kapsamlı bir şekilde sunulmuştur.

Beşinci bölümde, seçilen iki tarihi yığma yapı üzerinde dördüncü bölümde bahsedilen yöntemler uygulanmıştır. İlk olarak yapıların tarihi geçmişleri incelenmiş, yapıların boyutları belirlenmiş ve yapılara ait 3 boyutlu bilgisayar modelleri hazırlanmıştır. Daha sonra yapılar üzerinde dinamik testler olan modal analiz testleri yapılarak, yapıların doğal titreşim periyotları deneysel olarak belirlenmiştir. Yapılar üzerinde “darbe-eko” testleri yapılarak yapıların içyapısı

hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Yapıların oturduğu zemin profilleri, o bölgede yapılmış zemin sondaj çalışmalarından yararlanarak belirlenmiş ve mikrotremor ölçümler yapılarak yapıların bulunduğu bölgenin zemin hakim periyotları deneysel olarak belirlenmiştir. Son olarak yığma yapıyı oluşturan malzemeler üzerinde Schmidt çekici testi, ultra ses hız testi, basınç ve yarmada çekme testleri yapılmış, sonuçlar değerlendirilmiş ve yapıların bilgisayar modeli için gerekli parametreler ortaya çıkarılmıştır.

Altıncı bölümde, yapıların bilgisayar ortamında statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen modal analiz sonuçlarında elde edilen modal parametreler ile, Bölüm 5'te deneysel olarak elde edilen modal parametreler karşılaştırılarak bilgisayar modeline ait malzeme parametreleri ile yapıların katı modelleri iyileştirilmiştir.

Son bölümde ise gerek hesaplarla, gerekse araştırmalarla elde edilmiş tüm bilgilerin değerlendirmesi yapılmış ve ulaşılan sonuçlar sunulmuştur.

2. YIĞMA YAPILARI OLUŞTURAN MALZEMELER

Tarihi yığma yapıların, yapım teknolojisi, tasarımı ve yapıda kullanılan malzemeler tarihi belge niteliğindedir. Belgesel anlamda çok değerli olan bu kültür varlıklarının incelenmesine yönelik çalışmalar, yapıların inşa edildikleri dönemlerin yapım teknolojisi hakkında çok önemli bilgilere ulaşılmasına olanak sağlar (21. Arkeometri Sonuçları Toplantısı, 2006).

Yapı malzemesi konuları ve teknolojileri, yapıların tasarımı ve uygulamasında çalışan mühendis ve mimarların öncelikli ve temel sorunlarıdır. İnsanlığın bugünkü çağdaş uygarlık düzeyinde ileri ve çeşitli niteliklere sahip yapı malzemelerini üretmesi kolay olmamıştır. İnsan yaşamının başlangıcından günümüze kadar uzanan teknik ve bilimsel çabalar, yüzyıllarca süren denemeler, günümüzdeki yapı malzemelerinin nitelik ve nicelik zenginliğini sağlamıştır. İnsan topluluğunun moral değerleri, teknolojik olanakları, bilimsel birikimleri ve sanatsal yapıtları onun uygarlık düzeyinin kanıtlarıdır. Yapı malzemelerinin gelişim sürecini incelemek de, insanlık tarihinin gelişim sürecini incelemekle eşdeğerdir.

2.1. Doğal Yapı Taşları

Paleolitik çağda, taş bir yapı malzemesi değildi. Avcılık ve hayvanlardan korunmak amacıyla taştan araçlar üretiliyordu. Daha sonraki süreçte insanlar mağaralar yerine barınaklarda yaşamaya başladı ve taş, barınak yapmak için bir yapı malzemesi durumuna geldi. Mezolitik ve neolitik çağlarda toplama taşlardan yararlanılmış, bunlar çamurla bağlanarak duvarlar örülmüştür. Daha sonraları bu taşlar işlenerek şekillendirilmiş, böylece düzgün ve hatta estetik duvarlar inşa edilmiştir. Günümüzde bile hala moloz taş duvarlar, estetik amaçlı inşa edilmektedir. Bazı toplulukların göçtükleri yörelerde toplama taşların bulunmaması, yapay taş üretimini zorunlu kılmış ve ilk yapay yapı malzemesi olan kerpiç icat edilmiştir. İlk taş yapıların kuru (harçsız) duvardan temelsiz olarak inşa edildiği, temel inşaatının daha sonraki dönemlerde yapıyı zemin yüzeyinden yüksek tutmak için uygulanmaya başladığı, arkeolojik kazılar sonucu ortaya çıkarılmıştır (Dinçol, 1982; Akman, 2003). Tarihsel bir topluluk olan ve günümüzden 2600–2800 yıl önce varlıklarını sürdürmüş olan Urartuların inşaat mühendisliği ve doğal taş ustalığı alanında çok başarılı eserleri vardır. Mühendis ve mimar olan Kral Menua'nın Van'da bulunan M.Ö. 800'li yıllarda inşa ettirdiği

ve hala kullanılan 51 km uzunluğundaki Şamran Su Kanalı, Eren dağı arkasındaki taştan oyma Keşiş Göleti, Van gölü kıyısındaki Sarduri dalgakıranı muhteşem eserlerdir (Öziş, 2002). Dalgakıran ve burcun taşları, Edremit'ten getirilen 3x1x1.2 m boyutunda yontulmuş prizmalardır. Çavuştepe Kalesi'nde yontma taşla örülen duvarın yüksekliği 5 m'dir. Bu duvarlarda harç yoktur. Stabilite, taşların ağırlıkları ile sağlanmıştır. M.Ö. 3000'li yıllarda Mısırlıların 2–2,5 ton ağırlıklı taşlarla inşa ettikleri bazı piramitlerde de harç yoktur; taşlar o kadar iyi yontulmuştur ki harca gerek de kalmamıştır (Akman, 2003).

2.1.1. Doğal yapı taşlarının sınıflandırılması

Doğal taşlar meydana geliş biçimlerine göre volkanik, tortul, başkalaşmış taşlar olarak sınıflandırılır.

2.1.1.1. Volkanik taşlar

Magmanın yeryüzünde ya da yeryüzüne yakın yerlerde soğumasıyla oluşan taşlardır. Katılaşım taşları adı da verilen püskürük taşlar, magmanın soğuduğu yere göre iç püskürük (granit, diyorit vb.) ve dış püskürük taşlar (andezit, bazalt, somaki vb.) olarak iki gruba ayrılır.

2.1.1.2. Tortul taşlar

Denizlerde, göllerde ve çukur yerlerde meydana gelen tortulanma ve çökelmelerle oluşan taşlardır. Tortul taşların yaşı, içerdikleri fosillerle belirlenir. Tortul taşlar; tortullaşmanın çeşidine göre kimyasal (kalker, dolomit vb.), organik (mercan kalker, arduvaz vb.), fiziksel (kumtaşı, grovak) tortul taşlar olarak 3 gruba ayrılır

2.1.1.3. Başkalaşmış (metamorfik) taşlar

Tortul ve püskürük taşların, yüksek sıcaklık ve basınç altında başkalaşıma uğraması sonucu oluşan taşlardır. Başkalaşmış taşların en tanınmış örnekleri mermer, gnays ve filattır.

2.2. Tuğla ve Kerpiç

Tuğla ve kerpiç, imalatı yapılan ilk yapay yapı malzemeleridir. Tuğla, kilin su ile karıştırılıp ateşte pişirilmesi ile yapılır. Kerpiç ise güneşte kurutulmuş kum, balçık ve saman karışımıdır. Bir çeşit pişirilmemiş tuğla gibidir.

Tuğla yığma yapı sistemi oldukça etkindir. Sağlamlığı ve şekli, tuğlayı Mezopotamya, Mısır ve Roma döneminde temel yapı malzemesi kılmıştır. Roma döneminde toprak tuğla yapımı artmış ve özelleşmiştir. Tuğla bugün bile temel yapı malzemeleri arasındadır (Fernandes, 2006).

Günümüze kadar, sayısız tuğla yığma yapı yapılmıştır ve bu yapılar yüzyıllarca yağmur, kar, donma-çözünme, rüzgâr ve deprem etkilerine maruz kalmışlardır. Bunların çoğu günümüze ulaşmasa da, azımsanmayacak sayıda yapı hala ayaktadır ve hizmet vermektedir. Bu, tuğla yığma yapıların test edilmiş başarısıdır. Aynı zamanda tuğla yığma yapılar iyi bir ısı yalıtım malzemesidir (Fernandes, 2006).

Tuğlanın yapı malzemesi olarak kullanılması; jeolojik, ekonomik ve ideolojik koşullara göre gelişmiştir. Taşın ve ahşabın az bulunduğu ve pahalı olduğu toplumlar, kilden tuğlaları yapı malzemesi olarak kullanmıştır.

İlk yerleşim yerlerinin ve kültürlerinin, tuğla yapımına uygun olan alüvyonlu toprakların yer aldığı geniş nehir havzalarında kurulduğu bilinmektedir. Tuğla sanatının da başlangıcı bu nedenle bu dönemlere rastlar. Bu bölgeler, Mezopotamya'da yer alan Nil, Fırat ve Dicle nehirlerinin aşağı bölgeleridir. Bu bölgelerde yapılan kazılarda en eski bulguların, kalıplanmış kil tabletler ve duvar rölyeflerinden oluştuğu gözlenmiştir. Kullanılan bu pişmemiş kil tabletler zamanımızda kullanılan tuğlalara benzer boyutlarda olup, elle düzeltilerek şekillendirilmiştir (Tuğla ve Kiremit Sanayicileri Derneği, 2010).

En eski zamana ait kerpiç yığma yapı kalıntıları, M.Ö. 8350 ila 7350 yıllarına ait Filistin'in Jericho şehrinde bulunmuştur (Malinowski and Garfinkel, 1991). Anadolu'da ise Çatalhöyük'te yapılan kazılarda, M.Ö. 6500'lere ait ilk dikdörtgen yığma tuğla evler bulunmuştur. Çatalhöyük neolitik yerleşim merkezi Tuz Gölü çevresindedir. Burada taş bulunmadığından, güneşte kurutulmuş kerpiç bloklardan yararlanılmıştır (Hodder, 1995; Dinçol, 1982). Kil mezolitik devirden itibaren kullanılmıştır. Kilden, önce çamur toprakları yapılmış daha sonraları içine

saman karıştırılarak kerpice dönüştürülmüştür. En ünlü yığma tuğla yapılar zigguratlardır. Sümerlerde, Babilerde ve Asurlarda bir çeşit tapınak olan bu yapılar, Mezopotamya Vadisi'nde ve İran'da terası bulunan piramitlere benzerler. Bu yapılar M.Ö 4000 ila M.Ö. 600 yıllarında inşa edilmiştir. Güneşte kurutulmuş kerpiçlerle örülen yapı kitlesi, sırlı pişmiş tuğlalarla kaplanmıştır (Şekil 2.1) (Stone, 1997).



Şekil 2.1. İran'daki Çoga Zanbil Zigguradı (Vikipedi, 2010)

Jericho'da yapılan kazılarda, kerpiç bloklarla bir tür taşıyıcı perde (paye) ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca bu yapıda, yerinde dökülen ve kütleli olarak kurumaya bırakılmış bölme duvarları ve hatıllar da mevcuttur. Kerpiç yer döşemesi olarak da kullanılmıştır (Malinowski and Garfinkel, 1991.). Çayönü'ndeki buluntulardan, kerpice büyük boyutlarda prefabrike hatıl olarak tasarlandığı anlaşılmıştır. Ancak kerpicein rötresinin büyüklüğü bu tasarımın kullanımına izin vermemiştir (Dinçol, 1982). Rötreyi kısaltmak amacıyla Mısırlılar kerpici samanla karıştırmışlardır. Günümüzden 3500 yıl önce bu güçlendirme sürecinin varlığı, Tevrat'ın Çıkış (Exodus) bölümünde anlatılır (Kitab-ı Mukaddes). Babil'de kerpice asfalt katılarak denemeler yapılmıştır ancak bu yöntem pek kullanılmamıştır. Sümerler pişmiş kili, yani tuğlayı üretmişlerdir. Bu husus Tevrat'ın tekvin (Genesis) bölümünde anlatılmıştır (3500 yıl önce) (Kitab-ı Mukaddes). Babil'deki Etemenoki zigguratının içi kerpiç, dışı ise 15 m kalınlığında pişmiş tuğladır. Bu zigguratın yüksekliği 90 m ve tabanı 90m x 90m'dir (George, 2005). Kerpiçten tuğlaya geçiş yavaş olmuştur. Mezolitik devirde kili pişirebilen insanın tuğla yapımında gecikmesi şaşırtıcıdır. Çünkü ilk kil pişirme ocaklarından biri Çekoslovakya sınırları içinde bulunmuş ve yaşı 2500 yıl olarak tahmin edilmektedir (Akman, 2003).

Urartular kerpici de kullanmışlar fakat pişmiş tuğla üretmemişlerdir. Ancak bu uygarlığı ortadan kaldıran Kimerler ve İskitler, Urartular'ın kerpiç yapılarını tuğlaya dönüştürmüşlerdir (Schnapp, 2001).

Romalı yazar, mimar ve mühendis olan Marcus Vitruvius Pollio, "Mimarlık Hakkında On Kitap" (De architectura libri decem) adlı eserinde, kerpicin tuğlaya tercih edildiğini belirtmiştir (Güven, 1990). Bu bilgiden yola çıkarak, zamanımızdan 2400 yıl önce tuğla üretiminin istenen düzeye varmadığı veya daha dayanıklı yapay taşa gereksinime duyulmadığı düşünülebilir. Nitekim Lidya kralı Krezüs'ün ünlü sarayı ve dünyanın yedi harikası arasında sayılan Karya kralı Mausolus'un anıt mezarının taşıyıcı duvarları kerpiçtir (Aksöz, 2001).

Diğer önemli yığma tuğla yapılar, Khorsabad Sarayı (M.Ö. 706) ve Babil'deki Alay Yolu'dur (M.Ö. 575). Alay Yolu, iki yanında kuleler bulunan ve hayvan figürleriyle süslenmiş olan İştâr Kapısı adında bir kapıyla, kentin dışına açılmaktadır (Şekil 2.2) (Schnapp, 2001).



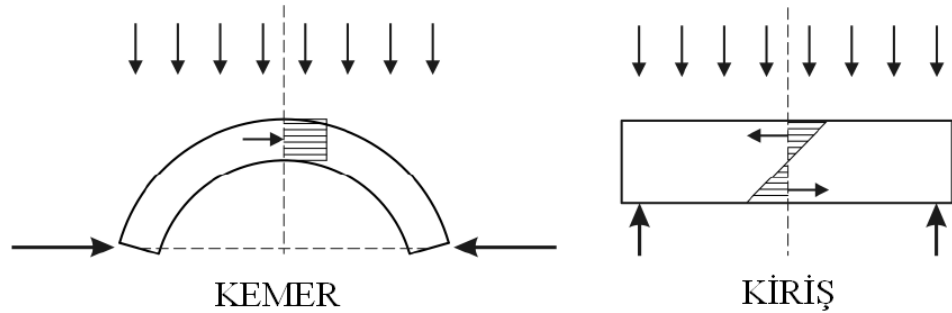
Şekil 2.2. Babil'de bulunan Alay Yolu ve İştâr Kapısı (Fotoğraf, Louis Sather, 2003)

1877–1917 yılları arasında Alman Arkeolog Robert Koldwey tarafından Babil şehrinde yapılan kazı ve araştırmalarda, halen günümüzde de modern binalarda kullanılan tuğlalara benzer düzgün şekilli, keskin kenarlı, çok teknik imal edilmiş tuğlalar bulunmuştur. Bu dönemde ve daha sonra tuğla yapımı, Anadolu'ya ve Avrupa'ya yayılmış ve gittikçe yaygınlaşmıştır. Mezopotamya'da ise tuğla ve tuğla üretimi; Asurlar, Persler, Sasaniler ve İslam kültürü ile gelişmiş

ve değişik boyutlara ulaşmıştır. Doğu ve batı kültürü hemen hemen ortak ilerlemiş, sonuçta tuğla tüm yerleşim bölgelerinin vazgeçilmez yapı malzemesi olma özelliğini korumuştur (Schnapp, 2001).

Yunanlı yazar Pindar, M.Ö. 5. yüzyılda Yunanlıların mermeri bularak, heykel yapımında ve binalarda kullanıldığını anlatır. Yunanlılar mermeri önce binalarda duvar malzemesi olarak kullanmışlar, fakat mermerin olumsuzlukları nedeni ile tekrar tuğlaya dönmüşlerdir (Tuğla ve Kiremit Sanayicileri Derneği, 2010).

Mısır'da kerpiç ve tuğla, duvar, kolon gibi taşıyıcı sistemlerin yapımı için kullanılmıştır. Roma döneminde uygulanmaya başlanan kemer, tonoz ve kubbe sistemlerle tuğlanın çekme alamama sorunu aşılarak, (Şekil 2.3) büyük açıklıklar geçilebilmiş ve tuğlanın kullanım alanı gelişerek Akdeniz ülkelerine, Avrupa'ya, Kuzey Afrika'ya ve Asya'ya yayılmıştır (Fernandes, 2006).



Şekil 2.3. Düşey yükler altında kemer sistemde ve kirişte meydana gelen gerilme dağılımı

Romalılar, Mısır ve Yunan mimarisi olan sütun-kiriş sistemini Mezopotamya ve Etruria mimarisinin tonoz sistemi ile birleştirmişlerdir. Geniş kullanımı olan tuğlalar; sıklıkla taş ile beraber, bir sıra tuğla bir sıra taş şeklinde de kullanılmıştır. Avrupa'da da tuğla, Romalılar tarafından yaygın bir biçimde kullanılmıştır. Roma İmparatorluğu'nun çöküşünden sonra, kısa bir süre için tuğla yapımı durmuş, ama Roman ve Gotik dönemlerde yeniden canlanmıştır Anadolu'ya baktığımızda da gelişmelerin, yukarıdaki tarihlere paralel olarak gerçekleştiği görölmüştür. Anadolu'da ilk pişmiş tuğlanın endüstriyel anlamda üretim ve kullanımı, M.Ö. 4. yüzyılda Lidyalılar tarafından başlatılmıştır. Bu dönem, Babil Kulesi'nin yapımı ile hemen hemen aynı dönemlere rastlamaktadır.

Tuğla ve kiremit, Anadolu’da Yunanlılardan sonra Bizanslıların katkılarıyla gelişmiştir. Daha sonra Selçuklular Bizanslılardan bu gelişmeyi devralmıştır. Selçuklular da bu konuda oldukça ilerlemişlerdir. Selçuklu mimarisinde tuğla özellikle taş ile birlikte kullanılmıştır. Bundan sonra Osmanlı dönemine geçiş yaşanmış ve Osmanlı İmparatorluğu döneminde tuğla üretimi gelişmiştir. Anadolu’da tuğlaya ilk standart, Osmanlılar döneminde getirilmiştir. Fatih Sultan Mehmet dönemi duvar tuğlaları 4.5 x 28 x 28 cm ebatlarında, hatıllarda kullanılanlar ise daha ince imal edilmiştir. Taban tuğlaları ise 25 x 25 cm boyutlarında ve kare şeklinde, veya çapları 30-60 cm arasında değişen altıgenler biçiminde üretilmiştir. Kullanılan standartlara uymayan tuğlalar inşaatlarda kullanılmamış hatta satışına da izin verilmemiştir. 18. yüzyıla kadar tuğla endüstrisinde önemli değişiklikler görülmemiştir. Fakat Rönesans sonrası sanayi devriminin başlaması ile bu endüstri dalı da gelişmeye başlamıştır. Sanayi devrimi ile standardizasyon çalışmaları ve makine ile tuğla üretimi, her dalda olduğu gibi tuğla endüstrisinde de ön planda tutulmuştur (Tuğla ve Kiremit Sanayicileri Derneği, 2010).

2.3. Bağlayıcı Harçlar

İlk çağlarda inşaat teknolojisinin en büyük sorunu bağlayıcı madde olmuştur. Doğal taş, kerpiç ve tuğlanın ilk bağlayıcı harcı çamurdur.

Harçlar; bağlayıcı, dolgu malzemesi ve katkı maddesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Harç karışımlarına doğal kum, kırma taş, tuğla parçaları gibi agregalar dolgu malzemesi olarak eklenmiştir (Davey, 1961). Harcın istenen fiziksel ve mekanik özelliklerinin oluşması; bağlayıcı, dolgu malzemeleri, organik ve/veya inorganik katkı maddeleri ile ilgilidir (Sickels, 1981).

Doğada bulunduğu şekliyle kullanım olanağından dolayı, en erken kullanılmaya başlanan bağlayıcı, kil olmuştur (Davey, 1961; Güdücü, 2004). Belirli işlemlerden geçtikten sonra bağlayıcı niteliği kazanan malzemelerden olan alçı ve kireç, yapı harcı üretiminde daha sonra kullanılmaya başlanmıştır. Bu bağlayıcıların kullanımı günümüzde de devam etmektedir.

Harçların sınıflandırılması genellikle içerdiği bağlayıcıya göre yapılmaktadır. Yapılarda en sık kullanılan bağlayıcılar kil, jips ve kireçtir. Buna göre harçlar; kerpiç, jips ve kireç harçları olarak adlandırılmaktadır.

Kerpiç: Uygun oranlarda kil, silt, kum ve saman içeren topraktan üretilen kerpiç tuğla, harç ve sıva olarak kullanılmıştır (Davey, 1961; Houben and Guillaud, 1994).

Jips harçları: Jips, M.Ö. 3000 yıllarında Mısır'da bağlayıcı olarak harç ve sıva yapımında kullanılmaya başlanmıştır. Mezopotamya'da da birçok tarihi yapıda jipsin yapı malzemesi olarak kullanıldığı anlaşılmıştır (Davey, 1961; Torraca, 1982)

Kireç harçları: Irak, Khafaje'de bulunan antik kireç fırını kalıntısı, Mezopotamya'da M.Ö. 2450 yıllarında kireçtaşlarının kalsinasyon işleminin başladığını ve kireç harcı üretilerek kullanıldığını göstermiştir (Davey, 1961).

Prehistorik devirde alçı, bitüm ve kireç denenmiştir. Alçı harcı eski Mısır'ın Sakkara ve Keops piramitlerinin derzlerinde dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Çatalhöyük'te alçıdan duvar kaplama ve süsleme malzemesi olarak yararlanılmıştır. Yine Çatalhöyük'te 1x1x0.5 m boyutunda alçıdan üretilmiş bir sandık bulunmuştur. Bu bulgular, neolitik ve kalkolitik çağlardaki bazı toplumların alçıyı bildiklerini kanıtlamaktadır. Alçıtaşı 600°C'in üzerinde ısıtıldığında elde edilen anhidrit alçı; bağlayıcı niteliği yüksek, dış etkenlere dayanıklı bir malzemedir. Günümüzden 3400 yıl kadar önce Mısır firavunu II. Amenhotep'in inşa ettiği Karnak Tapınağı'nda harç olarak anhidrit alçı kullanılmıştır. Aynı yıllarda Girit'te yapılan Knossos Sarayı'nda da anhidrit alçı kullanılmıştır (Akman, 2003).

Kireç harcının hidrolik özelliğini geliştirmek amacıyla karışıma puzolanik malzemelerin eklenmesi, ilk olarak doğal puzolonların bulunduğu bölgelerde görülmüştür. Yunanlıların bazı yapılarda Santurin kumu kullanmaları, puzolanik özellik taşıyan harç ve sıva üretiminin var olduğunu ve dolayısıyla, Roma öncesi dönemlerde de puzolanik kireç harçlarının bilindiğini gösterebilmektedir (Akman, 2003; Moropoulou et.al., 2000). Romalılar, puzolanik kireç harçlarının kullanımını imparatorluk sınırları içinde yaygın hale getirmişlerdir. Bu dönemde bilimsel araştırmacılar, kireç harcı içinde tuğla kırığı kullanımını tarif etmişlerdir ve harçlara puzolanik malzeme ekleme tekniğini yaygın şekilde kullanmaya başlamışlardır (Moropoulou et.al., 2000; Güven, 1990).

Roma döneminde Roma mimarisinin doğuşu, o dönem için yeni bir yapı ögesi olan kemerin, puzolanik kireç harçları kullanılarak inşa edilmesiyle

olmuştur. Bu harçlarla örülen tonozların kesme taş tonozlara oranla daha hafif olması nedeniyle daha küçük boyutlarda taşıyıcı elemanlara ihtiyaç duyulmuş, kesme taş tonozlara oranla daha geniş açıklıklar geçilebişmitir (Thorpe, 2002).

Kireç, betonun ve özellikle çimentonun bulunmasında önemli rol oynamıştır. Kalker kayalardan oluşan mağaralarda yaşayan Paleolitik devir insanları, mağaralarda ateş yakarak muhtemelen kireci elde etmişler, ancak kalsiyum karbonatın kirece dönmesi için gereken 900°C 'ı elde edememişlerdir. Bu nedenle düşük nitelikli kireç, Neolitik ve kalkolitik devirlerde beyaz badana malzemesi olmaktan öteye geçememiştir. Aşıklı höyüğünde ve Babil yapılarında kerpiç duvarlar kireçle badana edilmiştir. 4500 yıl önce metalürjide şaft fırınlar ve körük sistemini kullanan Mısırlıların, bu yöntemleri kireç üretiminde kullanmadıkları anlaşılmaktadır. Kirecin endüstriyel üretimi 15. Yüzyılda düşey fırınların gelişmesi ile mümkün olabilmiştir. Ancak kirecin yapay taş yani bir anlamda beton elde etmek üzere neolitik çağda kullanıldığını kanıtlayan arkeolojik tespitler bulunmaktadır (Akman, 2003).

Uygarlık tarihinde çimento ve betonun mucitleri Romalılar ve Yunanlılar olarak kabul edilmektedir. Romalılar kirecin içine Vezüv Volkanı yakınındaki Pozzuoli toprağını katarak bir tür hidrolik bağlayıcı üretmişlerdir. Daha sonra bu bağlayıcı içine kum ve çakıl karıştırarak beton elde etmişlerdir. Daha önce Yunanlılar aynı işi kireç ve Thera (Santoren adası) toprağı ile gerçekleştirmişlerdir. Puzolanik reaksiyon sayesinde çimentonun ana bağlayıcıları olan kalsiyum silikat ve alüminatları elde etmek, böylece suda çözülmeyen daha yüksek dayanımlı bir bağlayıcıya ulaşmak amaçlanmıştır. Bu puzolanik etki metakaolene dönüşen pişirilmiş kilin (tuğlanın) kirece katılması ile Yunanlılardan çok önce sağlanabilmiştir. Örneğin Çayönü'nde, İsrail'in Yiftah-El ve Ürdün'ün Jericho bölgelerinde yapılan kazılarda, 35 MPa kadar dayanımı olan yer döşemeleri bulunmuştur. Bu döşemelerin günümüzden 9000 yıl önce üretildikleri tahmin edilmektedir. Yapılan mineralojik analizler sonucunda bunların kireç, puzolanik toprak ve pişmiş kil ile agrega içerdikleri belirlenmiştir. Bu bileşim günümüzde beton olarak bilinir ve Roma devrinden çok önce üretilmiştir. Yiftah-El, Finikeliler'in yaşadığı bir yöredir. Denizci bir kavim olan Finikeliler'in kolonisi olan Girit, Rodos ve Kıbrıs adalarında, Teselya'daki Miken uygarlığında da bu tür betonlara rastlanmıştır. Vitruvius (Güven, 1990), puzolanlı kireç bağlayıcının içine pişmiş tuğla kırıkları ve tozu katılarak çok daha kaliteli ve aşınması düşük döşemeler elde edildiğini yazmaktadır (Akman, 2003).

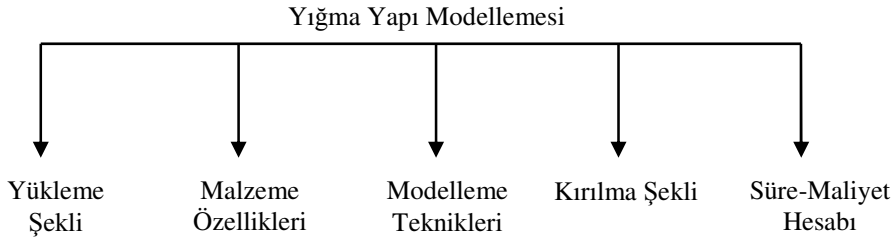
Kireç ve tuğla tozu ile üretilen bağlayıcıya Horasan harcı adı verilmiştir. Batılı araştırıcılar bu harcı da Roma-Yunan buluşu olarak kabul etmektedirler (Moropoulou et.al., 2000). Horasan harcının ilk olarak hangi uygarlık tarafından kullanıldığı belli değildir. Bundan çok daha eski yapılar olan Mısır piramitlerinde, Asur yapılarında da Horasan harcı vardır. Ayrıca Cava güneyindeki Bali adasında, Hindistan ndus nehri civarında (Surkhi adıyla), Meksika’da El-Tajin piramidinde de Horasan harcı bulunmuştur. Osmanlılar, Selçuklular ve Bizanslılar yapılarında Horasan harcını ve betonunu sürekli kullanmışlardır. Bu bulgular Horasan harcının farklı yörelerde ve farklı zamanlarda inşa edilen yapılarda kullanıldığını göstermektedir (Akman, 2003).

3. YIĞMA YAPILARIN NÜMERİK MODELLEMESİ

Yığma yapıların nümerik modellemesi son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde hız kazanmış, daha kısa sürede daha büyük sistemlerin analizleri mümkün hale gelmiştir. Özellikle yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde kullanılan zaman-tanım alanında yapılan analizler ve doğrusal olmayan analizler gibi zaman alıcı işlemler, günümüzde daha kısa sürelerde yapılabilmektedir.

3.1.Yığma Yapıların Modelleme Stratejileri

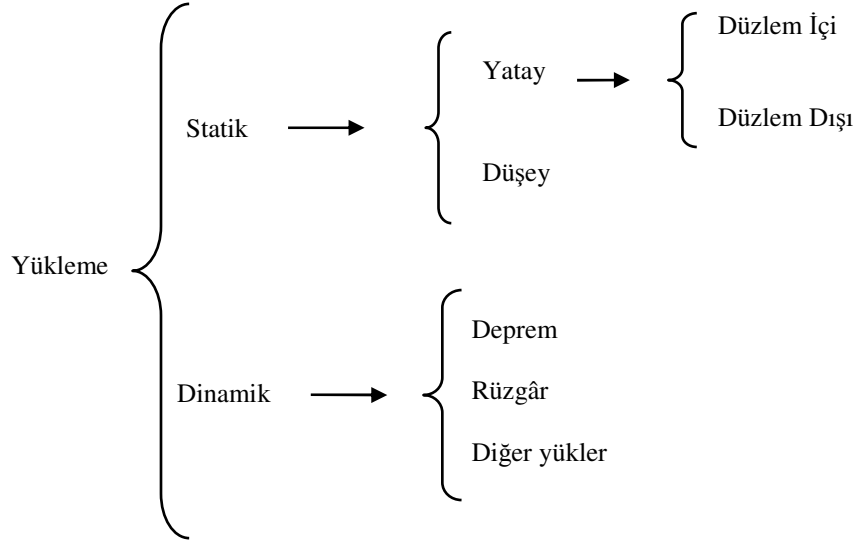
Yığma bir yapıyı modellemek için öncelikle beş temel kıstas göz önüne alınır. Bunlar, yükleme şekli, malzeme özellikleri, modelleme teknikleri, kırılma şekli ve süre-maliyet hesabıdır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Yığma yapıların modellemesinde kullanılan kıstaslar

3.1.1. Yükleme şekli

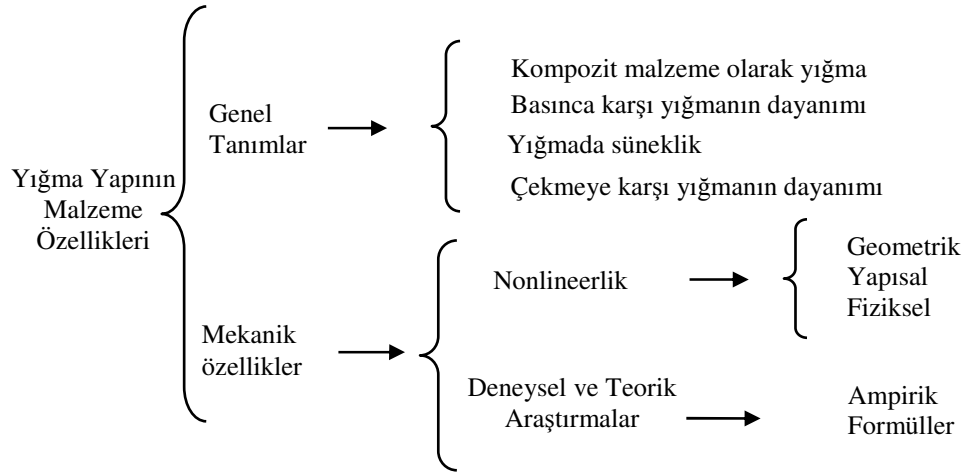
Yükler yapılara statik ve dinamik olarak iki farklı şekilde tesir eder. Statik yükler genelde yapı ve kullanıcı ağırlıklarından, dinamik yükler ise deprem, rüzgâr veya trafik benzeri yüklerden oluşur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Yığma yapıların maruz kaldığı yüklenme durumları

3.1.2. Yığma yapının malzeme özellikleri

Yığma yapılar doğal veya yapay bloklardan oluşurlar. Bu bloklar anizotropik heterojen özelliktedir. Yığma sistemler, donatısız, yarı donatılı, donatılı veya çerçeveli yapı sistemleri olarak, diğer bir deyişle kompozit bir malzeme sistemi gibi düşünülebilirler (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Yığma yapıların malzeme özellikleri

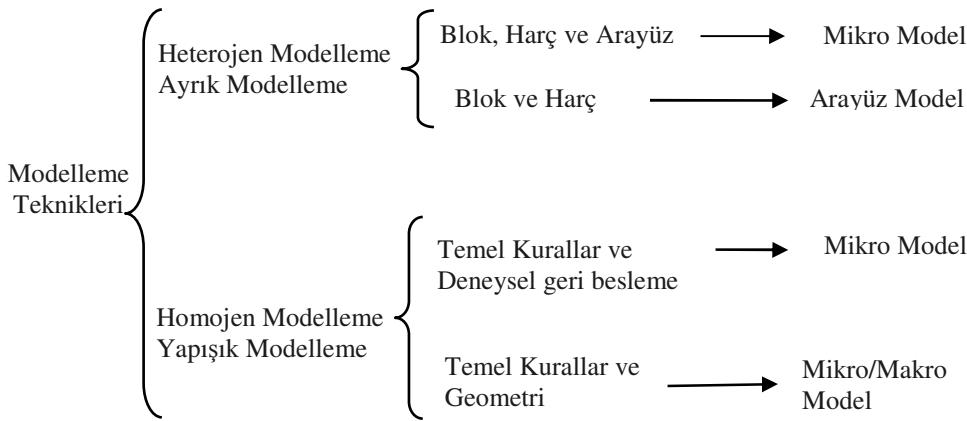
Yığma yapının basınca karşı dayanımı, yığmayı oluşturan blokların basınç dayanımına bağlıdır. Yığma sistemin sünekliği azdır ve çekme dayanımı çok düşüktür.

Yığma sistemin malzeme özellikleri, yığmanın yaşına (kür süresi), blokların maruz kaldığı meteorolojik şartlara, derz kalınlıklarına, su emme hızına, blokların boyutlarına (blok yüksekliğinin derz kalınlığı oranı), blokların ve derzin rötuş işlemine, bloklarda içsel çatlaklara ve gerilmelere, taş ustasının kalifiyesine ve dolgu malzemesinin özelliklerine göre değişir.

Yığma yapılarda nonlinearite (lineer olmama), geometrik, yapısal ve fiziksel olarak meydana gelir. Geometrik nonlinearite, deformasyonun olduğu bölgedeki denge denklemlerinden, kayma gibi küçük ve büyük deformasyonlardan ve narinlikten kaynaklanabilir. Yapısal nonlinearite; derzlerin çatlamasından, blokların ayrılmasından ve yığma sistemin çekme kuvvetlerini iletememesinden meydana gelir. Fiziksel nonlinearite, yığma malzemesinin, plastik veya gevrek davranış sergilemeye başlamadan, yığmada meydana gelen çatlamalardan ve kırılmalardan meydana gelir.

3.1.3. Modelleme teknikleri

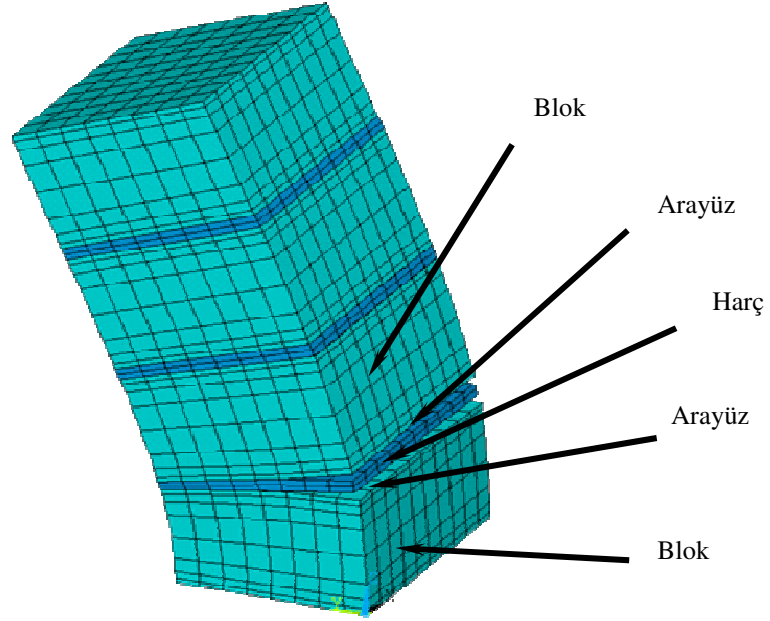
Yığma sistemlerin nümerik analizi için, homojen modelleme ve heterojen modelleme olmak üzere iki farklı temel kabul yapılır. Heterojen modelleme ayrık model ile, homojen modelleme ise yapışık (smeared) model ile yapılır. Her iki yöntem de kendi içinde mikro veya makro boyutta gerçekleştirilebilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Yığma yapıların modelleme teknikleri

Ayrık modellemede yığma bloklar (tuğla veya taş) ve harç ile ikisinin arasında oluşan görüngeleri gerçekleştiren ara yüz elemanı kullanılır (Şekil 3.5). Tüm elemanlar birbirinden bağımsızdır, blok ve harç 3 boyutlu sonlu elemanlar

ile modellenir, blok ve harç arasına yerleştirilen doğrusal olmayan ara yüz elemanları ise bu iki bölge arasındaki etkileşimi sağlar.



Şekil 3.5. Ayrık modellemede yığmayı oluşturan elemanlar

Yapışık (smeared) modellemede ise yığma sistem homojen ve izotropik kabul edilir. Çekme ile basınç dayanımları bir takım kabullere göre belirlenir. Gerçekte yığma sistem; basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük, homojen olmayan anizotropik malzeme özelliklerine sahiptir.

Yığma yapıların nümerik analizlerinde kullanılan malzeme modelleri ve modelleme stratejileri, betonarme yapılara göre oldukça farklı olabilmektedir. Aşağıda yığma sistemin büyüklüğüne göre 3 farklı modelleme stratejisi sunulmaktadır. Bu modelleme stratejilerine, Lourenço (Lourenço, 1996) çalışmasında geniş yer vermektedir. Bu stratejiler;

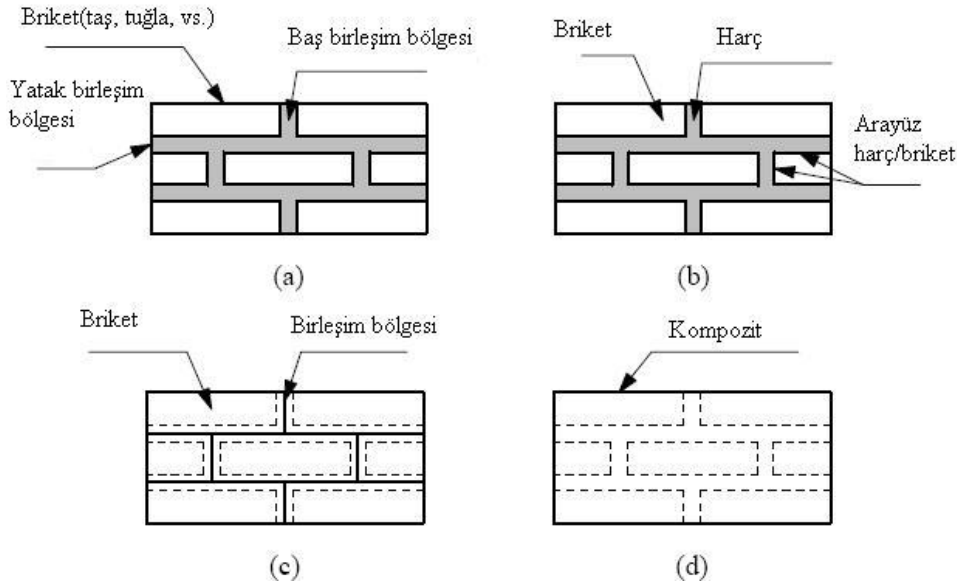
- Detaylı mikro modelleme
- Basitleştirilmiş mikro modelleme
- Makro modelleme

Detaylı mikro modellemede yığma duvarı (Şekil 3.6a) meydana getiren yapı taşlarının (tuğla, taş blok ve harç), ayrı ayrı her birinin mekanik özellikleri yani elastisite modülleri, Poisson oranları ve elastik olmayan özellikleri dikkate

alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlakların, yığma blok (taş, tuğla) ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır (Şekil 3.6b).

Basitleştirilmiş mikro modellemede, bir harç ve iki yığma blok-harç ara yüzeyinden oluşmakta olan her bağlantı noktasında kütle yoğunlaştırması yapılmış ve ortalama ara yüzey olarak kabul edilerek yığmada meydana gelebilecek çatlakların, ortalama ara yüzey çizgisinde meydana gelebileceği kabul edilmiştir. Burada harcın Poisson oranı dikkate alınmadığından, bulgular detaylı mikro modellemeye göre farklıdır (Lourenço, 1996). Fakat bu fark ihmal edilebilecek kadar azdır (Şekil 3.6c).

Makro modellemede ise yığma birim ve harcın özellikleri homojenleştirme işlemine tabii tutulmuş yığma duvar kompozit malzeme olarak düşünülmüştür. Bu modelin mekanik özellikleri de homojenleştirme işlemi sonucunda elde edilen değerlerdir (Şekil 3.6d).



Şekil 3.6. Yığma yapıların modellenmesi (a) yığma yapı (b) detaylı mikro modelleme (c) basitleştirilmiş mikro modelleme (d) makro modelleme (Lourenço 1996)

Mevcut bir tarihi yapının yapısal analizi için seçilecek modelleme tekniğinin bir takım kriterlerle belirlenir. Yapının büyüklüğü, yapının önemi, istenen sonuçların hassasiyeti ve proje için ayrılan bütçe gibi kriterlerin önceden belirlenmesi, ekonomik ve güvenli bir modelleme için gereklidir. Tablo 3.1’de sunulduğu üzere mikro modelleme oldukça maliyetli ve zaman alan, ancak hassas

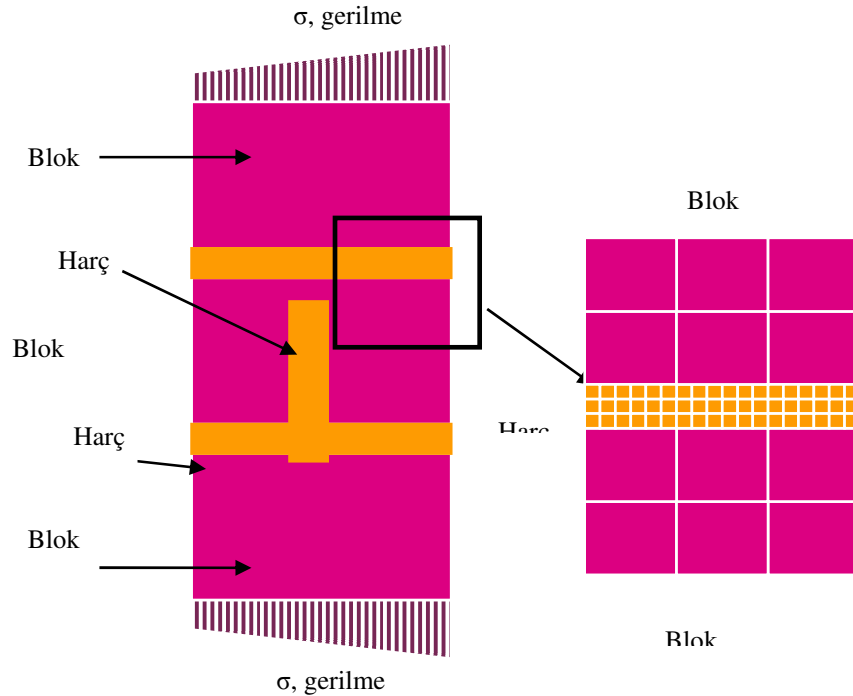
sonuçlar veren bir tekniktir; buna karşın makro modelleme daha kolay ve hızlı, fakat analiz sonucunda kaba sonuçlar elde edilen bir tekniktir.

Tablo 3.1. Yığma yapılar için mikro ve makro modelleme tekniklerinin kıyaslanması

Kriter	Mikro model	Makro model
Süre-maliyet	Yüksek	Düşük
Kullanım yeri	Laboratuvar boyutlu	Büyük boyutlu
Çıktı hassaslığı	Çok	Az
Bilgisayar modelinin oluşturulması	Zor	Kolay
Sonuçların detayları	Detaylı	Az detaylı
Kırılma Mekanizması	Detaylı	Az detaylı
Yükleme	Statik	Dinamik

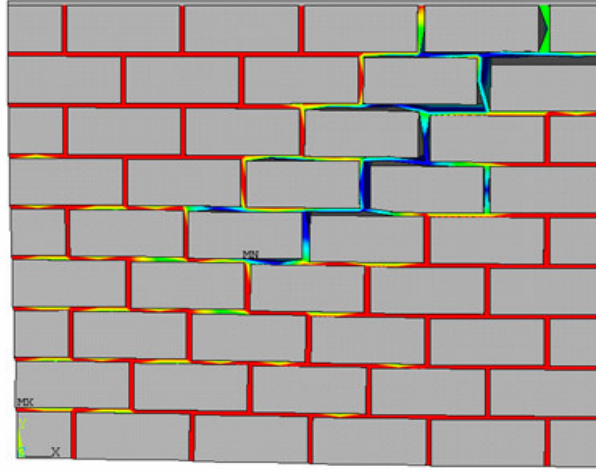
3.1.3.1. Mikro Modelleme

Mikro modellemede yığma yapıyı oluşturan taş veya tuğla ile harç ayrı ayrı modellenir ve her birinin malzeme özellikleri ayrı ayrı atanır (Şekil 3.7) (Giambanco et al., 2001).



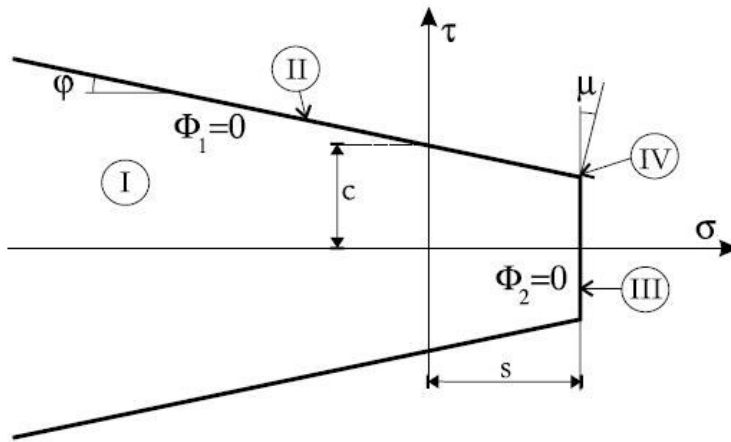
Şekil 3.7. Ayrık modellemede mikro model; blok, harç ve arayüz elemanları

Mikro modelleme ile yığma sistemi oluşturan elemanlar gerçeğe çok yakın temsil edilir. Harç ve blokların en kesitlerinde meydana gelen çekme gerilmelerinin değerleri ve oluşabilecek çatlakların yerleri net olarak tespit edilebilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Mikro model ile eksenel ve yatay yük etkisi altında yığma bir duvarda oluşan çatlaklar

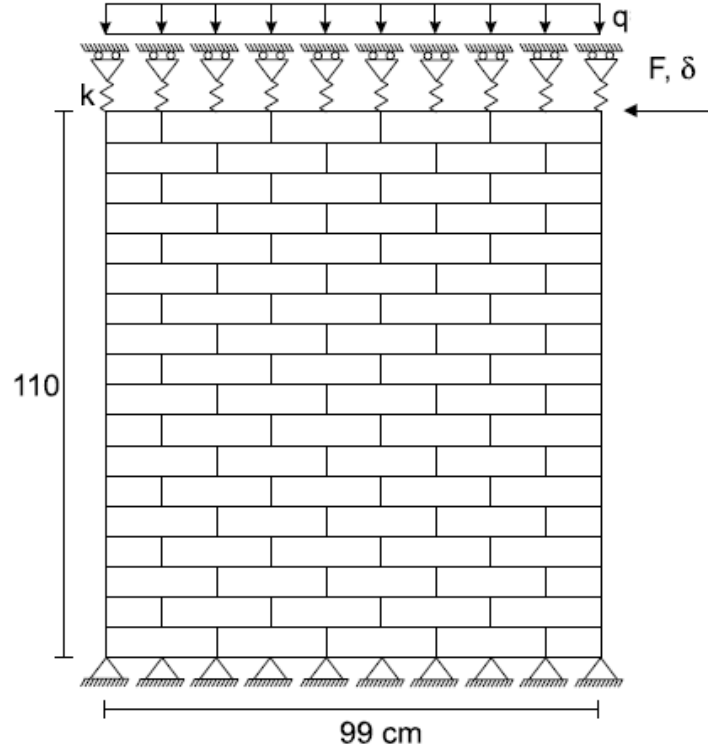
Tarihi yığma yapılar, elastik blok (taş, tuğla) ve ara eleman harç olarak modellenebilir. Bu sistemde doğrusal olmayan görüngülerin, harçların oluşturduğu düğüm noktalarında meydana geldiği kabul edilebilir. Çünkü yığma yapıda kullanılmış harç, blok elemana (taş, tuğla) göre daha zayıftır. Şekil 3.9'da harç birleşimlerinin akma koşulu σ - τ eksen takımında görünmektedir (Giambanco et al., 2001).



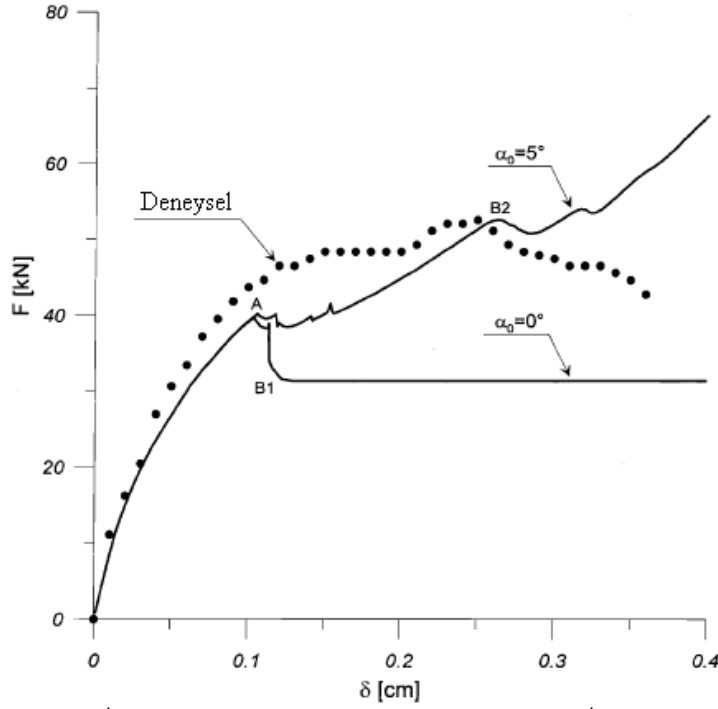
Şekil 3.9. Harç birleşim bölgelerinin çökme şartı grafiği (Giambanco et al., 2001)

Burada, σ - τ eksen takımları sırasıyla eksenel ve kayma gerilmelerine ait eksen takımlarıdır. ϕ içsel sürtünme açısı, μ dilatasyon açısı, c kohezyon dayanımı ve s ise çekme dayanımıdır. Φ_1 ve Φ_2 elastik ve plastik bölgeyi ayıran limit fonksiyonlarıdır. Şekildeki numaralı bölgeler, gerilme alanında farklı limit durumlarındaki ara yüz davranışını gösterir. I numaralı bölge elastik davranışın gözlemlendiği bölgedir. Diğer bölgelerde (II, III ve IV) geri dönüşümü olmayan şekil değiştirmeler meydana gelebilir (Giambanco et al., 2001).

Bu modelde Giambanco (Giambanco et al., 2001) tarafından, sürtünme yüzeylerini tanımlayan bir pürüz modeli oluşturulmuştur ve bu model sonlu elemanlar yöntemine adapte edilip yapılan iki deneyle analiz sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 3.10a). Giambanco yaptığı çalışmada pürüzlülük açısı (pürüzlülük etkisi) değerlerini $\alpha_0=0$ ve $\alpha_0=5$ olarak alarak nümerik analizleri gerçekleştirmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında, pürüzlülük etkisinin dikkate alındığı ($\alpha_0 = 5$) modelin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir (Şekil 3.10b).

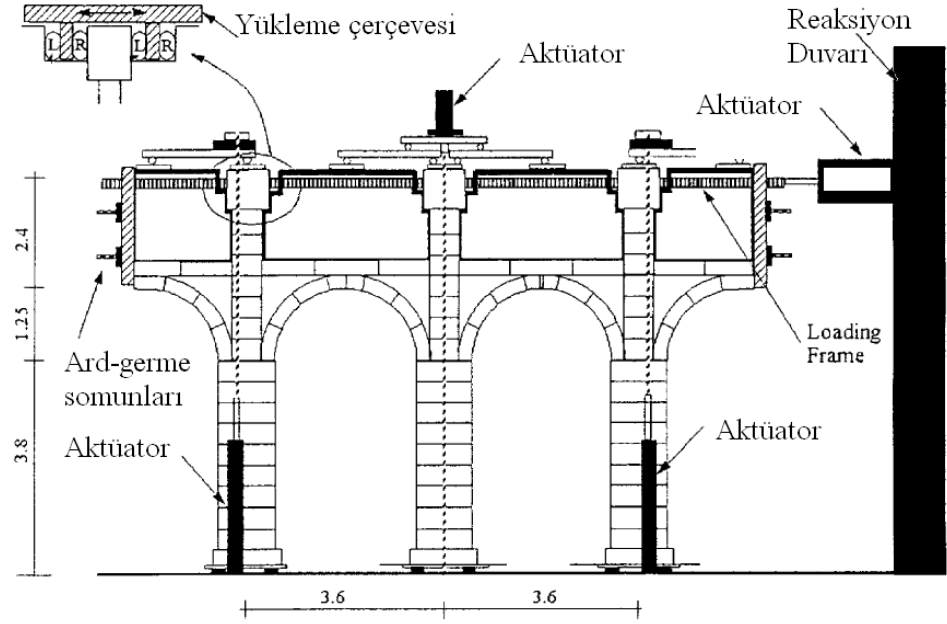


Şekil 3.10a. Test düzeneği (Giambanco et al., 2001)

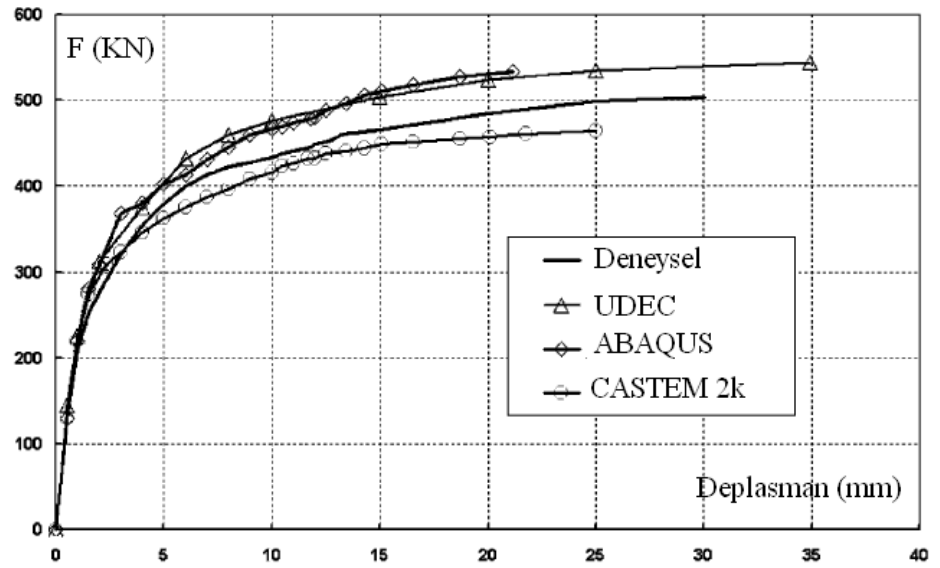


Şekil 3.10b. Harç birleşim bölgelerinin çökme şartı grafiği (Giambanco et al., 2001)

Mikro modellemede Giordano (Giordano et.al. 2002), süreksiz elemanlı sonlu eleman yöntemi (FEMDE, Finite Element Method with Discontinuous Elements) ve ayırık eleman yöntemi (DEM, Discrete Element Method) ile yığma yapıları modellemiştir. FEMDE yönteminde yığma yapıyı oluşturan bloklar klasik sürekli eleman olarak (doğrusal veya doğrusal olmayan), harç ise Coulomb sürtünmesi ile az boşluklu (dilatasyonlu) ve kohezyonsuz modellenmiştir. Yapılan deneysel (Şekil 3.11a) ve teorik çalışmalar (CASTEM Programı ile) birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir (Şekil 3.11b).



Şekil 3.11a. Deneysel model (Giordano et.al., 2002)



Şekil 3.11b. Deneysel ve çeşitli FEM programları ile analiz edilmiş modelin karşılaştırılması
(Giordano et.al., 2002)

Mikro modelleme panel, duvar veya küçük boyutlu elemanların modellenmesinde oldukça etkili ve gerçeğe yakın sonuçlar veren bir yöntemdir. Ancak üç boyutlu karmaşık bir yığma yapı çok fazla elemandan oluşur ve böyle

bir sistemin mikro modelleme ile modellenmesi zor ve zaman alıcıdır. Üç boyutlu yığma yapıların modellenmesi makro modelleme ile daha etkindir.

3.1.3.2. Makro modelleme

Büyük ve karmaşık bir yığma yapının mikro modelleme ile modellenmesi birçok problemi beraberinde getirdiğinden, makro modelleme tekniği tercih edilmektedir. Yığma yapıyı oluşturan elemanların gerilme şekil değiştirme ilişkilerinden yararlanarak yığma yapıyı bir kompozit sistem gibi düşünerek idealize edilmesi makro modellemedir.

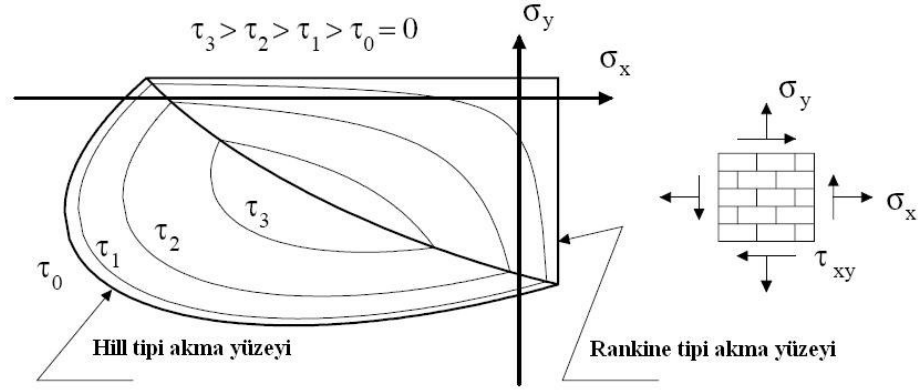
Gevrek yapıların göçmesi (kırılması) için iki temel yaklaşım vardır; ayrılma yaklaşımı ve yapışık (smeared) yaklaşım.

Ayrılma yaklaşımında, kırılma modelin geometrisini değiştirir ve yığmayı oluşturan blok ve harç lineer elastik kalır. Kırılma blok (taş, tuğla) ve harcın birbirinden ayrılmasıyla meydana gelir. Yapışık (smeared) yaklaşımda ise geometri değişmez blok ve harç birbirinden ayrılmaz ve kırılma, kurucu (birleştirici) denklemleri değiştirir (kırılma yığmanın rijitliğini azaltır). Yığma yapıların makro modelleme ile analizi, gevrek kırılmanın yapışık (smeared) yaklaşımı kullanılarak yapılır.

Giordano (Giordano et.al., 2002) yaptığı çalışmalarda, Abaqus sonlu elemanlar programındaki beton modeli (sabit çoklu-çatlak modeli) kullanarak, makro modelleme ile yaptığı analizlerin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir (Şekil 3.11b).

Koçak (Koçak, 1999), Drucker-Prager (akma fonksiyonuna dayanan elasto-plastik bir modelleme) kurucu denklemlerini kullanarak İstanbul Küçük Ayasofya Cami'sini modellemiştir. Berto (Berto et al., 2002), ortotropik hasar modelini tanımlayarak yığma yapıları modellemiş ve deneysel çalışmalarla modelin gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Lourenço (Lourenço,1995), briket ve harcın ortogonal olarak yerleştirilmesinden yola çıkarak anizotropik plastisite modeli oluşturmuştur. Ortotropik modeli oluşturmak için düzlem içi gerilmeler altında basınç için Hill tipi, çeki için Rankine tipi akma kriterlerinden yararlanarak Şekil 3.12'de görülen grafiği oluşturmuştur.



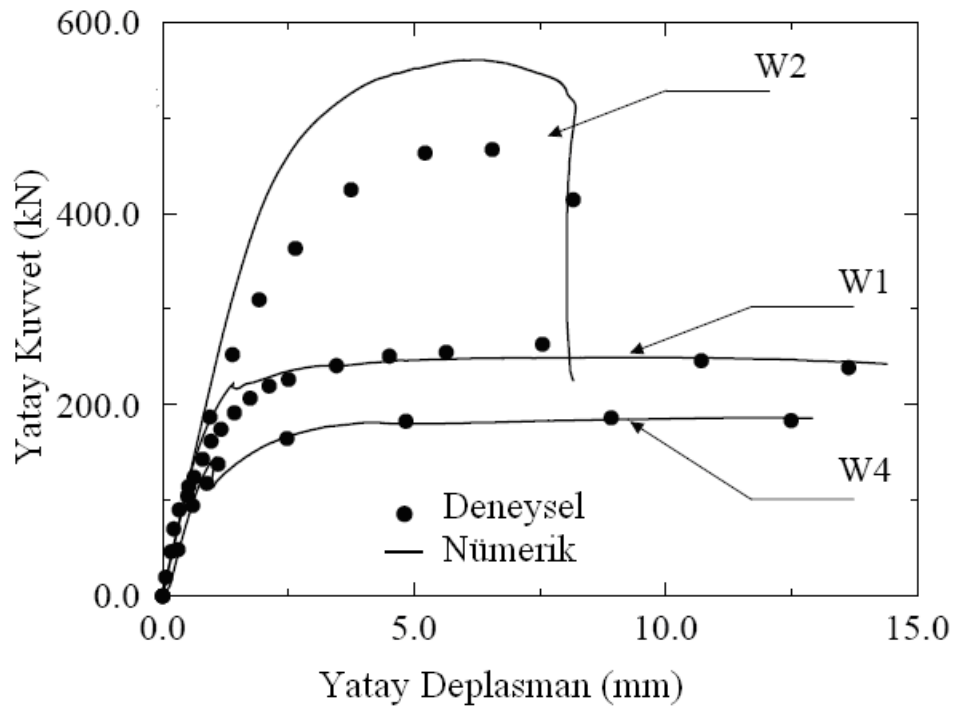
Şekil 3.12. Yığma yapılar için kompozit ortotropik akma yüzeyi (Lourenço, 1995)

Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen yapısal çözümlerinde taşıyıcı duvar elemanlarının gerçekçi olarak modellenmesi son derece önemlidir. Özellikle doğrusal olmayan çözümlerlerde bilinmeyen sayısının fazla olması ve büyük boyutlardaki sistem rijitlik matrisi, çözüm süresini artırmaktadır. Büyük yığma sistemlerin çözümündeki bu sorun için Lourenço (Lourenço, 1996), homojenleştirme tekniği önermiştir. Homojenleştirme kullanılarak tuğla ve harçtan meydana gelen duvar elemanı için tek bir malzeme özelliği elde edilebilmektedir.

Lourenço (Lourenço, 1996), makro modellemesini yapışık yaklaşım ile yapmıştır ve yapıda hasar meydana geldikçe yapıyı oluşturan malzemenin sürekliliği korunmuş fakat rijitliği azaltılmıştır. Malzeme özellikleri tek eksenli ve iki eksenli deneyler yapılarak elde edilmiştir. Yaptığı modelin geçerliliğini göstermek için literatürde yapılan deneylerin sonuçlarını kullanmıştır. Lourenço (Lourenço, 1996), Ganz ve Thürlimann'ın yapmış olduğu dört deneyin 3 tanesinin sonuçlarını kullanmıştır (Şekil 3.13). İlk deneyde (W1) duvara düşey 415 kN'luk bir yük uygulanarak 0,61 MPa değerinde bir gerilme, ikinci deneyde (W2) duvara düşey 1287 kN luk bir uygulanarak 1,91 MPa değerinde bir gerilme, verilmiştir. Daha sonra yatayda F kuvveti arttırılarak uygulanmıştır. Dördüncü deneyde (W4) duvara eksenden 840 mm uzakta 422 kN'luk tekil bir eksenel yük verildikten sonra yatay yük yavaşça arttırılmıştır. Sonuçta modelinin gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.13. Ganz ve Thürlimann (1984) yapmış olduğu deney düzeneği (Lourenço, 1996)



Şekil 3.14. Lourenço'nun modelinde nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması (Lourenço, 1996)

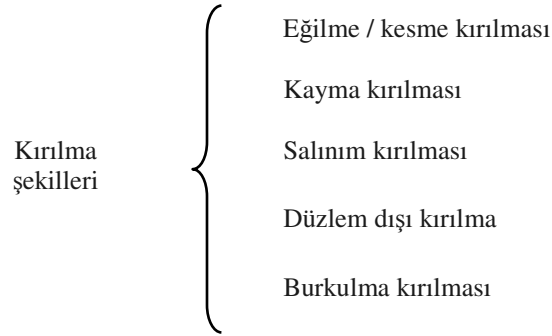
3.1.3.3. Sonlu elemanlar yönteminin yığma yapılardaki uygulamaları

Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemlerinin nümerik çözümlerinde oldukça geniş bir uygulama alanı bulmuş ve geçerliliği kanıtlanmış güçlü bir araçtır. Sonlu elemanlar yönteminde sürekli tanımlı karmaşık bir ortam sonlu eleman denen küçük ve basit geometrik şekillere ayrılır. Malzeme özellikleri bu küçük elemanlara atanır ve ilgili bağıntılar bu elemanların üzerinde kurularak eleman düğüm noktalarında bilinmeyen değer olarak ifade edilir. Daha sonra bir birleştirme işlemi yapılarak sınır koşulları ve yükleme durumu denklem takımlarıyla sonuçlandırılır. Bu denklem takımlarının çözümleri bize sistemin çözümünü verir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan matematiksel modelin doğru sonuçlar vermesi, modelin; seçilen eleman tipine, eleman sayısına, eleman davranışlarında yapılan kabullere, malzeme özelliklerinin tanımlanmasına, geometrik özelliklere, sınır ve kısıtlama koşullarına bağlıdır.

3.1.4. Kırılma şekilleri

Yığma yapılar düşey yükler altında oldukça güvenlidirler. Ancak yatay ve çekme kuvveti etkisinde bağlantı noktaları olan harç bölgeleri kolayca ayrılır ve sistem göçebilir. Yığma yapılarda kırılma şekilleri Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



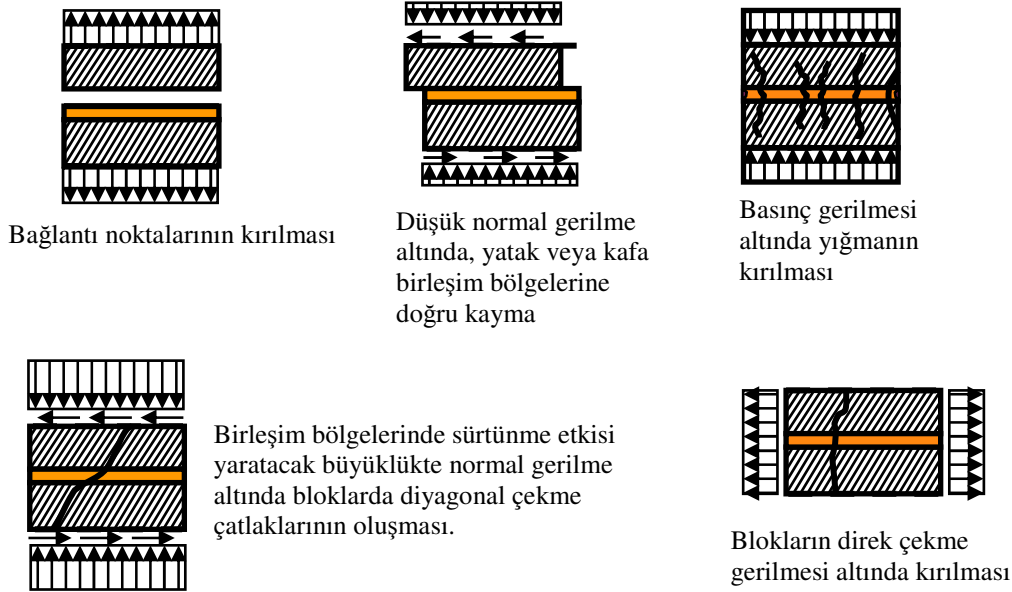
Şekil 3.15. Yığma yapıların kırılma şekillerinin sınıflandırılması

Yığma yapıların mikro modelleme ile modellenmesi Lourenço tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Lourenço, yığma yapıların kırılma mekanizmasının aşağıdaki gibi olduğunu açıklamıştır (Lourenço, 1996);

- Bağlantı noktalarının kırılması.
- Düşük normal gerilme altında, yatak veya kafa birleşim bölgelerine doğru kayma.
- Blokların direk çekme gerilmesi altında kırılması.
- Birleşim bölgelerinde sürtünme etkisi yaratacak büyüklükte normal gerilme altında bloklarda diyagonal çekme çatlaklarının oluşması.
- Büyük normal çekme gerilmesi altında blokların birbirinden ayrılması.

Yukarıda bahsedilen kırılma mekanizmaları Şekil 3.16’da gösterilmiştir.

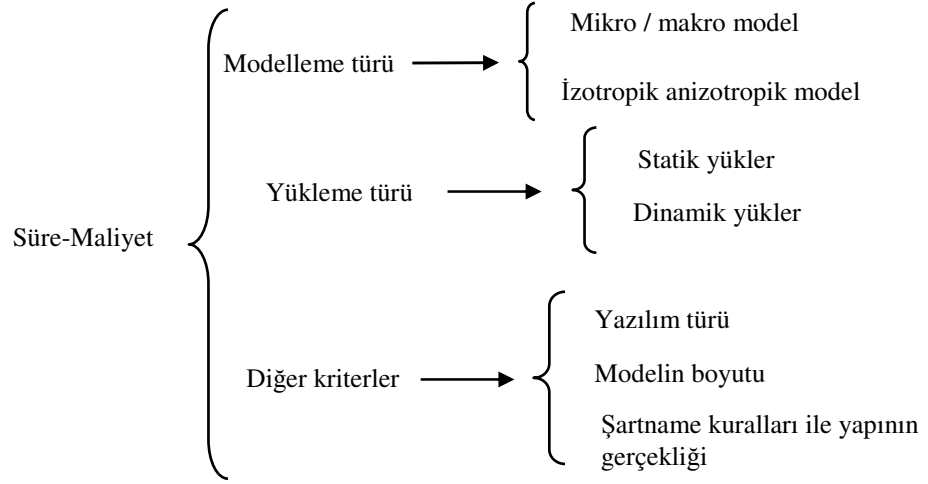
Yığma yapılarda hasar zayıf birleşim bölgelerinde (harç) ve çekmeye maruz kalan briket elemanlarında orta bölgede dikey bir kırılma ile meydana gelmektedir. Lourenço’nun (Lourenço, 1996) modelinde, ara yüz elemanları, birleşim bölgeleri ve briket elemanın kırılma olasılığı olan bölgelerden seçilir ve tüm elastik olmayan görüngelerin bu bölgelerde olduğu kabul edilir.



Şekil 3.16. Yığma yapıların kırılma (göçme) mekanizmaları

3.1.5. Yığma yapıların analizinde süre-maliyet

Yığma yapıların modellenmesi ve analizi oldukça karmaşık ve zor olduğundan, çok zaman alan ve dolayısıyla maliyeti yüksek bir iştir. Bu nedenle amaçlanan hedefe minimum düzeyde cevap verecek bir modelleme türü seçilerek, yükleme ve varsa diğer kriterler göz önüne alınarak modelleme ve analiz yapılmalıdır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Yığma yapıların analizinde süre ve maliyeti etkileyen faktörler

4. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN İNCELENMESİNDE UYGULANAN YÖNTEMLER

Mevcut tarihi yığma yapıların yapısal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için, yapının kullanım amacını, boyutlarını, ne zaman, hangi malzemelerle ve hangi tekniklerle inşa edildiğini, yapıyı oluşturan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile bu malzemelerin zaman içinde herhangi bir değişime uğrayıp uğramadığını, yapıdaki mevcut yapısal çatlakları ve yapının maruz kaldığı yer hareketlerini bilmek gerekir. Bu bölümde, mevcut bir tarihi yapıyı doğru, güvenli ve verimli bir şekilde analiz etmek için kullanılacak parametrelerin elde edilmesinde uygulanabilecek yöntemler açıklanmıştır.

4.1. Tarihsel İnceleme

Tarihsel inceleme, yığma yapıyı anlamak ve analiz etmek için gerekli birçok bilgiyi sunar. Tarihsel inceleme ile yapının, ne zaman, hangi malzemelerle ve hangi tekniklerle yapıldığı ortaya çıkarılır. Bu sayede yapıyı oluşturan malzemelerin özellikleri yapıya hasarlı testler uygulamadan elde edilebilir. Tarihsel inceleme ile yapının kullanım ömrü boyunca yapının maruz kaldığı depremler ve şiddetleri bilinebilir. Bu sayede yapıda oluşmuş çatlaklar ve hasarlar hakkında bir değerlendirme yapılabilir. Ayrıca yapıya uygulanmış tahkimatlar ve eklemeler de ortaya çıkarılabilir. Yapının işlevine uygun kullanılıp kullanılmadığı, yapının bilinçsiz onarımlara maruz kalıp kalmadığı belirlenebilir. Tüm bu veriler ışığında yapının geçmişteki durumundan bugünkü durumuna nasıl geldiği kronolojik olarak ortaya çıkarılır ve böylece yapının geleceğe güvenle aktarılmasında önemli katkılar sağlanır.

4.2. Görsel İnceleme ve Röleve Çalışmaları

Görsel inceleme tarihi yığma bir yapının incelenmesi için gerekli ilk prosedürdür. Görsel incelemede ilk olarak yapının şekline ve taşıyıcı sistemine bakılır. Daha sonra yapıda kullanılan malzemeler incelenir. Tuğla, taş, kerpiç, harç ve beton gibi yığma elemanların cinsi belirlenmeye çalışılır ve gerekirse bunlardan numuneler alınarak daha sonra incelenmek üzere laboratuara götürülür. Yapıyı oluşturan malzemelerin boyutları ölçülür ve nerelerden getirildiği veya başka bir yapıdan devşirilip devşirilmediğine bakılır. Yapıya ait bu malzemelerde yağış, sıcaklık değişimi, nem gibi atmosferik olayların neden olduğu donma-

özölme, ıslanma-kuruma gibi tekrarlı olaylardan ve evre kirliliğinin neden olduğu sülfat ve klorür tuzları içeren eriyiklerin aşındırıcı etkilerinden dolayı bozulmanın meydana gelip gelmediği incelenir. Yapıyı oluşturan malzemelerdeki bozulmalar, taşıyıcı sistemin taşıma kapasitesini, dolayısıyla yapının servis ömrünü azaltır.

Yapının tümüne bakılıp sistemde meydana gelmiş oturmalar tespit edilmeye çalışılır. Yapının boyutlarını hassas bir şekilde belirlemek için, jalon, lazer metre, nivo, teodolit veya total station gibi cihazlar kullanılabilir. Daha sonra bu ölçüler çizime aktarılır. Bu izime yapının mevcut halinde bulunan çatlaklar ve büyüklükleri, yapıyı oluşturan malzemelerin cinsi, varsa malzemelerdeki bozulmalar eklenerek yapının röleve projesi oluşturulur.

Taşıyıcı sütun ve duvarlarda meydana gelmiş çatlaklar incelenir, bunların sürekliliklerine ve büyüklüklerine bakılır. Meydana gelen bu çatlakların olası sebepleri düşünölür ve yapının tarihsel incelemesindeki bilgilerle karşılaştırılır.

Eğer yapının zaman içinde kullanım amacı değiştirilmiş, eklemeler ve çıkartmalar yapılmış ise tarihsel incelemelerden gelen veriler ve röleve dikkate alınarak yapının ilk yapıldığı zamandaki halini gösteren restitüsyon projesi hazırlanabilir. Yapı mevcut haliyle yapısal açıdan güvenli değilse ya da kullanım amacı değiştirilecekse veya yeniden düzenlenecekse restorasyon projesi hazırlanır.

4.3. Uzun Dönem Gözlemleri

Bir yapının uzun dönemde yapmış olduğu hareketleri gözlemleyerek yapının mevcut durumu için değerli bilgiler elde edilebilir. Mevsimsel değişikliklerin yapı üzerindeki etkileri ortaya çıkarılabilir. Yapının bulunduğu zeminin şişip büzölmesi, yapıdaki çatlakların genişliklerini değiştirebilir. Yapı içerisindeki nem oranının değişimi, taşıyıcı sistemi oluşturan malzemelerdeki bozulmaların tespitinde önemli rol oynar. Uzun dönem gözlemleri için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır.

Yapıdaki mevcut çatlakların genişlikleri belirli periyotlarla çatlak ölçerler tarafından ölçölerek kaydedilebilir. Ayrıca ekstansometreler (deplasman ölçer) ve fissurometreler (atlak ölçer) veri toplama cihazlarına bağlanarak yapıda meydana gelen hareketler zamana bağlı olarak takip edilebilir.

Yapıda oluşan oturmalar takometrik ölçümlerle belirli zaman aralıklarında yapılarak gözlemlenebilir.

Nemölçerler kullanılarak yapı içindeki ve dışındaki nem yüzdeleri belirli aralıklarla veya dijital nemölçerler ve veri toplama cihazları ile sürekli olarak takip edilebilir.

Termal sıcaklık sensörleri ile yapıdaki sıcaklık değişimleri takip edilebilir. Yapıya gerinim pulları yerleştirilerek, yapıdaki gerilme dağılımlarının zaman içerisindeki değişimi tespit edilebilir.

Yapının taşıyıcı duvarları şakullerle belirli periyotlarla kontrol edilerek duvarların şakullerindeki değişimler veya duvarların eğimlerindeki değişimler tespit edilebilir. Piyezometreler ile yapının bulunduğu zemin yeraltı su seviyeleri belirli periyotlarla ölçülebilir.

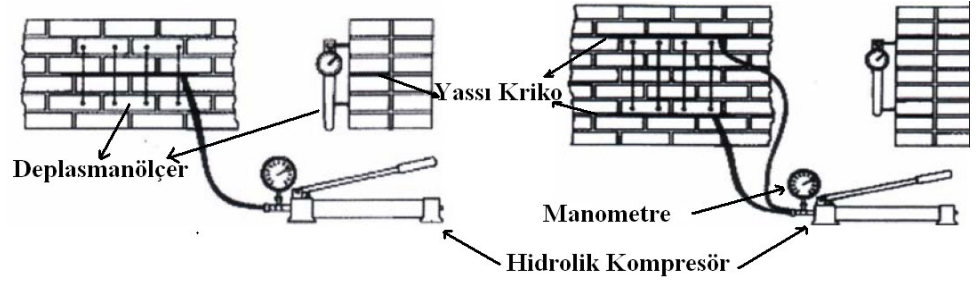
Uzun dönem gözlemleri en az bir yıl olmalıdır. Aksi takdirde mevsimsel etkiler kayıt edilemez. Uzun dönem gözlemleri yapıyı oluşturan malzemenin bozulmasını, deplasmanların sebep olacağı yorulmayı ve sıcaklık etkisinin yaratacağı sorunları ortaya çıkarır. Bu sonuçlar yapının geleceğe güvenle aktarılabilmesi için gerekli önlemlerin alınmasında yol gösterici olabilirler.

4.4. Arazi Testleri

Arazi testleri, yapının bulunduğu zemin ve yapı üzerinde yapılan deney uygulamalarıdır. Testler, hasarlı ve hasarsız olabilirler. Bu yolla elde edilecek sonuçların tutarlı olabilmesi için uygulama noktalarının seçimine özen gösterilmelidir. Test sonuçlarının değerlendirilmesi bu konuda uzman ve deneyimli kişilerce yapılmalıdır.

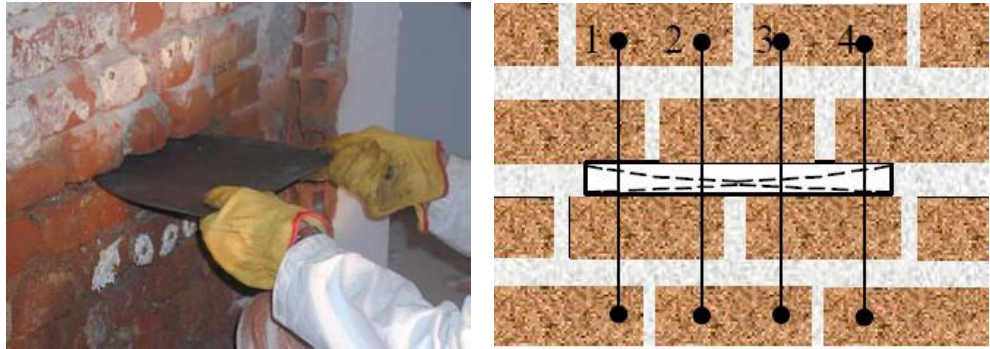
4.4.1. Yassı krik o (yerinde basınç) deneyi

Yassı krik o (Flatjack) testi ile yığma yapının duvarlarındaki mevcut gerilme değeri, duvarın taşıyabileceği son gerilme değeri ve yığmanın elastisite modülü elde edilebilir (ASTM C-1196, 1997). Yassı krik o testinde deplasman ölçerler (LVDT, potansiyometrik cetvel, komparometre) ve bunları yapıya tuttur an pimler, yassı şekilli krik o, hidrolik kompresör ve basınçölçer kullanılır (Polimi, 2004). Deney, bir veya iki yassı krik o kullanılarak yapılabilir (Şekil 4.1).

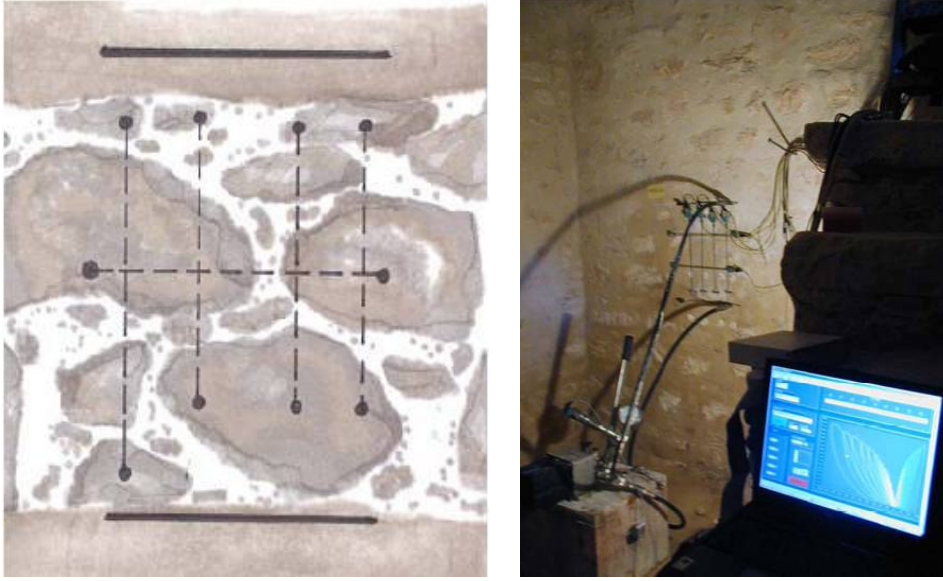


Şekil 4.1. Tekli ve ikili yassı krikonun yığmaya yerleştirilme şeması (Polimi,2004)

Tekli yassı kriko deneyinin uygulamasında deplasmanların ölçüleceği yerler arasına pimler çakılarak deplasman (yerdeğiştirme) ölçerler yerleştirilir ve ilk ölçüm yapılır (Şekil 4.2). Daha sonra ortada bir yere şerit halinde bir oyuk açılır, bu şeridin açılmasıyla yığma duvarda bir kısılma meydana gelir, son olarak yassı kriko bu yarığa yerleştirilerek içine yağ pompalanır ve yassı krikonun yarığa kuvvet uygulaması sağlanır ve pimler arasındaki deplasman yavaş yavaş artmaya başlar. Belirli aralıklarla deplasman ve hidrolik kompresördeki değerler okunarak kaydedilir ve bu değerler gerilme-şekil değiştirme cinsine dönüştürülür. İlk deplasman değerine ulaşıldığında yassı krikonun yerleştirildiği bölgedeki mevcut gerilme değeri elde edilmiş olur. Çiftli yassı kriko testinde yassı krikolar deplasman ölçerlerin altına ve üstüne yerleştirilir (Şekil 4.3).



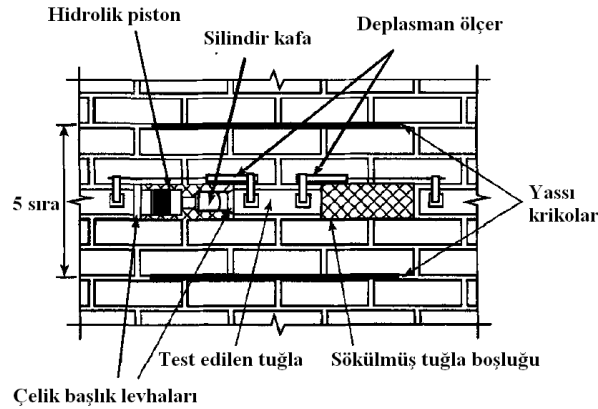
Şekil 4.2. Yassı krikonun yığmaya yerleştirilmesi, tekli yassı kriko deneyinin tuğla yığma yapı için uygulama şeması (Polimi, 2004)



Şekil 4.3. İkili yassı kriko deneyinin taş yığma yapıda uygulama şeması taş yığma yapıda ikili yassı kriko deneyinin yapılışı (Polimi, 2004)

4.4.2. Yerde kayma testi

Yerde kayma testi, yığma sistemin kayma dayanımını belirlemeye yarar. Deney setinde, kuvvet uygulayan kompresör, deplasman ölçer ve kuvvetölçer (yük hücresi) bulunur (ASTM C1531, 2003). Şekil 4.4’de görüldüğü gibi yığma duvarda testin yapılacağı bölgenin her iki tarafı açılır ve bir taraftan yatay kuvvet uygulanır, diğer tarafa yerleştirilen deplasman ölçer (LVDT) ise şekil değiştirmeleri kaydeder. Deplasman başladığı andaki kuvvet değeri yığma duvarın o bölgedeki kayma dayanımını verir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Mevcut yığma duvarda kayma testi uygulama şeması

4.4.3. Çekip çıkarma testi

Çekip çıkarma testi için bir çubuk yığma yapısının yüzeyine dik olarak ankraj edilir ve hidrolik bir kriko çubuğu çeker (Şekil 4.5). Çubuk yığma duvardan bir parça tuğla veya taş parçası ile ayrılır. Çekme kuvvetinin değeri kullanılarak yığmanın çekme ve kayma direnci hesaplanır (Crocı, 1998).



Şekil 4.5. Mevcut yığma duvarda çekip çıkarma testi (Cintec, 2010)

4.4.4. Dinamik izleme

Dinamik izlemede yapının çeşitli noktalarına ivmeölçerler yerleştirilir ve bu ivmeölçerlerden gelen sinyaller veri toplama cihazlarına gönderilir. Toplanan veriler işlenerek yapının mod şekilleri, modal frekansları, sönüm oranları ortaya çıkarılır.

Makine parçaları gibi inşaat mühendisliği yapıları da deprem, rüzgâr, taşıt, makine vb. dinamik yükler etkisinde titreşimlere maruz kalır. Yapı frekansı ile bu dış dinamik yüklerin frekanslarının aynı olması durumunda yapı rezonansa girer ve bu durumda çok küçük yükler etkisi altında bile yıkılabilir. Bunun en bilinen tipik örneği ABD'nin Washington eyaletinde 1940 yılında yapılmış olan Tacoma köprüsüdür. Tacoma köprüsü açılışından çok kısa bir süre sonra hafif rüzgâr etkisi altında salınıma başlamış ve rezonansa girerek yıkılmıştır.

Yapıların teorik analizleri yapılırken malzeme özelliklerinden sınır şartlarına kadar birçok kabuller yapılmaktadır. Bununla birlikte inşa sırasında öngörülenden farklı olan birçok uygulama hataları yapılmaktadır. Bunların sonucunda teorik analizle gerçek yapı davranışı arasında önemli farklılıklar oluşmaktadır. Bu farklılıklar, yapıların dinamik karakteristiklerinin de farklı

olmasına yol açmaktadır. Tarihi yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi için gerekli olan taşıyıcı sistem malzeme özellikleri yeterince gerçekçi olarak belirlenemediği için, tarihi bir yapının dinamik davranışını teoride doğru olarak belirlemek oldukça zor bir iştir. Aynı şekilde kompleks bir yapının dinamik davranışını belirlemek de oldukça zordur.

Yapılarda titreşimlerden oluşan etkilerin belirlenebilmesi ve yapıya tehdit olan titreşimlerin en aza indirilebilmesi için yukarıda bahsedilen durumları da dikkate alan deneysel bir yöntemin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bunun için, yapının mevcut halinin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve akabinde yapının teorik modelinin iyileştirilmesi ve nihayetinde bu iyileştirmeye göre yeniden analiz edilmesi gerekmektedir.

Günümüzde mühendislik problemlerin analizinde yapıların veya cisimlerin dinamik parametrelerini deneysel olarak belirlemek için iki tip modal analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar, deneysel modal analiz ve Operasyonel Modal Analizdir. Deneysel modal analiz günümüzde en çok kullanılan geleneksel bir dinamik analiz yöntemidir. Bu yöntemde, ivmeölçerler yerleştirilmiş yapıyı (Şekil 4.6) bir çekiç veya titreştirici etkisine maruz bırakılıp ivmeölçerlerden ve titreştiricilerden veriler alınır (Şekil 4.7). Elde edilen veriler doğrultusunda transfer fonksiyonu hesaplanır ve buradan belirli algoritmalarla yararlanarak yapıya ait dinamik parametreler elde edilir.

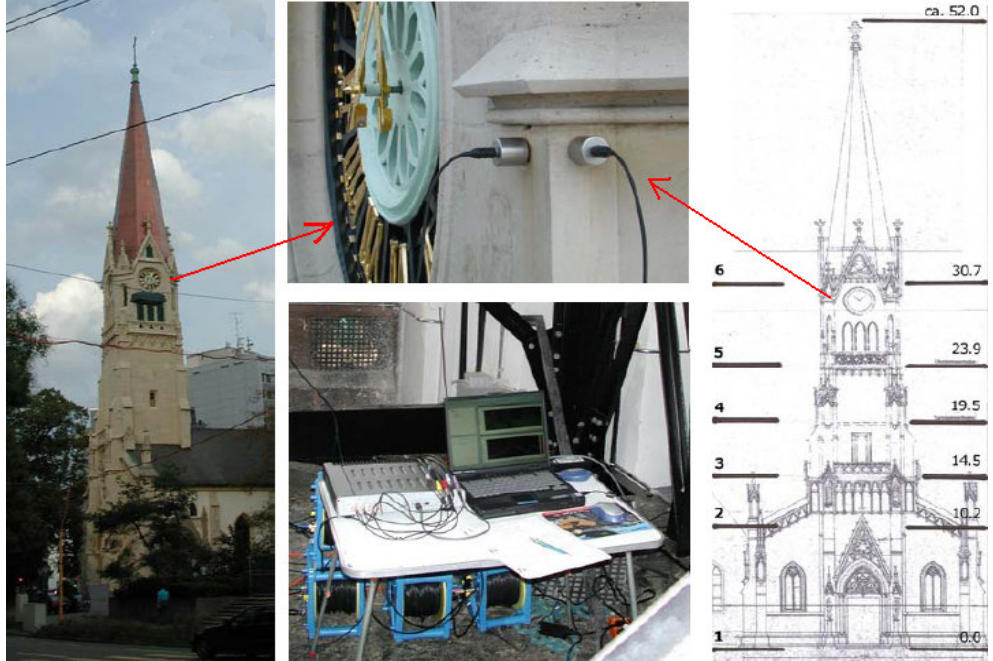


Şekil 4.6. İvmeölçerler



Şekil 4.7. Hidrolik titreştirici ve hidrolik donanımı (Cantieni, 2004)

Deneysel modal analiz, sonlu elemanlar analizinin iyi bir doğrulayıcısıdır. Ancak köprü, bina gibi çok büyük yapılar için uygulanması mümkün değildir. Bu nedenle daha çok Operasyonel Modal Analiz üzerine odaklanılmıştır. Operasyonel Modal Analizde yapıda, çevresel etkilerden oluşan titreşimler ivmeölçerler tarafından kayıt edilir ve sonuçlar analiz edilerek modal parametreler ortaya çıkarılır. Ekstra bir titreştirici ya da bir vuruş çekicine ihtiyaç yoktur (Şekil 4.8) (National Instruments, 2009).



Şekil 4.8. Operasyonel Modal Analiz uygulaması (Cantieni, 2004)

4.4.4.1. Teorik modal analiz

Doğal frekanslar ve mod şekilleri, teorik modal analizde, yapıya ait aşağıda verilen sönümsüz dinamik hareket denklemi kullanılarak belirlenmektedir.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad 4.1$$

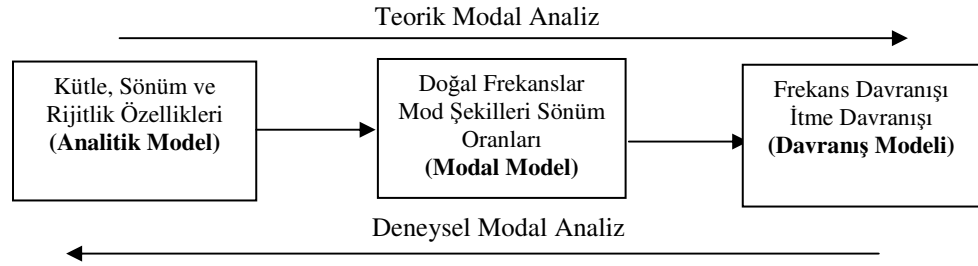
Burada, M ve K sırasıyla kütle ve rijitlik matrislerini, $\{\ddot{x}(t)\}$, ve $\{x(t)\}$ zamana bağlı ivme ve yer değiştirme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemin çözümünden sistemin serbestlik derecesi kadar sönümsüz doğal açısal frekansı ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \dots, \omega_n$) elde edilir. Her bir doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, mod şekli olarak tanımlanır. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli birinci mod şekli olarak adlandırılır (Uzsoy, 2001).

Teorik modal analizde, öncelikle yapının kütle, sönüm ve rijitlik özellikleri kullanılarak fiziksel bir tanımlama yapılır. Bu fiziksel özellikler kullanılarak yapının analitik modeli elde edilir. Analitik model üzerinden geleneksel modal analiz yöntemi kullanılarak yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm oranları elde edilir. Bu değerler kullanılarak yapının modal modeli oluşturulur. Modal analiz yapılırken yapıya dış yük uygulanmadığı düşünüldüğü için elde edilen değerler doğal değerler olarak adlandırılmaktadır. Son olarak ise oluşturulan modal model üzerinden, yapının verilen sınır şartları ve yüklemeler altında vereceği tepkiler hesaplanır. Frekans ve itme davranışı olarak adlandırılan bu tepkiler kullanılarak yapının davranış modeli oluşturulur.

4.4.4.2. Deneyisel modal analiz

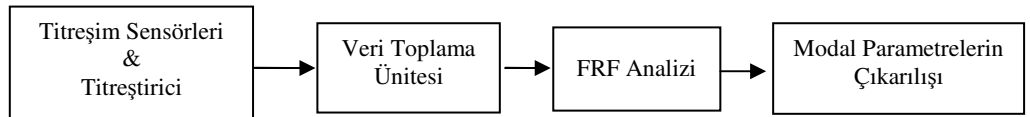
Deneyisel modal analiz, yapılardaki titreşimleri dikkate alarak yapıların dinamik karakteristiklerinin deneyisel olarak belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Titreşim, yapıların uygulanan başlangıç şartları veya uygulanan dış yükler altında göstermiş oldukları tepkidir. Temel olarak, serbest titreşim ve zorlanmış titreşim olmak üzere iki farklı titreşim türü söz konusudur. Serbest titreşimde yapı, uygulanan başlangıç şartları altında titreşir. Bu tür titreşimde en küçük doğal frekans yani temel frekans yapıda en etkili frekanstır. Bu tür titreşim belirli bir süre sonra yapıdaki sönüm etkisiyle sona erer, zorlanmış titreşim ise yapının, uygulanan periyodik bir dış yük etkisi altındaki titreşimidir ve bu tür titreşim dinamik yük yapıya etkidiği sürece devam eder (Ewins, 1995).

Yapıların deneysel modal analizi, yapıya uygulanan kuvvetin, yani etkinin ve yapıdan elde edilen ivmenin, yani tepkinin, ölçülmesini ve analiz edilmesini içermektedir. Etki ve tepki değerleri ölçüldükten sonra tepkinin etkiye oranlanmasından yapıya ait dinamik karakteristiklerin elde edilmesinde kullanılacak olan frekans tepki fonksiyonu elde edilir. Laboratuvar ortamında deneysel modal analiz, başlıca beş aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, modal testi yapılacak yapının mesnetlenmesini, yapıya ivmeölçerlerin bağlanmasını ve sistem ayarlarının yapılmasını içermektedir. İkinci aşamada, belirlenen noktalardan yapı titreştirilir ve frekans tepki fonksiyonu elde edilir. Üçüncü aşamada, Frekans Tepki Fonksiyonundan (Frequency Response Function, FRF) yapıya ait modal parametreler elde edilir. Dördüncü aşamada, analitik modal analiz sonuçları ile karşılaştırılarak sonuçların geçerliliği belirlenir. Beşinci aşamada, ise elde edilen bilgiler yardımıyla yapının gerçek modal frekans şekilleri, modal frekans değerleri ve sönüm oranları hakkında değerlendirmeler yapılır. Şekil 4.9’da teorik ve deneysel modal analiz işlem sırası verilmektedir.



Şekil 4.9. Teorik ve deneysel modal analiz işlem sırası

Deneysel modal analiz ile bir yapıyı incelemek için 4 aşama gerekir. Bunlar sırasıyla, yapıya uygun ivmeölçerlerin yerleştirilmesi, daha sonra yapının titretilerek veri toplanması, FRF (Frekans Tepki Fonksiyonu) analizi yapılması modal parametrelerin çeşitli algoritmalarla ortaya çıkarılmasıdır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Deneysel modal analiz işlem sırası

İvmeölçer olarak bilinen titreşim sensörleri, ölçüm alınacak yapıya özenle belirlenen gerekli noktalara yerleştirilmelidir. Titreşim uygulamak için darbe

çekici ve ivmeyi ölçmek için piezoelektrik ivmeölçerler kullanılır. Kullanılan ivmeölçerlerin frekans aralığı yapınınına uygun olmalıdır.

Frekans Tepki Fonksiyonu (Frequency Response Function, FRF) uyarıyı ve tepkiyi karşılaştırarak yapının transfer fonksiyonunu elde eder. FRF fonksiyonu, belirli frekans aralığındaki yapının tepki büyüklüğünü ve fazını verir. Elde edilen bu veri ile yapıyı ikaz eden kritik frekanslar yani modal frekanslar elde edilir.

FRF analizi sonucundan modal parametrelerin çıkarılması için çeşitli algoritmalar kullanılır. Bunlar; piklerin seçilmesi (Peak-Picking, PP), Kompleks Üssel Eğri Uydurma (Least Square Complex Exponential Fit), Frekans Alanlı Polinom Uydurma (Frequency Domain Polynomial Fit) ve FRF Sentezi (FRF Synthesis) yöntemleridir.

4.4.4.3. Operasyonel Modal Analiz

Operasyonel Modal Analiz (OMA), hizmet durumundaki bir yapıdan gerçek zamanlı veri toplanarak yapılan özel bir modal analiz yöntemidir. Operasyonel Modal Analiz gerçek zamanlı yapısal izleme sistemi olarak kabul edilir. OMA için gerekli uyarıcı etkiler taşıt yükü, rüzgâr, makine titreşimi gibi çevresel faktörlerdir. Çevresel etkiler kesin olarak bilinmediği için deneysel modal analizden farklı algoritmalarla modal parametreler ortaya çıkarılır. Operasyonel Modal Analizde modal parametreleri elde etmek Şekil 4.11’de gösterildiği gibi üç aşamalı bir süreç gerektirir.



Şekil 4.11. Operasyonel Modal Analiz işlem sırası

Operasyonel Modal Analiz yönteminde yukarıda da belirtildiği üzere yapının çevresel bir etki ile titreştirildiği esas alınmakta ve yapının bu titreşime göstermiş olduğu tepki ölçülmektedir. Tepkilerin ölçülüp değerlendirilmesinde kullanılan prosedürlere; frekans ortamında Piklerin Seçilmesi (Peak Picking-PP), zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (Stochastic Subspace Identification-SSI) ve Doğal Uyarı (NExT) yöntemleri örnek olarak verilebilir. Kullanılan yöntemlerin temel esasları hemen hemen aynı olup, prosedürler arasında veri

kısıtlamaları, denklem çözümleri ve matris formları gibi birkaç uygulama farklılıkları bulunmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan tarihi yığma yapıların dinamik karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz yöntemine bağlı olarak belirlenmesinde PP yöntemi ve SSI yöntemi karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır.

PP yöntemi, frekans ortamına dayalı bir yaklaşımdır. Ancak bu yöntemin teorik olarak bir kısım dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar; piklerin subjektif olarak seçilmesi, sadece orantılı sönümlü yapıların gerçek modlarının elde edilebilmesi ve sönüm tahminlerinin güvenilir olamaması olarak sıralanabilirler (Peeters, 2000). Ancak, bütün dezavantajlara rağmen bu prosedürün uygulama basitliği, işlem hızı ve altyapı gibi nedenlerden dolayı çevresel titreşim testlerine dayalı inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. PP yönteminde bilinmeyen etki ve ölçülen tepki arasındaki ilişki aşağıdaki denklemde verilmektedir (Bendat, and Piersol, 1986).

$$[G_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [G_{xx}(\omega)] [H(\omega)]^T \quad 4.2$$

Burada; $G_{yy}(\omega)$ tepki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu, $G_{xx}(\omega)$ etki sinyalinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu ve H frekans tepki fonksiyonunu göstermektedir. Denklemdeki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozunu göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$[G_{yy}(\omega)] = \sum_{k=Sub(\omega)} \left(\frac{d_k \Psi_k \Psi_k^T}{j\omega - \lambda_k} + \frac{d_k^* \Psi_k^* \Psi_k^H}{j\omega - \lambda_k^*} \right) \quad 4.3$$

Burada, d_k sabit bir değer ve Ψ_k ise k. mod şekli vektörüdür. H , kompleks eşleniğin transpozunu göstermektedir. Tepki sinyali güç spektral yoğunluk fonksiyonu, tekil değer ayrışımı gerçekleştirilerek ayrık değerler olarak aşağıdaki denklemde verilmektedir.

$$\hat{G}_{yy}(J\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad 4.4$$

Burada, U_i , u_{ij} tekil vektörlerinden oluşan birim matrisi, S_i , s_{ij} tekil değerlerden oluşan diyagonal matrisi göstermektedir. Spektrumlarda k. moda

yakın bölgelerde k. mod baskındır ve güç spektral yoğunluk fonksiyonu tek matris olarak aşağıdaki denklemdeki gibi verilebilir.

$$[\hat{G}_{yy}(J\omega_i)] = s_i u_{i1} u_{i1}^H, \quad \omega_i = \omega_k \quad 4.5$$

Bu yöntemde, doğal frekanslar tekil değerlerin dağılımında pikler olarak, mod şekilleri ise tekil vektörler olarak elde edilmektedir. Modal sönüm oranları ise tekil pik değerlerin hızlı fourier dönüşümü ile zaman ortamına aktarılması ve logaritmik azalım yönteminin uygulanması ile hesaplanmaktadır.

Stokastik Alt Alan Belirleme (SSI) yöntemi yalnızca çıktıya dayalı zaman alanlı, doğrudan zaman kullanılarak çalışan bir metottur. Zamanı korelasyonlara veya spektrumlara çevirmeye gereksinim duymaz. Bu yöntem özellikle operasyonel modal parametrelerin tanımlanmasında çok faydalıdır. Fakat kısa bir şekilde detaylı olarak açıklanması karmaşık olan bir prosedür olduğundan burada yalnızca metodun en temel noktaları sunulmuştur. Daha detaylı bilgi literatürde mevcuttur (Peeters, 2000; Peeters, and De Roeck, 1999; Van Overschee et al.,1996).

Yapıların titreşim modelleri sabit katsayılı ikinci dereceden diferansiyel denklem takımlarıyla tanımlanabilir (Peeters, and De Roeck, 1999).

$$M\ddot{U}(t) + C_*\dot{U}(t) + KU(t) = F(t) = B_*u(t), \quad 4.6$$

Bu ifadede M, C* ve K sırasıyla kütle, sönümleme ve rijitlik matrisleridir. F(t) hareketlendirici kuvvettir ve U(t) de t anındaki yer değiştirme vektörüdür. $\dot{U}(t)$ ve $\ddot{U}(t)$ hız ve ivme vektörleridir. Denklemden, F'nin girdileri uzayda tanımlanan bir matris olan B ve u(t) vektörünün çarpımı olarak ifade edildiği görülmektedir. Yukarıdaki denklem titreşen bir yapının davranışını oldukça iyi temsil etmesine karşın, SSI metotlarında doğrudan kullanılmamaktadır. Dolayısıyla dinamik denge denklemi daha uygun bir form olan kesintili-zaman stokastik durum-uzay modeline dönüştürülmektedir. Durum-uzay modeli kontrol teorisinden türemiştir. Ancak makine ve inşaat mühendisliği uygulamalarında genel viskoz sönümlemeli dinamik bir yapının modal parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Ewins, 1984).

$$x(t) = \begin{pmatrix} U(t) \\ \dot{U}(t) \end{pmatrix}, A_c = \begin{pmatrix} 0 & I_{n2} \\ -M^{-1}K - M^{-1}C_* & 0 \end{pmatrix}, B_c = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}B_* \end{pmatrix} \quad 4.7$$

Yukarıdaki denklem durum denklemine dönüştürülebilir.

$$\dot{X}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \quad 4.8$$

Burada; A_c durum matrisi, B_c girdi matrisi ve $x(t)$ durum vektörüdür. Durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlamak için gerekli olan bağımsız değişken sayısına eşittir.

Ölçümlerin tek bir noktadan alındığı ve sensörün ivmeölçer, hızölçer veya konum ölçer olduğu varsayılırsa gözlem denklemi aşağıdaki hali alır (Juang, 1994).

$$y(t) = C_a \ddot{U}(t) + C_v \dot{U}(t) + C_d U(t) \quad 4.9$$

Burada $y(t)$ çıktılar; C_a , C_v ve C_d ise sırasıyla ivme, hız ve konum için çıktı matrisleridir. Bahsi geçen bu ifadeler aşağıdaki gibi tanımlanmışlardır (Peeters, 2000).

$$C = \begin{bmatrix} C_d - C_a M^{-1} K & C_v - C_a M^{-1} C_* \end{bmatrix},$$

$$D = C_a M^{-1} B_* \quad 4.10$$

Yukarıdaki denklem aşağıdaki denkleme dönüştürülebilir.

$$y(t) = C_x(t) + Du(t) \quad 4.11$$

Bu ifadede C çıktı matrisi ve D ise doğrudan iletim matrisidir. Denklem 5.11 ve 5.14 sürekli zamanlı deterministik bir durum-uzay modeli oluşturmaktadır. Sürekli zamanla ifadelerin herhangi bir zaman için hesaplanabileceği ve deterministik girdiler ve çıktılar olan $u(t)$ ve $x(t)$ 'lerin tam olarak ölçülebildiği ifade edilmektedir. Esasen bu husus çok gerçekçi değildir keza ölçümler belli ölçüm aralıklarında kesintili olarak elde edilmektedir. Örneklemelerden (Ölçümlerden) sonra durum uzay modeli aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir (Peeters, 2000).

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$$

$$y_k = Cx_k + Du_k \quad 4.12$$

Bu eşitliklerde; $x_k = x(k\Delta t)$ kesintili-zaman durum vektörü, $A = \exp(A_c \Delta t)$ ayrık durum matrisi ve $B = [A - I]A_c^{-1}B_c$ ayrık girdi matrisidir. Eğer A_c ters döndürülemeyen bir matris ise B için daha farklı bir ifade geçerlidir. Stokastik bileşenler de dahil edilerek aşağıdaki ayrık zamanlı deterministik ve stokastik bileşimli durum-uzay modeli elde edilir.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k + v_k \end{aligned} \quad 4.13$$

Bu ifadelerde w_k modellemedeki belirsizlikler ve dış etkilere bağlı proses gürültüsü, v_k ise sensördeki belirsizliklere bağlı ölçüm gürültüsüdür. Her ikisi de ölçülemeyen vektörel sinyallerdir. Fakat ikisini de ortalamalarının sıfır olduğu ve kovaryans matrislerine sahip oldukları kabul edilir (Yu et al., 2005).

$$E \left[\begin{pmatrix} \frac{w_p}{v_p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad 4.14$$

Burada E beklenen değer operatörü ve δ_{pq} Kronecker delta operatörüdür.

Girdi bilgisinin azlığından ötürü Denklem (4.14)'deki deterministik girdi u_k ile gürültü girdileri w_k ve v_k 'yi ayırmak mümkün değildir. Eğer titreşimli bir yapıdaki deterministik girdi terimi u_k stokastik gürültü terimleri ile modellenirse kesintili zamanlı tamamıyla stokastik durum-uzay denklemi elde edilir (Yu et al., 2005).

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + w_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad 4.15$$

Yukarıdaki denklemler zaman alanlı sistemlerin operasyonel olarak tanımlanmasının temelini oluşturur. SSI metodu yalnızca çıktı ölçümlerine dayalı olarak güçlü nümerik yöntemler yardımıyla durum-uzay matrislerinin tanımlanmasında kullanılır.

4.4.5. Kızılötesi termografi testi

Yığma yapı bileşenleri (taş, tuğla ve harç) farklı sıcaklıklara sahip olabilmektedirler. Bu tekniğin esası; yüzeyin, sıcaklığına bağlı olarak belirli yoğunlukta elektromanyetik radyasyon yaymasına dayanır. Yığma yapı tarafından

yayılan kızıl ötesi (infrared) radyasyon termovizyon denen bir cihaz tarafından tespit edilir. Elde edilen veriler farklı sıcaklıkları farklı renkte gösteren bir skala ile termografik şekle dönüştürülür. Yüzey yaklaşık oda sıcaklığında iken radyasyon, elektromanyetik dalganın kızılötesi ışınlar bölgesindedir. Eğer elemanda, dışarıdan içeriye veya içeriden dışarıya doğru bir ısı akışı var ise, kusurlu bölgeler çevresindeki malzeme farklı termal iletkenlik göstereceğinden bu durum ısı akışını değiştirir. Isı akışı farklılığı nedeni ile yüzey sıcaklığı düzgün olmaz, sonuç olarak yüzey sıcaklığı ölçülerek kusurun varlığı ve yeri belirlenebilir. Termografi testi ile taşıyıcı duvarlardaki boşluklar, farklı malzemeler, yapı içindeki su ve nem tespit edilebilir (Binda et al., 2000).

4.4.6. Radyoaktif metotlar

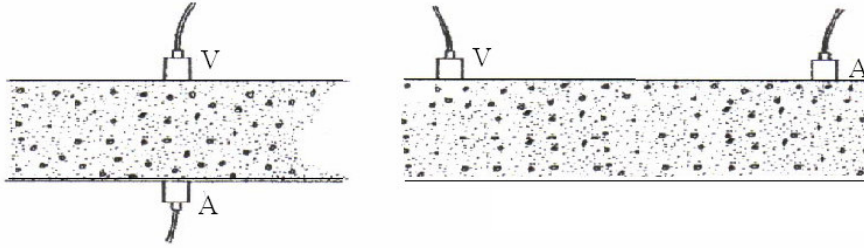
Taşıyıcı sistemleri oluşturan malzemelerin içyapısını araştırmak için, 1940'lı yılların sonunda radyografik yöntemler kullanılmıştır. Başlangıçta, X ışınları kullanılmasına odaklanılmış, ancak daha sonra dikkatler gama ışınlarına yönelmiştir. İki ışının radyasyon yayma özelliğindeki temel fark, radyasyonun üretim kaynağı ve yayılım özelliğidir. X ışınları, yüksek voltajlı elektronik aletler ile üretilir, gama ışınları ise, radyoaktif izotopların bölünmesi sonucu açığa çıkan yan ürünlerdir. Işınların kullanılması ile 1950'lerde radyoaktif deney metodu geliştirilmiştir. Bu teknikte kullanılan cihazlar, elektromanyetik radyasyon üreten bir kaynak ile radyasyonun eleman içinden geçmesi için geçen zaman aralığını ölçen bir sensörden oluşmaktadır. Bu teknik radyografi ve radyometri olarak iki farklı şekilde kullanılır. Radyografide, X ve gama ışınlarının gönderildiği sensör, özel fotoğraf filmi formundadır. Radyometride ise gelen radyasyonu, sensör, elektrik dalgalarına çevirir. Bu metot ile yapıların içindeki boşluklar, çatlaklar ve malzeme farklılıkları belirlenebilir (Carino, 1991).

4.4.7. Sonik (ultra ses) testler

Ultra ses dalgaları, frekansı 16.000'in üzerinde olan ve insan kulağı tarafından işitilemeyen dalgalardır. Ultra ses dalgaları, katı, sıvı ve gaz içinde belirli bir hız ile elektromanyetik dalgalar gibi yayılır, yansır, kırılır ve difraksiyona uğrar. Ultra ses deney tekniğinde, ses dalgaları, cisme, boşluk bırakılmaksızın temas ettirilen piezoelektrik dalga üreticiden gönderilir ve aynı özellikteki dalga toplayıcı yardımı ile alınır. Alıcı ve verici proplar arasındaki ses dalgalarının iletim süresi ve hızı zaman ölçer devre ile ölçülür. Cismin yoğunluğu düşük ise ve/veya bünyesinde çatlaklar var ise ses dalgalarının yayılımı ve dolayısı ile ses geçiş hızı düşük olur (Binda et al., 2000). Ultra ses, yığılma yapıyı

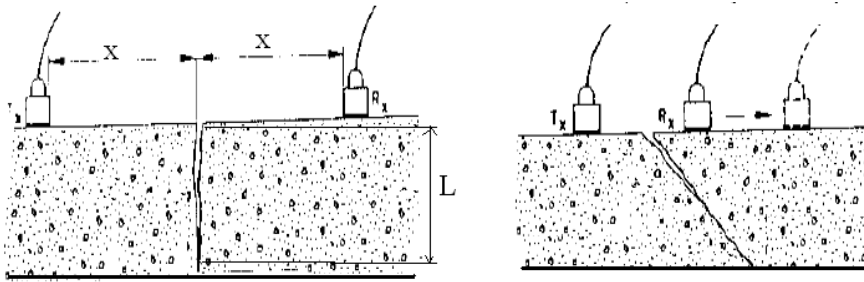
oluşturan çatlaklı malzemelere yapılan dolgu enjeksiyonlarının amacına ulaşip ulaşmadığını kontrol etmekte de kullanılır.

Ultra ses aleti ile iki karşılıklı yüzeyde doğrudan veya aynı yüzden dolaylı ölçüm yapılarak ses geçiş süresi t ölçülür (Şekil 4.12) ve aradaki mesafe bu süreye bölünerek, ses geçiş hızı V hesaplanır. Ses geçiş hızının yüksek olması, boşlukların az, dolayısı ile dayanımın yüksek olduğu anlamına gelir. Ancak bu deney dayanımın belirlenmesi için tek başına yeterli değildir. Porozite, basınç testi gibi deney sonuçları ile karşılaştırılarak, ölçümler birlikte değerlendirilir.



Şekil 4.12. Ultra ses ile doğrudan ve dolaylı olarak ölçüm yapma

Çatlak derinliğinin ve çatlak yönünün araştırılması amacı ile çatlak bölgelerinde BS1881 yönetmeliğine (BS1881, 1986) uygun olarak Şekil 4.13’de de görüldüğü gibi belirlenen noktalarda, propların yeri değiştirilmek sureti ile ses geçiş süreleri t_1 , t_2 , t_3 ve t_4 (s) ölçülür, gerekli hesaplar yapılarak çatlağın derinliği ve yönü belirlenir.



Şekil 4.13. Ultra ses ile çatlak derinliği ve çatlak yönünü belirleme

4.4.8. Darbe-eko ve puls-eko yöntemleri

Darbe eko (Impact-Echo) ve puls-eko (Pulse Echo), beton ve yığma yapıların tahribatsız olarak test edilebilmeleri için ses etkisi kullanımına dayalı yöntemlerdir. Bu uygulama; çatlaklar, delaminasyonlar (tabak halinde ayrışma) ve

boşluk gibi yer ve kusurların kapsamını belirlemek için kullanılabilir. Beton yapılar, duvarlar, sütunlar da dahil olmak üzere birçok kesit, katmanlı levhalar ve içi boş silindir bu yöntem ile tahripsiz olarak test edilebilirler (Ata et al.,2007, Sansolane and Streett, 1997).

Yöntem, betondaki çatlak ve boşlukları bulmak ya da beton kalınlığını belirlemek için; duvar yapılarında ise içyapıdaki kusurları, nerede tuğla veya blok birimleri, nerede harç olduğunu belirlemede kullanılabilir. Bu yöntem karayolu, köprüler, binalar, tüneller, barajlar, iskeleler, deniz surları gibi yapıların içindeki kusurları ve bu kusurların yerinin saptanmasında başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca güçlendirilmesi gereken büyük yapılar üzerinde uygulanmış ve hasarın yeri ve büyüklüğü net olarak tespit edilmiştir. Bu bilgi ile güçlendirme tüm yapı yerine yalnız bu bölgelere uygulanarak, milyonlarca dolarlık tasarruf elde edilmiştir (Sansolane, 1997).

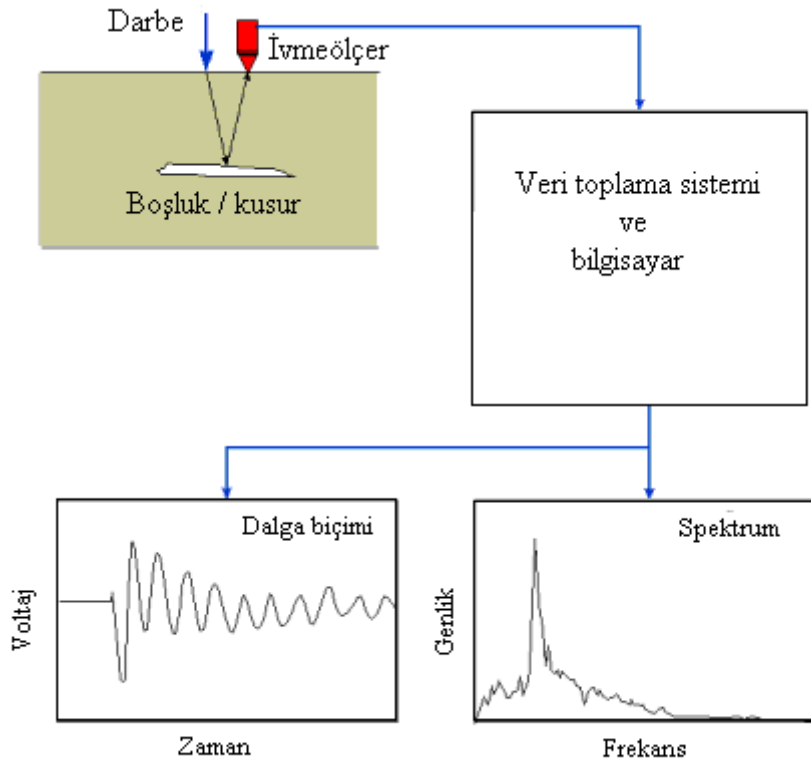
Malzemenin değerlendirilmesi için, gerilme dalga yayılımına dayanan üç tip yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; darbe-hız yöntemleri, rezonans yöntemleri ve eko yöntemleridir.

Eko yöntemlerinde bir gerilme darbesi, mekanik etkiler tarafından yüzeye aktarılır. Eğer bu darbeler için bir verici kullanılırsa, uygulama puls-eko adını alır (Şekil 4.14). Darbeler için bir mekanik etki kullanılırsa, yöntem e darbe-eko (Şekil 4.15) denir. Gönderilen dalgalar malzemedeki farklı yoğunluklar nedeni ile geri yansıtılır. Bu yansıyan dalgalar veya yankıları, darbe kaynağının yakınına yerleştirilmiş ikinci bir dönüştürücü tarafından izlenir ve veriler bir osiloskop veya benzeri bir aygıtla görüntülenir.

Ekrandaki zaman tabanı kullanılarak, dalganın yansıma süresi ve dalga hızı belirlenir. Eğer orta dalga hızı biliniyorsa, yayılma süresi de kullanılarak nerede yansımanın oluştuğu ile kusur veya arabirimin konumunun belirlenmesi için kullanılabilir (Ata et al., 2007, Sansalone and Streett,1997).



Şekil 4.14. Beton testinde kullanılan şematik bir puls-eko yöntemi



Şekil 4.15. Darbe-eko yöntemine ait bir diyagram

Kısa süreli mekanik etki, bir betonun veya duvarın yüzeyine küçük bir çelik kürenin düşürülmesi veya çekiç darbesi ile elde edilir. Böylece yüzeyde düşük frekanslı gerilme dalgaları oluşturulur. Üretilen bu dalgalar, yapı içerisindeki kusurlar veya boşluklar tarafından geri yansıtılır. Yüzey yer değiştirmeleri ve bu

dalgaların yansımaları, etkinin bitişiğindeki bir dönüştürücü tarafından kaydedilir (Sansolane, 1997).

Sonuç deplasmanı - zaman sinyalleri, frekans alana dönüştürülerek genlik - frekans (spektrum) elde edilir. Gerilme dalgalarının çoklu yansımaları yapının bütünlüğünü değerlendirmek ve kusurların (çatlakların) konumunu belirlemek için kullanılır.

4.4.8.1. Darbe-eko metoduyla yığma yapıların test edilmesi

Bu test ile yığma yapıları oluşturan taşıyıcı yığma sistemin içindeki taşların ve harcın boyutları belirlenebilir ve içyapıda bir süreksizlik olup olmadığı ortaya çıkarılabilir.

Tahribatsız bir test yöntemi olan darbe-eko'nun temeli, malzeme yüzeyi ile malzeme ara yüzleri (boşluklar, çatlaklar ve malzeme değişimi) arasında oluşan bir akustik dalganın çoklu yansımalarının mekanik empedansına dayanır. Malzeme yüzeyinde bir darbe oluşturulur ve darbenin neden olduğu titreşimler bir ivmeölçer tarafından kaydedilir. Sonuç olarak zaman alanında bir dalga formu elde edilir. Geleneksel darbe-eko analiz yönteminde bu dalga formu FFT uygulanarak frekans alanına dönüştürülür. Daha sonra frekans spektrumundaki pik frekans değerleri belirlenir ve bunlara karşılık gelen derinlik değeri aşağıdaki formül yardımı ile elde edilir.

$$d = C_p / 2f \quad 4.16$$

Burada, C_p boyuna dalganın hızını, f ölçülen frekans değeri, d ise o noktadaki derinliği ifade eder (Sansalone et al., 1997, Sansalone, 1997). Ancak uygulamada, verilerde birçok karmaşık bilgi bulunmasından dolayı frekans spektrumundan anlam çıkarmak oldukça zordur. Sonuç olarak darbe-eko metodu geliştirilerek SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact-Echo) yöntemi geliştirilmiştir. Böylece amaçlanan sonuçlara daha kolay ulaşılması mümkün olmaktadır.

4.4.8.2. SIBIE yöntemi

Kumamoto Üniversitesi'nde geliştirilen bir yöntem olan SIBIE yöntemi elastodinamikteki ters saçılım (inverse scattering) teorisine dayanır (Ata et. al, 2007; Ohtsu and Watanabe, 2002). Bir anlamda, frekans alanında meydana gelen

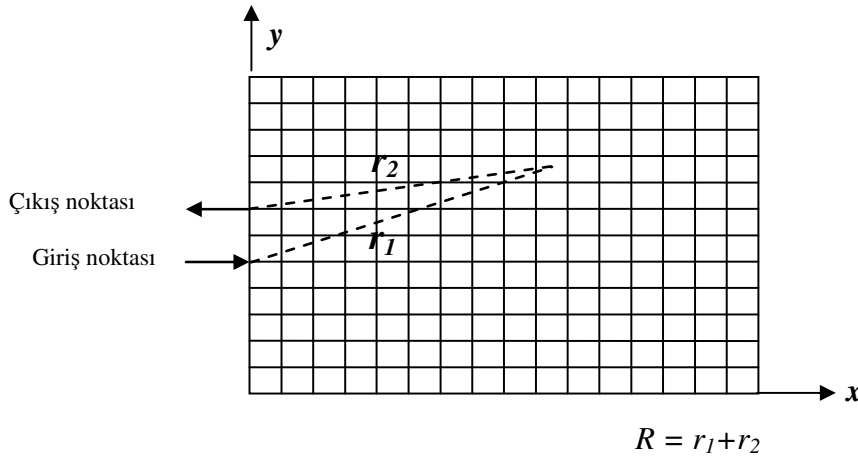
dalga biçimlerini görüntüleme tekniğidir. Yöntemde ilk olarak test edilen numunenin kesiti, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi kare elemanlardan oluşan ağa dönüştürülür (mesh edilir). Daha sonra her elemanda yansımadan meydana gelen rezonans frekansları hesaplanır. Eleman içinde giriş yerinden çıkışa kadar geçen mesafe aşağıdaki formülle hesaplanır (Ohtsu and Watanabe, 2002):

$$R = r_1 + r_2 \quad 4.17$$

Bu eşitlikte r_1 ve r_2 sırasıyla, kusurlu bölge ile darbenin giriş noktası ve geri çıkış noktası arasındaki mesafeyi belirtir. Her eleman için yansımadan kaynaklanan rezonans frekansları, f'_2 , frekansın 1. modu ve f_R , frekansın 2. modu ise aşağıdaki eşitliklerle belirlenir.

$$f'_2 = \frac{C_p}{r_2} \quad \text{ve} \quad f_R = \frac{C_p}{R} \quad 4.18$$

Bu eşitliklerde frekans spektrumunda bu iki rezonans frekanslarına karşılık gelen spektral (görüngeşel) genlikler her karede toplanır. Böylece yansıma şiddeti her elemanda bir görüntü yığını olarak tahmin edilir. SIBIE analizinde kare mesh (Şekil 4.16'da karelere bölünerek oluşturulan mesh) Δ 'nın minimum boyutu $C_p \Delta t / 2$ kadar olmalıdır. Burada C_p , P dalgalarının hızı, Δt ise kaydedilen dalğanın örnekleme zamanı, R ise r_1 ve r_2 'nin toplamıdır.



Şekil 4.16. Spektral görüntüleme modeli

4.4.9. Georadar yöntem

Georadar yönteminde bir ortam içinden elektromanyetik dalgalar gönderilir, alıcı ve verici arasında geçen zaman kaydedilir ve hedeflenen bölge taranır. Böylece ortamdaki fiziksel süreksizliklerin varlığına bağlı olarak bilinmeyen karakteristikler açığa çıkarılabilir. Bu yöntem ile malzemenin mekanik özellikleri araştırılmaz; ancak yapının gözle veya karotla belirlenemeyen fiziksel karakteristikleri belirlenebilir (Aköz ve Yüzer, 2005).

4.4.10. Endoskopik yöntem

Yapıda kullanılan taşıyıcı elemanların boyutlarının çok büyük olması; gözle veya karot ile ulaşılamayan bölgelerde kullanılan malzemelerin özelliklerine karar verilememesi durumunda, endoskopik yöntem son zamanlarda kullanılan uygulamalardan biridir ve tıpta kullanılan uygulamadan farklı değildir. Bu yöntem ile yapıda sadece 1 cm çapında delik açılır ve içeriye gönderilen kablo ile görüntü alınarak, istenilen derinlikte kullanılan malzemenin ne olduğuna karar verilir (Aköz ve Yüzer, 2005).

4.5. Yığma Yapıyı Oluşturan Birimler Üzerinde Yapılan Testler

Yığma yapının taşıyıcı sistemini oluşturan taş, tuğla, harç gibi birimlerden numuneler alıp bunlar üzerinde deneyler yapmak, genelde diğer yöntemlere göre daha kolay ve ucuzdur. Ancak tarihi önemi olan bu yapılardan numune almak yapının tarihi dokusuna zarar vereceğinden mümkün olmayabilir. Yığma yapıdan alınacak numunelerin yerleri dikkatli seçilmeli ve yapının tümü hakkında bilgi verecek sayıda numune alınmalıdır. Yapılan deneyler sonucu yapıyı oluşturan birimlerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri elde edilir ve buradan yapının tümünün analizi için gerekli birçok parametreye ulaşılabilir. Yapının yeterli dayanıma sahip olmadığı tespit edilirse, yine bu veriler kullanılarak yapıyı oluşturan elemanların güçlendirilmesinde kullanılacak enjeksiyon tipi belirlenebilir.

Yığma yapıdan numune alırken dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda sıralanmıştır:

- Köşe noktalarından numune alınmasının tamiri zor hasarlar verebileceği düşünülerek, bu bölgelerden numune alınması tavsiye edilmez.

- Yapıdan düşen parçalar ya da yapının yıkılmış kısımlarından alınan numuneler, yapıya zarar vermeyeceğinden tercih edilmelidir.
- Yapıyı oluşturan yığma elamanların (taş, tuğla ve harç) farklılıkları dikkate alınarak, farklı tip elemanlardan yeterli sayıda alınmalıdır.
- Numune sayıları ve boyutları, ilgili şartname ve yönetmelik kurallarına uygun olmalıdır.

4.5.1. Schmidt çekici testi

Malzemelerin başlıca mekanik özellikleri; dayanım, elastisite modülü, süneklik, tokluk ve sertliktir. Sertlik, bir malzemenin yüzeyine batırılan sert bir cisme karşı gösterdiği dirençtir ve cismin dayanımı hakkında bir fikir verir; ancak dayanım ya da süneklik gibi belirli bir karakteristiği tam olarak ifade etmez. Sertliğin belirlenmesi ile yığma yapıyı oluşturan malzemelerin kökeni hakkında bilgi edinilerek, farklı iki numunenin aynı kökene sahip olup olmadığı anlaşılır. Sertlik deneyleri pratiktir ve deneyde malzeme tahrip edilmez. Sertlik deneyi, yığma yapılarıdaki doğal taş, tuğla, harç, beton gibi gözenekli ve seramik bünyeli malzemelerde, elle taşınabilir aletler ile laboratuvar ve arazide gerçekleştirilebilir. Schmidt çekici testi hem arazi hem de laboratuvarda uygulanabilen bir testtir. Bu test, Ernst Schmidt (Schmidt, 1951) tarafından 1948 yılında geliştirilmiştir. Sertlik değerinden malzemenin içyapısına bağlı özelliklere geçilebilmesi için, cismin homojen olması ve yüzey özelliklerinin içyapıdan farklı olmaması gerekir. Bu nedenle test yapılmadan önce numune yüzeyi iyice zımparalanmalıdır. Seramik bünyeli, gözenekli yapı malzemelerinde sertliğin belirlenmesi için çoğunlukla geri sıçramanın ölçülmesi prensibine dayanan N tipi, L tipi veya P tipi Schmidt çekicinden yararlanılır (Şekil 4.17). Bunlardan; N ve L tipinde, bir çubuk, P tipinde ise bir pandül arkasında bulunan yay yardımı ile yüzeye fırlatılır. Yığma yapılar için genelde L tipi Schmidt çekici kullanılır. Çubuk veya pandül taş cismin yüzeyine çarptıktan sonra geri sıçrar. Geri sıçrama ne kadar büyükse sertlik o kadar fazladır. Elemanın yüzeyindeki sıvaya veya kaplama kaldırıldıktan sonra değişik noktalara (en az 1cm uzaklıkta) en az 10 vuruş yapılmalı, maksimum vuruş değeri ile minimum vuruş değeri arasındaki fark 10'dan küçük olmalıdır (Postacıoğlu 1981; Ulusay vd. 2001; Koçak, 1999).



Şekil 4.17. Schmidt çekici testi (L tipi)

4.5.2. Tek eksenli basınç testi

Tek eksenli basınç testi için yığmayı oluşturan taştan veya tuğladan alınan, karot numunelerine uygulanır. Bu amaçla, öncelikle karot alınacak yerler belirlenir veya düşen yapı malzemelerinden karot alınır. Karot alma, düşen yapı birimlerinden yapılacaksa, bu işlem laboratuara götürülecek elemanlar üzerinde gerçekleştirilir (Şekil 4.18). Eğer numuneler yapıdan alınacaksa seçilen bölgelerden yeterli sayıda, en az $D = 54 \text{ mm}$ çapında, $h=1\sim3\times D$ yüksekliğinde karot numuneler çıkarılır (Ulusay vd., 2001; TS 699, 1987) ve numaralandırılıp naylon torbalara konarak laboratuara götürülür. Laboratuarda karotların ortama açık yüzeyinden en az 3 cm kalınlığında parça kesilir, karot alınan bölgelerde oluşan karot delikleri dolgu harçları ile doldurulur ve kesilen bu en az 3 cm'lik parçalar tekrar yerine kapatılarak görsel açıdan karot alınmış bölge makyajlanır.



Şekil 4.18. Karot numunelerinin laboratuarda alınması

Alınan karot numuneler, deneye hazırlanması için öncelikle birbirine paralel iki başı çap/yükseklik oranı $1/1\sim1/3$ olacak şekilde taş kesme aleti ile kesilir

(Şekil 4.19). Taş zımparası ile kuvvetin tatbik edileceği başlık yüzeyleri zımparalanarak yüzey düzgünleştirilir (TS 699, 1987). Bu numuneler, ortalama 48 saat süre ile sıcaklığı 20 ± 2 °C, bağıl nemi $\%65 \pm 5$ olan laboratuvar ortamında bekletilir. Numunelerin çapı ve yüksekliği, kumpas ile hassas bir şekilde ölçülür. Eğer başlık yüzeyleri zımpara ile düzeltilmemiş ise ölçüm işleminden sonra yüzeylere alçı, çimento karışımı hamur ile toplam 5–6 mm kalınlığında başlık yapılır. Başlığın sertleşmesinden sonra başlıklı yükseklik (h) ölçülür. Bu numunelerde tek eksenli basınç deneyi yapılır (Şekil 4.19). Basınç etkisinde meydana gelen boy değişimi (Δl , mm) yük-boy değişimi ve kırılma yükü (P_k) belirlenir, basınç mukavemeti (f_{ck}), hesaplanır.



Şekil 4.19. Karot numunelerinin kesilmesi, hazırlanmış numuneler ve basınç testi

4.5.3. Yarmada çekme (Brezilya) testi

Bu test metodu, taşların tek eksenli çekme dayanımını belirlemek için kullanılır. Direk çekme testine göre oldukça kolay bir yöntemdir, ancak yöntem direk çekme testine göre biraz daha büyük çekme dayanımı verir (Ulusay vd., 2001).

Deney için çapı, en az $D=54$ mm olan (Ayrıca taşın yapısında bulunan en büyük mineral, tane çapının en az 10 katı büyüklüğünde olmalıdır.) silindirik karotlar, yığma yapıyı oluşturan taşlardan alınır. Alınan karot numuneler, deneye hazırlanması için öncelikle birbirine paralel iki başı çap/yükseklik oranı $1/1 \sim 1/0,5$ olacak şekilde taş kesme aleti ile kesilir (Ulusay vd., 2001; TS 699, 1987).

Yük, darbesiz ve sürekli olacak şekilde, sabit bir hızla deney numunesi kırılıncaya kadar uygulanır (Şekil 4.20). Bu hız, deney numunesi yapısına bağlı olarak 1 dakika ile 10 dakika arasında kırılacak mertebede ve dakikada yaklaşık $3,5 \text{ N/mm}^2$ ile 21 N/mm^2 olmalıdır. Kuvvet göstergesinden okunan maksimum yük kaydedilir (TS 699, 1987).



Şekil 4.20. Yarmada çekme testi ve kırılmış numune

Taşın yarmada çekme dayanımı, aşağıdaki eşitlik yardımı ile elde edilir (Ulusay vd., 2001; TS 699, 1987).

$$f_{yç} (MPa) = \frac{2P_k}{\pi LD} \quad 4.19$$

Burada, P_k (N) kırılmaya sebep olan en büyük yükü, D (mm) numune çapını, L numune yüksekliğini (mm) ve $f_{yç}$ (N/mm²) taşın yarmada çekme mukavemetini belirtir.

4.5.4. Yoğunluk ve porozite testleri

Yığma yapıyı oluşturan elemanların, görünür yoğunluk (hacimsel kütle) gerçek birim hacim ağırlığı (özgül ağırlık) ve porozite (gözeneklilik derecesi) tayini, bu elemanların durabilitesi, bozunma süresi, donma çözünme dayanımı hakkında geniş bilgiler elde edilmesinde bize yardımcı olur.

Bu testler için alınan düzgün şekilli ya da düzgün şekilli olmayan numuneler, TS 699'a uygun olarak etüvde kütlesi sabit kalana kadar kurutulur ve G_k kuru ağırlığı tartılır. Daha sonra TS 699'a uygun olarak suda bekletilerek; suya doymun hale getirilir, su içinde ve su dışında tartılarak, G_{ds} doymun haldeki numunenin su içindeki kütlesi ile G_{dh} doymun haldeki numunenin havadaki kütlesi elde edilir. Bu değerler kullanılarak aşağıdaki formüllerle hacimsel kütle, özgül ağırlık ve P porozite tayin edilir:

$$d_h = \frac{G_k}{G_{dh} - G_{ds}} \quad (g / cm^3) \quad 4.20$$

$$d_o = \frac{G_k}{G_k - G_{ds}} \quad (g / cm^3) \quad 4.21$$

$$P = \left(1 - \frac{d_h}{d_o}\right) \times 100 \quad 4.22$$

Burada, d_h , hacimsel kütle (görünür yoğunluk), d_o , özgül ağırlık (gerçek yoğunluk) ve P ise porozitedir.

4.5.5. Ultra ses darbe testi

Taş benzeri malzemelerin elastik sabitleri olan elastisite modülü ve Poisson oranı, malzeme içinden geçen basınç ve kayma ultra ses dalgaları hızı yardımıyla tespit edilebilir (ASTM D2845, 1969).

Bu yöntemle bulunan elastik sabitler, tek eksenli basınç testi ile elastisite modülü tayinine göre genelde daha büyük değerler verir (Ulusay vd.,2001).

Ultra ses darbe testi için D çapı 31 mm den büyük olan ve yükseklik çapından büyük olan silindir karot numuneler kullanılır. Silindirin her iki yüzeyi gres yağı ile yağlanarak, ultra ses test cihazının gönderici ve alıcıları yüzeye dokundurulur. Gres yağı, yüzeydeki mikro boşlukları doldurarak alıcı ve vericiler ile taşın yüzeyi arasında tam bir temas sağlanır. Basınç ve kayma, ultra ses dalgalarının numunenin içinden geçiş süresi saniye olarak ölçülür (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Ultra ses cihazı ve ölçümü

Aşağıdaki formüller yardımıyla V_p ve V_s basınç ve kayma dalgı hızları elde edilir.

$$V_p = \frac{L}{T_p} \quad 4.23$$

$$V_s = \frac{L}{T_s} \quad 4.24$$

Burada L (m), silindir numunenin yüksekliğini V_p basınç ultra ses darbe hızı ve V_s (m/sn) kayma ultra ses darbe hızıdır. T_p ve T_s sırasıyla basınç ve kayma ultra ses dalgalarının numunenin içinden geçiş süresidir

Elastisite modülü sabiti,

$$E(Pa) = \rho \times V_s^2 \times \frac{(3 \times V_p^2 - 4 \times V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad 4.25$$

bağıntısından elde edilir. Poisson oranı ise,

$$\nu_{dyn} = \frac{(V_p^2 - 2 \times V_s^2)}{2 \times (V_p^2 - V_s^2)} \quad 4.26$$

denkleminde hesaplanır. Kayma modülü ise,

$$G(Pa) = \rho \times V_s^2 \quad 4.27$$

eşitliği ile elde edilir. Burada ρ (kg/m^3) kütle yoğunluğudur (Ulusay vd., 2001).

Ultra ses hızını tespit etmek için aşağıdaki formül de kullanılabilir.

$$V = \frac{H}{t} \quad 4.28$$

Burada V (m/s) ultra ses dalga hızını, H (m) numune yüksekliğini t (s) ise ultra ses cihazında okunan, ses dalgasının numune içerisinden geçiş süresidir.

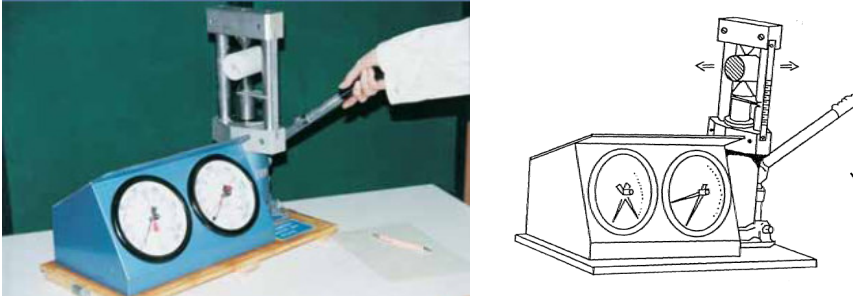
V ultra ses hızından yararlanarak aşağıdaki denklem yardımıyla Elastisite Modülü tayini yapılabilir (ASTM C597, 1997).

$$E = \rho \times V^2 \times (1 + m) \times \frac{(1 - 2m)}{(1 - m)} \quad 4.29$$

Bu eşitlikte V (m/s) ultra ses hızı, ρ (kg/m³), numune yoğunluğu, m Poisson oranı ve E (MPa), elastisite modülüdür.

4.5.6. Nokta yükü testi

Nokta yükü testi düzgün şekilli ve düzgün şekilli olmayan kayaların nokta yükü indeksinden mukavemetlerini belirlemek için kullanılır. Nokta yükleme deneyi, iki konik uç arasına yerleştirilen kayaç örneğinin kırılması esasına dayanmaktadır (Şekil 4.22). Dayanım indeksi, yenilme yükü ve örnek boyutları kullanılarak oluşturulur.



Şekil 4.22. Nokta yükü test cihazı (Ulusay vd., 2001)

Sıkıştırılan kayaç örneğinin yenilme yükü ve boyutları kullanılarak nokta yükleme dayanım indeksinin hesaplanması amaçlanmaktadır. Elde edilen nokta yükleme dayanım indeksi, kayaçların tek eksenli sıkışma ve çekme dayanımlarının dolaylı olarak belirlenmesinde, kayaçların malzeme özelliği açısından dayanımlarına göre sınıflandırılmasında, kayaç anizotropisinin saptanmasında, RMR kaya kütlesi sınıflamasında ve kayaçların dış etkilere karşı dayanıklılığı ile ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır. Genelde kayaçlar için önerilen bu deney, beton ve harç üzerinde de uygulanmıştır (Topal, 2001).

Nokta yükleme deney aleti; yükleme sistemi, yükleme gövdesi, yükleme pompası ve iki konik uç, yük göstergeleri ve deney esnasında konik uçlar arasındaki uzaklığı ölçen ölçüm sisteminden oluşur (Şekil 4.22). Ayrıca kayaç örneğinin boyutlarını ölçebilmek için ölçüm kumpası gereklidir.

Nokta yükleme deneyinde karot numuneler, kesilmiş blok numuneler veya düzensiz boyutlu numuneler kullanılabilir. Boyutları ölçülen ve konik uçlar arasına yerleştirilen kayaç örneği belirli bir süre içerisinde kırılır ve yenilme yükü, yük göstergesinden okunur.

Nokta yükleme deneyinde elde edilen yük (P) ve örnek boyutları (D, W) kullanılarak, öncelikle düzeltilmemiş nokta yükleme dayanımı (I_s) bulunur. Bunun için aşağıda verilen eşitlik kullanılır.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad 4.30$$

Burada D_e eşdeğer karot çapıdır. Çapsal deneylerde;

$$D_e^2 = ff \quad 4.31$$

eksenel deneyler ile blok veya düzensiz boyutlu örneklerde;

$$D_e^2 = 4 \frac{A}{E} \quad (A=WD) \quad 4.32$$

ifadeleri kullanılır. Burada (A) değeri, konik uçların temas noktalarından geçen örnek düzleminin en küçük kesit alanıdır. Deney, değişik eşdeğer çaptaki (D_c) örnekler üzerinde yapılabilmektedir. Bu durum ise düzeltilmemiş nokta yükleme dayanımını (I_s) değiştirmektedir. Bu nedenle, standart bir nokta yükleme dayanım indeksi ($I_{s(50)}$) bulabilmek için I_s değeri, 50 mm olarak belirlenmiş eşdeğer bir karot çapına ($D = 50$ mm) göre düzeltilmektedir. Bunun için literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Ancak pratik olması nedeniyle aşağıda verilen formül ISRM (1985) tarafından önerilmiş ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır:

$$I_{s(50)} = FI_s \quad 4.33$$

Burada F, düzeltme faktörü olup aşağıda verilen eşitlik yardımıyla bulunabilir:

$$F = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} \quad 4.34$$

Ortalama $I_{s(50)}$ değerini bulabilmek için, bir kayaç üzerinde en az 10 adet geçerli deney yapılmalıdır. En düşük ve en yüksek iki değer hesaba katılmadan kalan değerlerin ortalaması alınır. Örnek sayısı 10'dan az ise, en yüksek ve en düşük değerler hesaba katılmadan kalan değerlerin ortalaması alınır.

I_s den tek eksenli basınç kırılma yükü f_c , aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır (Tunçoku, 2001);

$$f_c = 10,6471 \times I_{s(50)} + 2,4736 \quad 4.35$$

4.5.7. X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve EDX testleri

Yığma yapıları oluşturan malzemelerin mikro boyutta yapısını, içerdiği mineral ve elementleri veya kullanılan harcın türünü belirlemek için bu testler uygulanır.

X-Işını Kırınımı (X-Ray Diffraction, XRD), X-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseninden atomik düzeyde bilgi edinmek için kullanılmaktadır. X-ışınları, ölçümleri kristale zarar vermeksizin yapısı hakkında bilgi veren güçlü bir yöntemdir. X-ışın kırınım deseninden; bir katıdaki düzlemler arasındaki mesafe (atomların oluşturduğu sıralar), tek kristalin veya taneciğin yönelimi, bilinmeyen bir malzemenin kristal yapısı, tanecik boyutu, gerilme durumu, şekli ve kimyasal kompozisyon hakkında bilgi elde edilebilir.

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Günümüz Taramalı Elektron Mikroskoplarında algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir. Yüksek çözünürlüklü görüntü tekniğine SEM ile malzemenin yüzey biçimsel ve yapısal özellikleri belirlenir. EDX, (Energy Dispersive X-Ray) enerji dağılımlı X ışını yöntemiyle incelen numunenin nicelik ve niteliği belirlenir.

4.6. Temel ve Zemin Araştırması

Tarihi bir yapının temel sisteminin tipinin derinliğinin ve büyüklüğünün bozunmaya uğrayıp uğramadığını belirlemek için muayene çukurları açılır; temel sondajları yapılır ve temelden karot alınır.

Yapının bulunduğu zemin üzerinde arazi ve laboratuvar testleri yapılarak zemin sınıfı, zemin emniyet gerilmesi ve yeraltı su seviyesi belirlenir. Böylelikle zemin durumundan dolayı yapıya zarar verebilecek unsurlar ortaya çıkarılır.

4.6.1. Zemin hakim periyodunun mikrotremor ölçümlerle belirlenmesi

Mikrotremorlar, düşük enerjili, genlikleri 10^{-4} mm ile 10^{-2} mm aralığında, periyotları 10^{-3} saniyeden bir kaç saniyeye kadar süren sismik dalgalardır (Toksöz and Lacoss, 1968; Kanai and Tanaka, 1961). Mikrotremorların en önemli özelliği, noktadan noktaya belirgin değişimler göstermesidir. Bu değişimler ölçüm yapılan zeminin jeolojik özellikleri ile ilişkilidir.

Tarihi yığma yapıların bulunduğu bölgelerin zemin davranışını belirlemeye yönelik olarak, zemin hakim periyodu, büyütme, ana kaya derinliği, hasar görülebilirlik ve kayma dalgası hızının derinlikle değişiminin saptanması amacıyla mikrotremor ölçümlerinden yararlanılabilir. Bu veriler sayesinde, olası bir depremde incelenen yapılarda oluşacak deprem kuvvetleri daha gerçekçi olarak hesaplanabilir.

Mikrotremorların sınıflandırılması periyotlarına (veya frekanslarına) göre yapılır. 1 saniye ve altı (1 Hz üzeri) periyotlarda ve doğal olmayan çevresel kaynaklarca (taşıt, makine vb.) oluşturulan titreşimlere kısa periyotlu titreşimler denir. 1 saniye ve üzeri (1 Hz altı) periyotlarda ve doğal olaylarca (atmosferik değişimler, rüzgâr, gelgit, vb.) oluşturulan titreşimlere ise uzun periyotlu titreşimler (mikroseism) denir. Kısa periyotlu mikrotremorların spektral genlikleri günlük değişimler göstermektedir. Buna karşın hakim periyotları kararlı özellikler göstermektedir. Uzun periyotlu mikrotremorların spektral genlikleri günlük değişimler açısından daha yavaştır ancak spektral genlikleri meteorolojik değişimlerden etkilenmektedir (Toksöz and Lacoss, 1968; Eskişar, 2008).

Yöntemin tarihsel gelişimi Omori (Omori, 1908) ile başlar. Omori, periyodu 2 saniyenin üzerindeki titreşimler (mikroseism) üzerine çalışmış ve bu tip

titreşimlerin kaynağını, okyanussal dalga yolundaki iletim mekanizmasını, kıtasal kabuktaki etkisini ve yayılım türünü araştırmıştır (Eskişar, 2008).

Mikrotremor ölçümlerinin genlikleri kayıt noktası etrafındaki aktivitelerin titreşimleri ile ilişkilidir. Bu nedenle gündüz saatlerinde alınan ölçümlerin genlikleri gece alınanlara oranla daha yüksek değerlerde elde edilmektedir. Çeşitli bölgelerden alınan tekrarlı kayıtlar göstermiştir ki gündüz saatlerindeki genlikler ve şehir içlerindeki genlikler kırsal alanlardaki genliklere oranla daha büyük değerler almaktadır (Kanai and Tanaka, 1961).

4.6.1.1. Mikrotremor Ölçümlerini Değerlendirme Yöntemleri

Mikrotremor ölçümleri dört farklı yöntem ile değerlendirilebilmektedir. Bu yöntemler:

- Fourier genliklerinin ya da güç spektrumlarının doğrudan değerlendirilmesi,
- Sert zemin / kaya üzerindeki bir referans noktasına göre spektral oranların elde edilmesi,
- H/V oranına göre spektral oranların belirlenmesi
- Sıfır kesme yöntemidir.

Tez çalışmasında, mikrotremor ölçümler Nakamura (Nakamura, 1989) yöntemi ile değerlendirilmiştir. H/V oranına göre spektral oranların belirlenmesi esasına dayanan Nakamura yöntemi, ölçüm yapılan yerin transfer fonksiyonunun modifiye edilmesine dayanır. Yönteme göre birinci varsayım, mikrotremorları oluşturan Rayleigh türü yüzey dalgalarıdır ve bunlar yüzey kaynakları tarafından yaratılır. Bu dalga türü, tabakalı bir ortamda hem yatay hem de düşey hareketlerden eşit şekilde etkilenmektedir. Yöntemdeki ikinci varsayım, mikrotremorların kaynağının sismometre yakınlarındaki trafik gibi çok yerel kaynaklar olduğu ve düşey hareket bileşeninin zemin tabakaları tarafından büyütülmediğidir. Bu nedenle Nakamura (1989) yöntemi ile baskın periyotlar doğru olarak belirlenmesine karşın büyütme faktörleri bilinmeyen kaynak etkisine bağlı olduklarından kesin bir doğrulukla belirlenmemektedir (Eskişar, 2008).

Zemin hakim periyodunu belirlemek için kullanılan ekipman üç eksenli ivmeölçer ve diz üstü bilgisayardan oluşur (Şekil 4.23). Ölçümler sırasında düz zemin şartlarını sağlamak için zemin kazılır ve zemine metal bir plaka yerleştirilir. Ölçü aleti (3 eksenli ivmeölçer) kuzeye yönlendirilerek cihaz plakanın üstüne oturtulur. Kuzey-Güney, Doğu-Batı ve düşey yönde olmak üzere eş zamanlı üç adet mikrotremor kaydı en az 20 dakika boyunca kaydedilir, daha sonra veriler çeşitli programlarda işlenerek zemin hakim periyotları ile zemin büyütmelelerinin değişimi belirlenir.



Şekil 4.23. Zemin hakim periyodunun tespiti ve 3 eksenli mikrotremor cihazı

4.7. Yığma Yapılara Uygulanan Testlerin Değerlendirilmesi

Yığma yapıları oluşturan malzemeler üzerinde yapılan tahribatlı ve tahribatsız testlerin sonuçları karşılaştırılarak bu testlerin sonuçları arasında bağıntılar kurulabilir. Elde edilen bu bağıntılar ile daha ucuz ve kolay olan testler üzerine yoğunlaşarak, malzeme parametrelerini belirlemek pratikleştirilebilir.

Yığma yapıyı oluşturan malzemelerin parametreleri belirlendikten sonra, yönetmelik ve şartnamelerde yer alan ampirik formüller yardımıyla yığma sistemin mekanik özellikleri elde edilebilir. Ancak elde edilen bu özellikler, çeşitli katsayı ve kabullere dayandığı için doğruluğu kesin değildir. Deneysel modal analiz yöntemleri kullanarak yapıların dinamik parametreleri ortaya çıkarılır ve sonuçlardan geriye gidilerek yapının mekanik özellikleri elde edilebilir. Daha sonra deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılır. Gerekli düzeltmeler yapılabilir ve yapının gerçek analitik modeline ulaşılabilir. Deneysel modal analiz testleri, servis yükleri altında yürütüldüğü için, elde edilen parametreler elastik bölgede bulunan parametrelerdir.

Yığma yapıların doğrusal olmayan analizleri için gerekli parametreleri elde etmek ancak gerçek modellerle çalışılarak mümkün olabilir ve bu da oldukça finans ve emek isteyen bir çalışmadır. Nitekim uzun dönem gözlemleri ile yapıların mevsimsel hareketleri tespit edilebilir ve yapıda varsa çatlaklar, bunların hareketleri kayıtlanarak yapının doğrusal olmayan davranışı hakkında tahmin yürütülebilir.

Ultrasonik-eko yöntemleri, Termografi yöntemleri ve radyoaktif metotlar ile tarihi yapıların dışardan görülmeyen; içyapısında meydana gelmiş çatlak, boşluk ve delimasyonların yerleri ve büyüklükleri belirlenerek yapının katı modeli daha gerçekçi olarak hazırlanabilir.

5. ÖRNEK OLAY ÇALIŞMASI: VEZİR SU KEMERİ VE ZEYTİNLER KÖPRÜSÜ

Yığma yapıların statik ve dinamik analizini gerçekleştirmek amacıyla İzmir’de yer alan iki adet örnek tarihi yapı ele alınmıştır. Bu yapılar Kadifekale yamaçlarında Yeşildere karayolunu kesen, Vezir Su Kemerı (Vezirağası Su Kemerı) ve Urla Zeytinler’de, Eski İzmir-Çeşme yolu üzerinde bulunan 3 açıklıklı taş kemer köprüdür (Yeni Köprü).

Örnek olay çalışmasında ilk olarak bu yapıların tarihi geçmişleri, boyutları, yapıları oluşturan malzemelerin cinsleri belirlenmiştir. Boyutları belirlenen yapıların 3 boyutlu modelleri bilgisayar ortamında hazırlanmıştır. Daha sonra yapılardan numuneler alınarak malzeme deneyleri yapılmış ve yapıyı oluşturan malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Yapılar üzerinde darbe-eko testleri uygulanarak yapıların içyapısı hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Yapılarda bulunan çatlakların derinlik ve büyüklükleri tespit edilmiştir. Yapıların dinamik karakterlerini deneysel olarak belirlemek için yapılar üzerinde Operasyonel Modal Analiz uygulaması yapılmış, yapıların modal parametreleri ortaya çıkarılmıştır. Son olarak yapıların bulunduğu zeminlerin hakim periyotları mikrotremor ölçümleriyle deneysel olarak belirlenmiştir.

5.1. Yapıların Tarihsel İncelemesi ve Tanımı

Tarihsel inceleme ile yapıların ne zaman, hangi malzemeler ve hangi tekniklerle yapıldığı ortaya çıkarılır. Bu sayede yapıları oluşturan malzemelerin malzeme özellikleri yapıya hasarlı testler uygulamadan elde edilebilir. Tarihsel inceleme ile yapının kullanım ömrü boyunca yapının maruz kaldığı deprem ve şiddetleri bilinebilir. Bu sayede yapıda oluşmuş çatlak ve hasarlar hakkında bir değerlendirme yapılabilir.

5.1.1. Vezir Su Kemerı

Yeşildere çevre karayolu üzerinde yer alan bu tarihi yapı, İzmir’in eski su şebekelerinden olan “Vezir Suyu”na ait bir Osmanlı su yoludur ve adı da “Vezir Su Kemerı”dır (Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3).

Şirinyer tren istasyonu yakınında kaynayan bir pınardan beslenen Vezir suyu, 0,55 m kalınlığında yan duvarlara sahip, 0,6 m genişliğinde bir mecrâ ile Melez çayını güney-kuzey yönünde yer alan Vezir Su Kemerî ile aşır, sol sahilde yamaç boyunca kavis çizerek İzmir'e ulaşmaktadır. Şekil 5.4'de İzmir'e su ileten başlıca su yollarının geçkileri verilmiştir (Weber, 1889; Öziş vd., 1999).



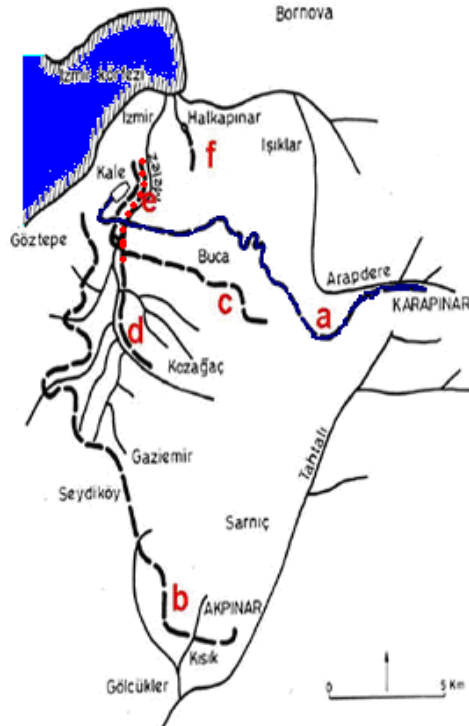
Şekil 5.1. Vezir Su Kemerî



Şekil 5.2. Vezir Su Kemerî Doğu Cephesi



Şekil 5.3. Vezir Su Kemer su yolu



Şekil 5.4. İzmir'e su ileten başlıca su yollarının geçkileri : (e) Buca-Vezir (Vezirağa) su yolu, (a) Karapınar su yolu, (b) Akpınar su yolu, (c) Buca su yolları, (d) Kozagaç-Osmanağa su yolu, (f) Halkapınar-Kapancıoğlu su yolu (Öziş vd. 1999).

Eser 1678 yılında, Sadrazam Köprülü Fazıl Ahmet Paşa tarafından yaptırılmıştır. 17. asrın ikinci yarısında, İzmir’de mevcut sokak çeşmeleri artık şehrin ihtiyacına yetmediği için şehirde ciddi bir su sıkıntısı başlamıştır. Bu nedenle Sadrazam Köprülü Fazıl Ahmet Paşa, bir su sistemi oluşturarak, daha sonraki yıllarda "Vezir Suyu" adıyla anılacak bu suyu kendi parası ile İzmir'e getirmiştir. Sadrazam daha sonra yine bizzat kendi servetinden harcayarak pek çok çeşme de yaptırarak, bu suyun şehrin her tarafına dağıtılmasını da sağlamıştır. İzmir Vakıflar Müdürlüğü III. vakfiye defter bilgilerinden anlaşıldığına göre 1896 ve 1909 tarihli kayıtlarda, bu çeşmelerden 64 tanesi isim ve adresleriyle birlikte belirtilmiştir (Aktepe, 2003).

Vezir su kemeri, 150 m uzunluğunda ve yüksekliği 7 ila 20 metre arasında değişen yığma bir yapıdır. Kemerin genişliği ise 3,5 m’dir. Yapının 45 metrelik orta bölümü doğal sebep ve yol çalışmaları sebebiyle yıkılmıştır. Günümüzde 85 metrelik 4 açıklıklı kuzey bölümü ile 20 metrelik tek açıklıklı güney bölümü hala ayakta durmaktadır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Vezir Su Kemer kuzey bölümü ve güney bölümleri

Su kemerinin ayakta kalan kısmının, kuzeyden güneye doğru kemer açıklıkları sırasıyla, 5,20 m, 5,33 m, 6,00 m, 3,5 m ve 5,33 m’dir. 3,5 metre açıklığa sahip olan kemer çift katlıdır. Kemerlerin yükseklikleri ise sırasıyla 6,40 m, 9,60 m, 9,50 m, ve 10,20 m yüksekliğindedir.

Yapının duvarları gri ve pembe andezit taşından örülmüştür. Bu taşların ayrıtları 20 cm ile 30 cm arasında değişmektedir. Zemine yakın taşların boyutları ise yer yer 70 cm’yi bulmaktadır. Kemerler 6 cm kalınlıklı, 20 cm enli ve 40 cm uzunluklu yassı tuğlalar arasına 3 ila 6 cm kalınlığında harç yerleştirilerek yapılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Tuğla kemer

Yapının kemerlerinin, kuzey taraflarında önemli çatlaklar bulunmaktadır (Şekil 5.7). Bu çatlakların genişlikleri 5 mm den 25 mm ye kadar ulaşmaktadır.



Şekil 5.7. Vezir Su Kemer kuzey tarafında bulunan ve kemer enince uzanan çatlaklar

5.1.2. Zeytinler Köprüsü

Eski İzmir Çeşme yolu üzerinde bulunan köprü, 3 açıklıklı Roma tipi bir taş kemer köprüdür. 1950’li yıllarda İzmir – Çeşme yolu (Tepekahve Yolu) açılınca tarihi yol önemini yitirmiş ve ulaşımına kapanmıştır. 1990’lı yıllarda İzmir – Çeşme otoyolunun inşa edilmesi ile kemer köprü’nün otoyolda ilerlerken görülmesi mümkün olmuştur. Zeytinler Köprü’sü İzmir-Çeşme otobanında Çeşme yönüne

doğru ilerlerken Zeytinler otoban çıkışından 2 km önce kuzeydoğuda otoyoldan 200 metre uzaklıkta yer almaktadır (Şekil 5.8 ve Şekil 5.9).



Şekil 5.8. Zeytinler Köprüsü

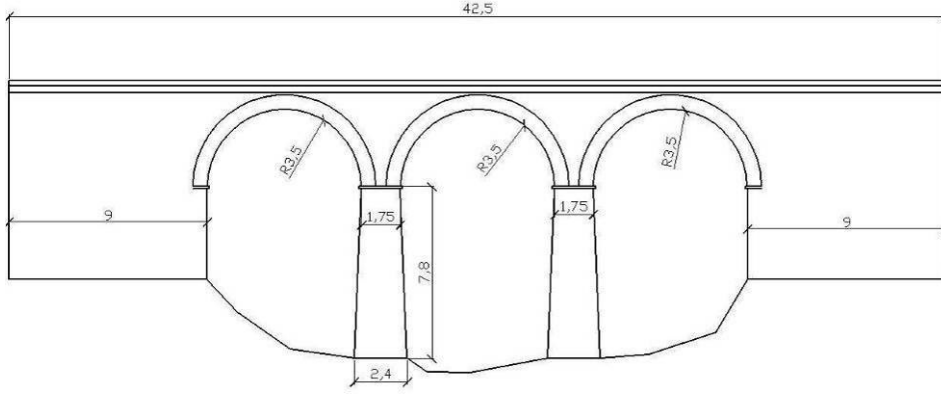


Şekil 5.9. Zeytinler Köprüsü (Google earth)

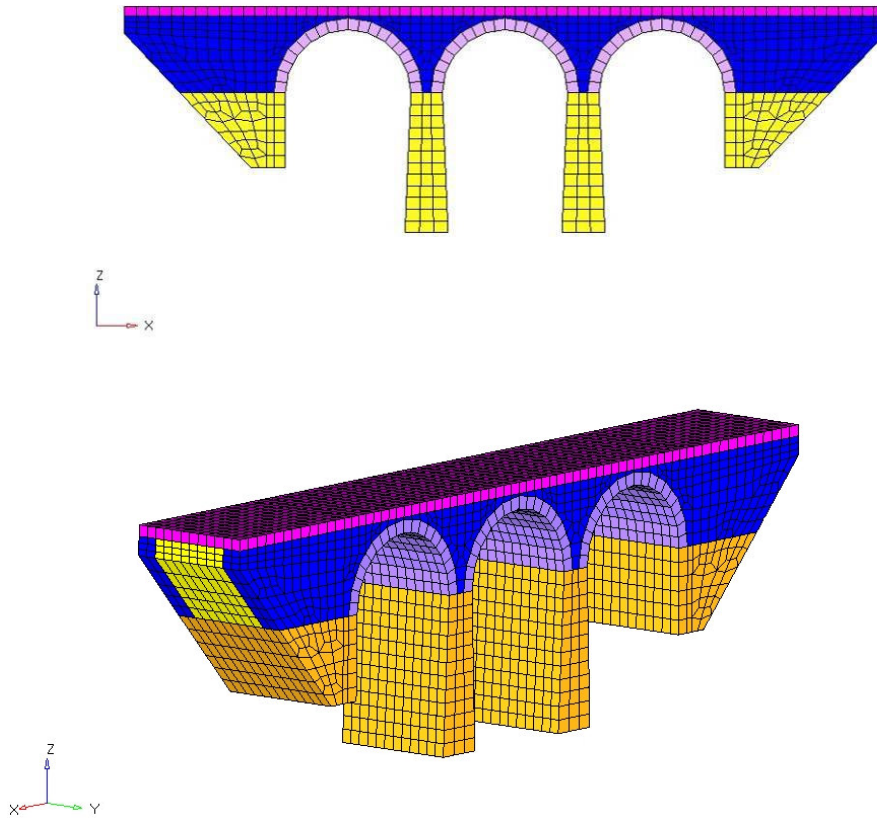
5.2. Yapıların Rölevelerinin Çıkarılması ve Üç Boyutlu Modellerinin Oluşturulması

Yapıların mevcut durumunun boyutlarını, yapıda meydana gelmiş çatlakların yerini ve büyüklüklerini tespit etmek için yapıların rölevesi çıkarılmıştır. Daha sonra bu röleveler yardımı ile yapının 3 boyutlu katı modeli oluşturulmuştur (Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12).

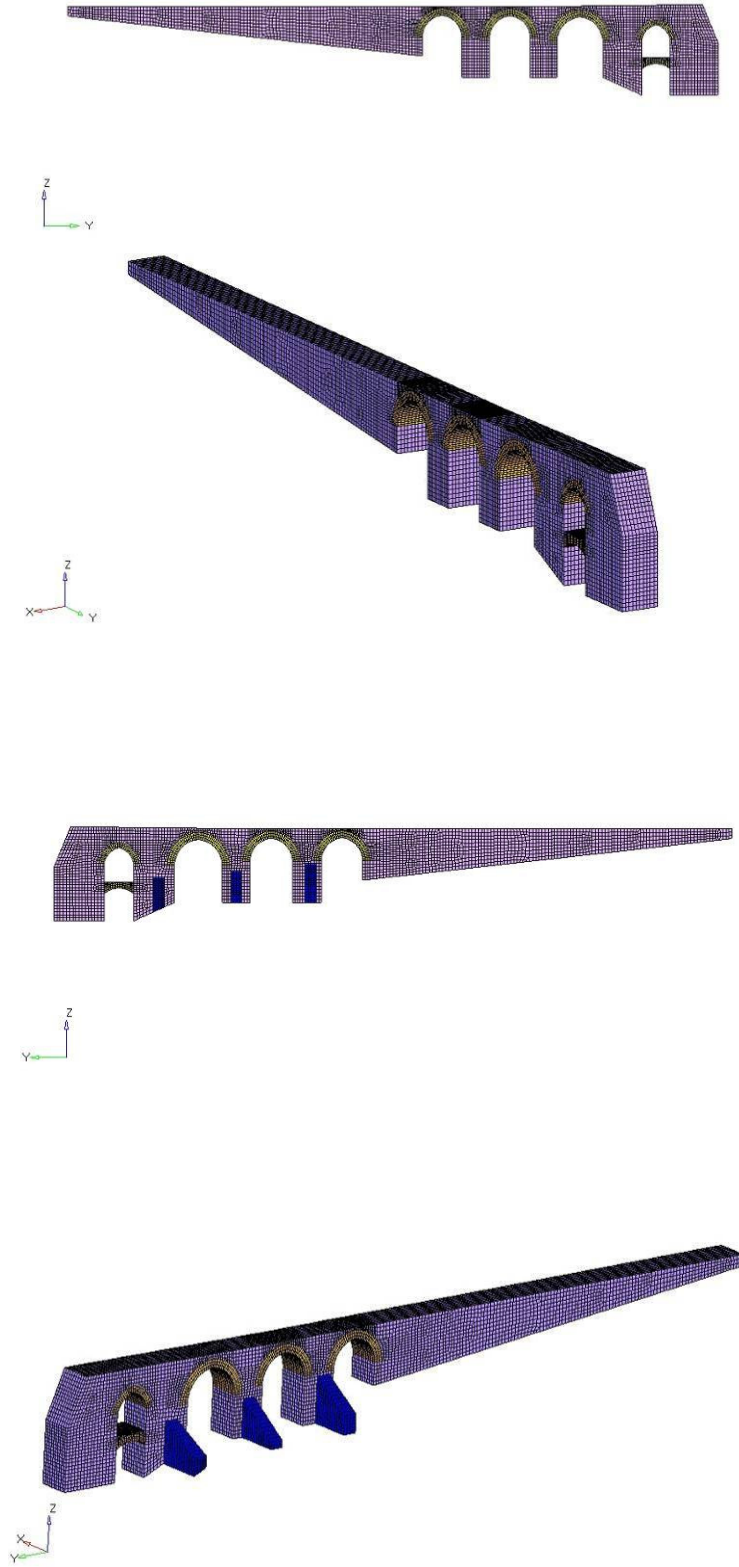
Üç boyutlu katı modeller AutoCAD (AutoCAD, 2004) paket programında oluşturulup, Hypermesh programında (Hypermesh, 2008) eleman boyutları Vezir Su kemeri'nde ortalama 30 cm, Zeytinler'deki kemer köprüde ise 50 cm olarak seçilerek katı (solid) elemanlara dönüştürülerek ağ (mesh) edilmiştir. Solid elemanlar 8 düğümlü prizmatik elemanlardır.



Şekil 5.10. Zeytinler Köprüsü AutoCAD çizimi



Şekil 5.11. Zeytinler Köprüsü 3-boyutlu katı modeli



Şekil 5.12. Vezir Su Kemerı 3-boyutlu katı modeli

5.3.Vezir Su Kemerini Oluşturan Malzemeler Üzerinde Yapılan Testler

Vezir Su Kemerini, kaba yontulmuş andezit taşı, yassı tuğla ve harç ile inşa edilmiştir. Sistemin yapısal analizi için yapıyı oluşturan malzeme parametreleri araştırılmıştır. Bu kapsamda yapıyı oluşturan bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için, tahribatlı ve tahribatsız testler yapılmıştır.

5.3.1. Taşıyıcı sistemi oluşturan taşlar üzerinde yapılan testler

Vezir Su Kemerini esas olarak kaba yontulmuş pembe ve gri andezit taşından inşa edilmiştir. Taşların ayrıtlarının temel ve alt kısımları 70 cm'ye kadar ulaşmaktadır. Ortalama ayrıt uzunluğu 25 cm'dir. Pembe ve gri andezit taşın yapı içerisindeki kullanımı eşit kabul edilebilir düzeydedir. Yapı, tarihi öneme sahip olduğu için ve Koruma Kurulu'nun talebi doğrultusunda yapıdan karot almak yerine, yapının yıkık kısmı olan Güney bölümündeki duvarlardaki bir kısım taşlar yerlerinden sökülüştür. Kuzey kısmından ise yapıdan düşmüş ve yarı ayrık taşlar yerlerinden çıkartılarak, karot alımı için laboratuara götürülmüştür. Laboratuarda karot makinesi ile çapı 54 mm olan silindir numuneler bu taşlardan elde edilmiştir. (Şekil 5.13). Tek eksenli basınç testi için boyları 56 mm ile 150 mm arasında değişen numuneler, yarmada çekme testi için ise boyları 30 mm 54 mm arasında değişen parçalardan çıkarılan karotlardan kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 5.14). Silindir numunelerin başlıkları makine ile zımparalanarak düzgün bir yüzeye sahip olmaları sağlanmıştır.



Şekil 5.13. Karot alma ve numunelerin kesilmesi



Şekil 5.14. Hazırlanmış karot numuneleri

Silindir numuneler üzerinde Schmidt çekici testi, ultra ses darbe testi, yoğunluk porozite testi, tek eksenli basınç ve yarmada çekme testleri yapılmıştır.

5.3.1.1. Su kemeri taşları Schmidt çekici testi

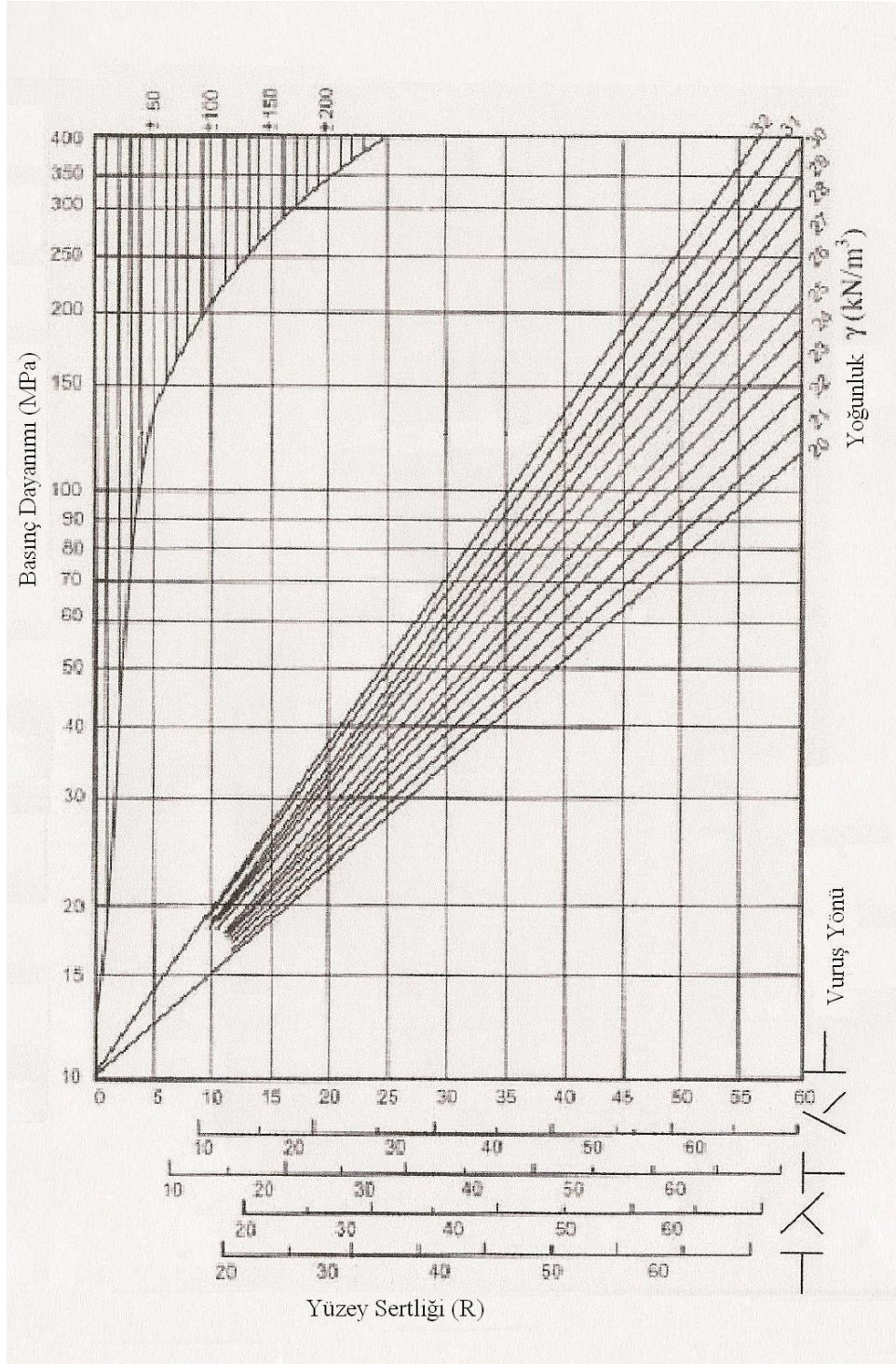
Vezir Su Kemerı yapı taşlarına Schmidt çekici testi uygulanmıştır. Bu amaçla 0.74 Nm vuruş enerjisi olan Proceq L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır. Kullanılan çekicinin testlerden önce ve sonra, kalibrasyon kovanında vuruş yapılarak hassasiyeti kontrol edilmiştir (Şekil 5.15). Schmidt çekici ile her taş için 10 vuruş yapılmış ve bu 10 değerden en küçük 5 değer hesaba katılmadan en yüksek 5 değerın ortalaması alınarak yüzey sertlik değeri R hesaplanmıştır (Ulusay vd., 2001). Yüzey sertlik değeriinden basınç mukavemeti tayini için Ulusay vd. (Ulusay vd., 2001) tarafından hazırlanan ve Şekil 5.16 da görülen abak kullanılmıştır. Schmidt çekicinin yatay, 45° eğimli, yukarı ve aşağı yönde tutularak test yapılması durumlarında farklı sonuçlar alınmaktadır. Bunun için Şekil 5.16'daki abağın alt kısmında vuruş yönüne göre belirtilen düzeltme değeri dikkate alınmıştır.



Şekil 5.15. Vezir Su Kemerı Schmidt çekici testi ve kalibrasyon kovası

Toplam 50 noktadan uygulanan çekiç testinden elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'de verilmiştir. Karot numunesi alımı için laboratuara götürülen taşlar üzerinde

de Schmidt testi yapılmıştır ve bunların sonuçları ise Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.16. Yüzey sertliği ve basınç mukavemeti arasındaki ilişki (Ulusay vd., 2001)

5.3.1.2. Su kemeri taşları ultra ses darbe testi

Hazırlanan karot numuneler basınç ve yarmada çekme mukavemeti testine tabi tutulmadan önce CNS Farnell Elektrik Pundit tipi ultra ses darbe testine tabi tutulmuştur. Cihaz 500 EHT voltluk, 10 pps (darbe/saniye) ultra ses dalgalarını vericisinden gönderip alıcısından alana kadar geçen zamanı μ saniye cinsinden vermektedir. Karot numunelerin yüzeylerinin alıcı ve verici proplarla tam temasını sağlamak için proplar ve taş numune arasına gres yağı sürülmüştür (Şekil 5.17). Test sonuçları Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de sunulmuştur.



Şekil 5.17. Ultra ses darbe testi

Ultra ses hızını tespit etmek için bölüm 4.4.5 de anlatılan prosedür ve Eşitlik 4.28 kullanılmıştır. Elde edilen ultrases darbe hızından Eşitlik 4.29 yardımıyla Elastisite Modülü tayini yapılmıştır (ASTM C597,1997).

Su kemeri andezit taşları (andezit) için Poisson oranı 0,21 kabul edilmiştir (Koca, 1999). Ultra ses hızından elde edilen değerler Tablo 5.2 ve Tablo 5.3’de sunulmuştur.

Ultra ses dalga hızından bulunan elastisite modülü değeri tek eksenli basınç testinde bulunan elastisite değerinden daha fazladır (Tablo 5.3).

5.3.1.3. Su kemeri taşları yoğunluk, porozite ve bağıl nem testi

Yoğunluk ve porozite testleri karot numuneleri ve karot alımından sonra kalan taş parçaları üzerinde yapılmıştır. Yoğunluk ve porozite testleri Bölüm

4.5.4'te sunulan prosedüre göre yapılmıştır. Numunelerin; d_h , hacimsel kütle (görünür yoğunluk), d_o , özgül ağırlık (gerçek yoğunluk), P porozite ve % bağıl nem değerleri elde edilmiştir (Şekil 5.18).

Elde edilen deney sonuçları Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de sunulmuştur.



Şekil 5.18. Etüvde kurutulan numuneler ve Arşimet terazisi

5.3.1.4. Su kemeri taşları tek eksenli basınç testi

Hazırlanmış karot numuneler deplasman kontrollü ve yük kontrollü olan 2 ayrı test cihazında test edilmiştir. Deplasman kontrollü cihazda numunelerin elastisite modülü tayini yapılmış, yük kontrollü cihazda ise numunelerin maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Yükleme, Bölüm 4.5.2 de anlatılan şartlara uygun olarak 0,2 mm/dakika deplasman yapacak şekilde uygulanmıştır. Tüm numuneler 5 ila 10 dakika arasında maksimum basınç dayanımına ulaşmıştır.

Deplasman kontrollü test cihazı, 100 kN kapasiteli Shimadzu AG IS 100'dür. Bu cihazın yükleme hızı 0,001 mm/dk ile 10 mm/dk arasında ayarlanabilmektedir. Yük kontrollü test cihazı ise 2000 kN kapasiteli Beton Presi'dir. Beton Presi'nin hızı 1 kN/dk ile 25 kN/dk arasında seçilebilmektedir (Şekil 5.19).

Test sonuçları Tablo 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.19. Deplasman kontrollü ve yük kontrollü yükleme cihazları

5.3.1.5. Su kemeri taşları yarmada çekme testi

Yarmada çekme testi prosedürü, Bölüm 4.5.3'te anlatılan şartlara uygun olarak TS 699'a (1987) göre yapılmıştır. Numuneler 1 ila 2 dakika arasında kırılmıştır (Şekil 5.20). Test sonuçları Tablo 5.3'de sunulmuştur.

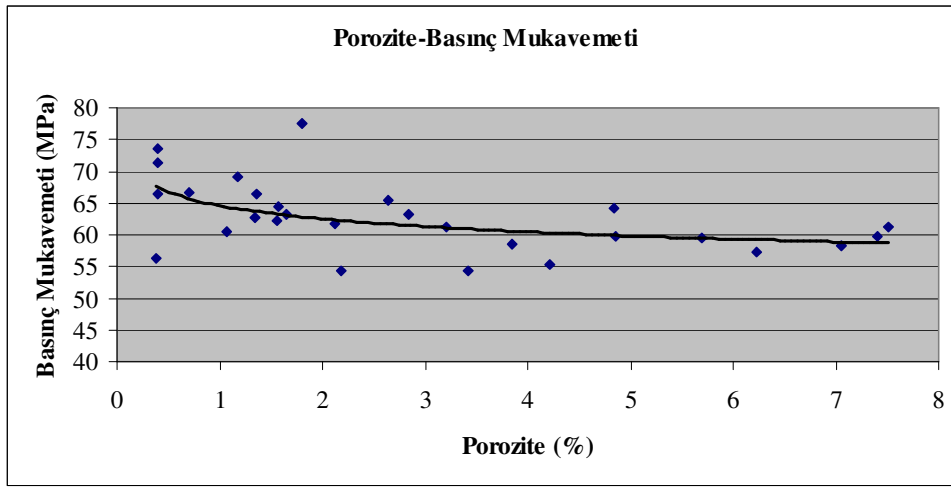


Şekil 5.20. Yarmada çekme testi

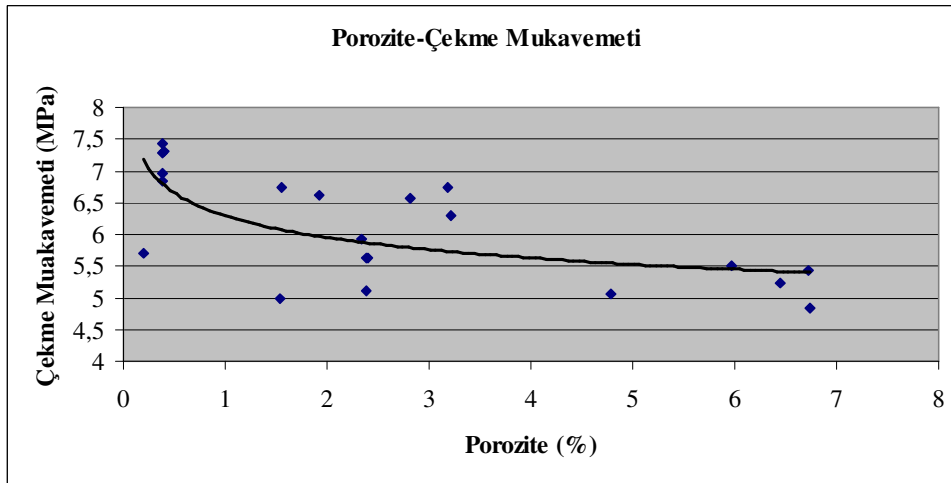
5.3.1.6. Su kemeri taşlarına ait test sonuçları arasındaki benzerlik

Şekil 5.21’de porozite ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki görülmektedir. Porozite azaldıkça basınç mukavemeti artmaktadır.

Şekil 5.22’de porozite ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki görülmektedir. Porozite azaldıkça çekme mukavemeti artmaktadır.



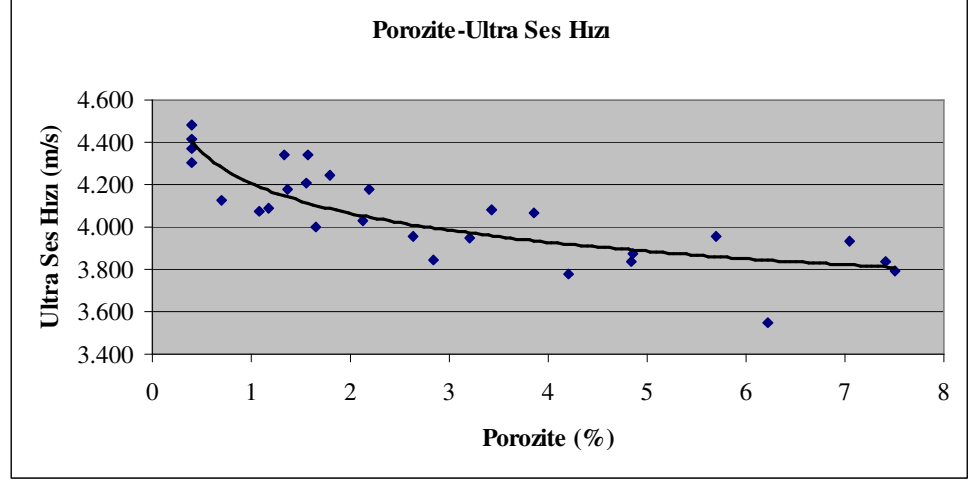
Şekil 5.21. Su kemeri taşlarına ait porozite-basınç mukavemeti arasındaki ilişki



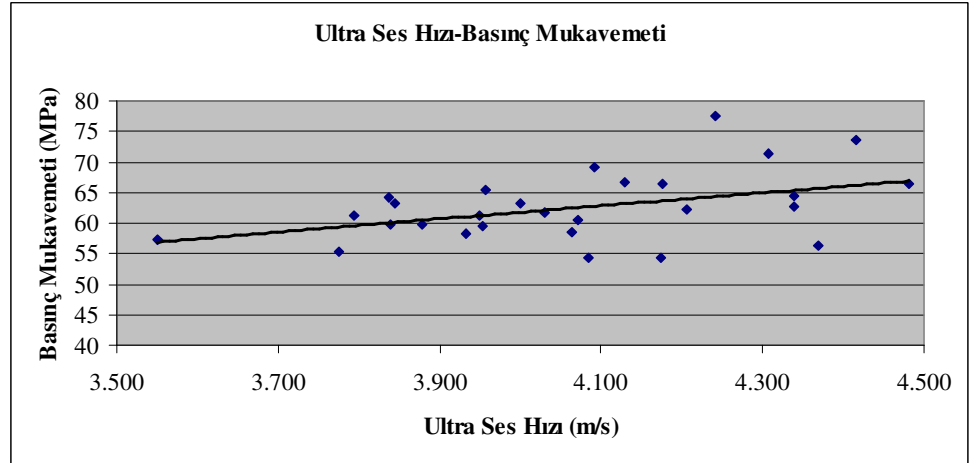
Şekil 5.22. Su kemeri taşlarına ait porozite-çekme mukavemeti arasındaki ilişki

Ultra ses hızı ile porozite arasında oldukça yakın bir ilişki olduğu Şekil 5.23'te net olarak görülmektedir. Porozite arttıkça ultra ses hızı azalmaktadır.

Ultra ses hızı ile basınç mukavemeti arasında da bir ilişki vardır. Şekil 5.24'de görüldüğü üzere ultra ses hızı arttıkça basınç mukavemeti artmaktadır.



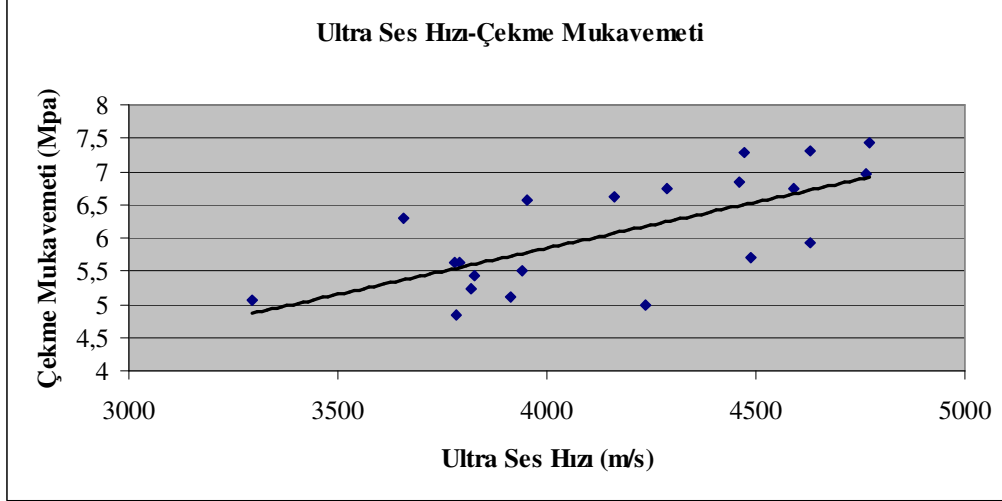
Şekil 5.23. Su kemeri taşlarına ait porozite-ultra ses hızı arasındaki ilişki



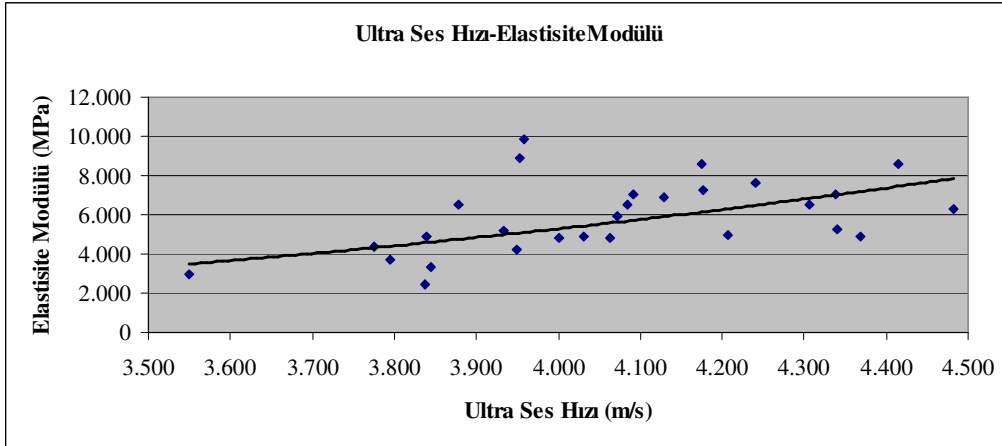
Şekil 5.24. Su kemeri taşlarına ait ultra ses hızı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki

Şekil 5.25’de görüldüğü üzere ultra ses hızı ile çekme mukavemeti arasında bir ilişki mevcuttur. Ultra ses hızı arttıkça çekme mukavemeti artmaktadır.

Ultra ses hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 5.26’da görülmektedir. Ultra ses hızı arttıkça elastisite modülü artmaktadır.



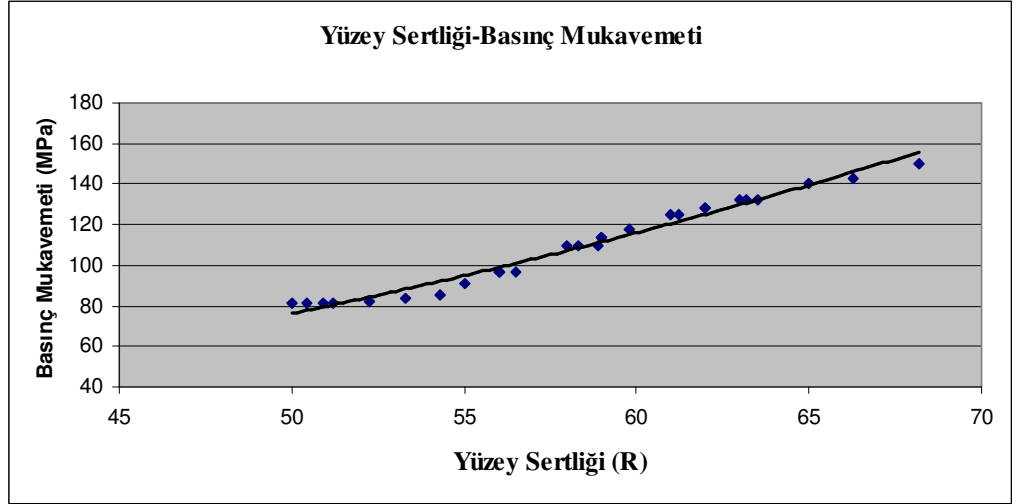
Şekil 5.25. Su kemeri taşlarına ait ultra ses hızı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki



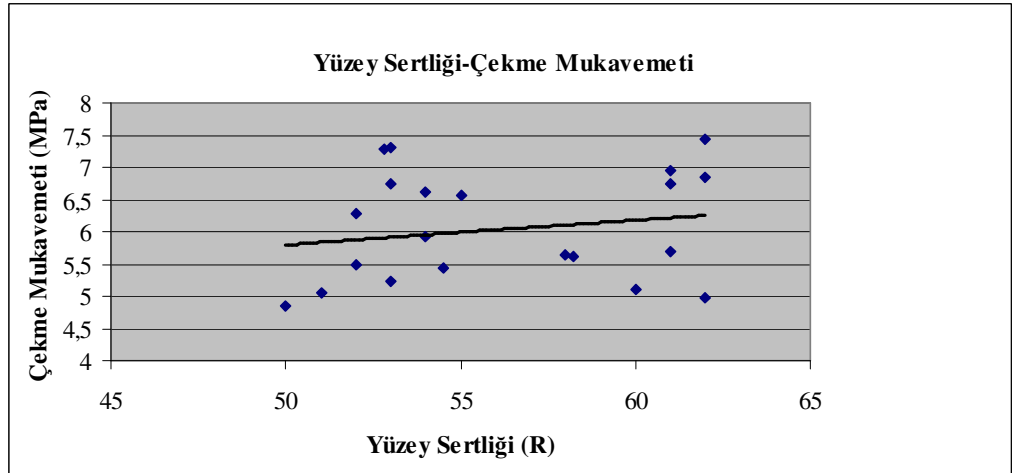
Şekil 5.26. Su kemeri taşlarına ait ultra ses hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki

Yüzey sertliği ve basınç mukavemeti arasında oldukça yakın bir ilişki vardır. Schmidt çekici testi, basınç mukavemetini belirlemede oldukça başarılıdır (Şekil 5.27).

Yüzey sertliği arttıkça çekme mukavemeti de artmaktadır (Şekil 5.28).



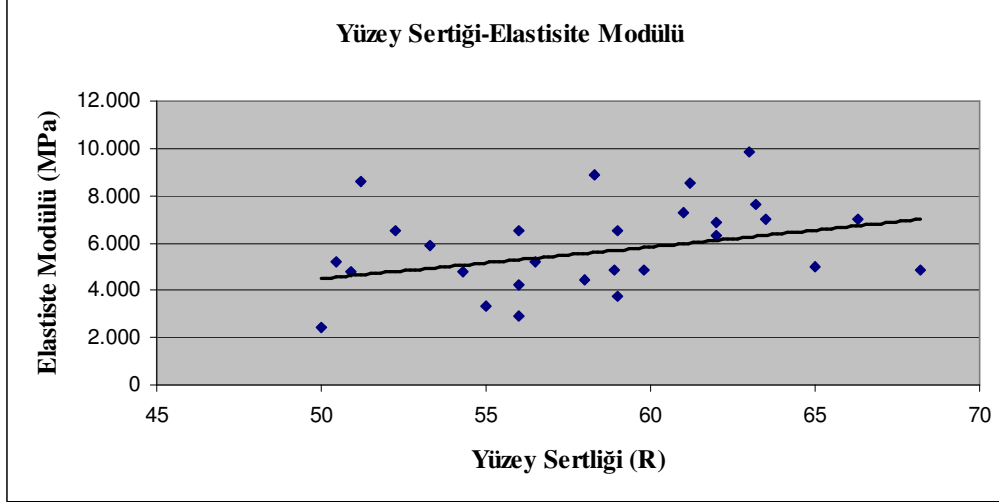
Şekil 5.27. Su kemeri taşlarına ait yüzey sertliği ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki



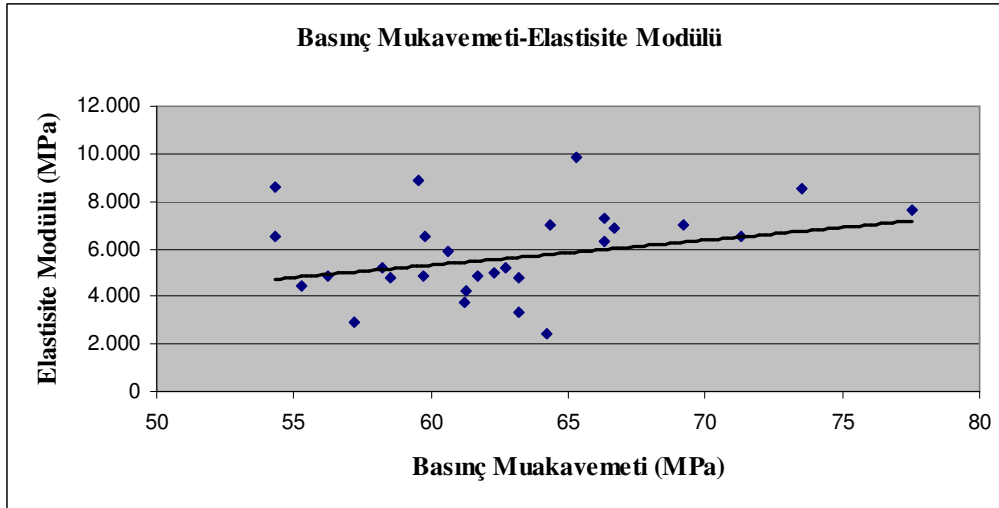
Şekil 5.28. Su kemeri taşlarına ait yüzey sertliği ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki

Yüzey sertliği elastisite modülü hakkında da yeterli bilgi vermektedir. Yüzey sertliği artıkça elastisite modülü artmaktadır (Şekil 5.29).

Basınç mukavemeti artıkça elastisite modülü de artmaktadır (Şekil 5.30).



Şekil 5.29. Su kemeri taşlarına ait yüzey sertliği ile elastisite modülü arasındaki ilişki



Şekil 5.30. Su kemeri taşlarına ait basınç mukavemeti ile elastisite modülü arasındaki ilişki

5.3.2. Su kemerinin kemerlerini oluşturan tuğla üzerinde yapılan testler

Vezir Su Kemerı yassı tipli Osmanlı tuğlasından oluşturulmuştur. Tuğla boyutları 40x20x5 cm'dir. Boyutlarının küçük olması sebebiyle tuğlalardan küçük küpler hazırlanarak basınç testine tabi tutulmuştur. Tuğlalardan çapı 5,4 mm olan karotlar alınarak boyu 5 cm olan numuneler hazırlanmış ve bunlar da yarmada çekme testine tabi tutulmuştur. Tuğlalar üzerinde Schmidt çekici, ultra ses darbe, yoğunluk, porozite, tek eksenli basınç ve yarmada çekme testleri yapılmıştır.

5.3.2.1. Su kemerı tuğlaları üzerinde Schmidt çekici testi

Vezir Su Kemerı yapı tuğlalarında Schmidt çekici testi yapılmıştır. Schmidt çekici olarak 0.74 Nm vuruş enerjisi olan Proceq L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır (Şekil 5.31). Schmidt çekici ile her tuğla için 10 vuruş yapılmış ve bu 10 değerden en küçük 5 değer hesaba katılmadan en yüksek 5 değerın ortalaması alınarak yüzey sertlik değeri R hesaplanmıştır.



Şekil 5.31. Tuğlaya uygulanan Schmidt testi

Su kemerı kemer tuğlaları için 15 noktada Schmidt çekici testi yapılmıştır (Şekil 5.31). Sonuçlar Tablo 5.4'de verilmiştir. Karot numunesi alımı için laboratuara götürülen tuğlalar üzerinde de Schmidt testi yapılmıştır. İlgili sonuçlar Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da verilmiştir.

5.3.2.2. Su kemerı tuğlaları üzerinde ultra ses darbe testi

Tuğla numuneler ve tuğlalardan kesilen numuneler basınç ve yarmada çekme mukavemeti testine tabi tutulmadan önce CNS Farnell Elektrik Pundit tipi

ultra ses darbe testine tabi tutulmuştur (Şekil 5.32). Test sonuçları Tablo 5.5 ve Tablo 5.6’da sunulmuştur.



Şekil 5.32. Ultra ses darbe testi

5.3.2.3. Su kemeri tuğlaları üzerinde yoğunluk, porozite ve bağıl nem testi

Tuğlalardan karot alımından sonra kalan parçalar üzerinde yoğunluk ve porozite testleri Bölüm 4.5.4’te sunulan prosedüre göre yapılarak, numunelerin d_h , hacimsel kütle (görünür yoğunluk), d_o , özgül ağırlık (gerçek yoğunluk), P porozite ve % bağıl nem değerleri elde edilmiştir (Şekil 5.33).

Elde edilen deney sonuçları Tablo 5.5 ve Tablo 5.6’da sunulmuştur.



Şekil 5.33. Etüvde kurutulan numuneler

5.3.2.4. Su kemeri tuğlaları üzerinde tek eksenli basınç testi

Hazırlanmış küp tuğla numuneler, deplasman kontrollü test cihazında test edilmiştir. Deplasman kontrollü cihazda numunelerin elastisite modülü ve maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Yükleme, Bölüm 4.5.2’de anlatılan şartlara uygun olarak 0,2 mm/dakika deplasman yapacak şekilde uygulanmıştır. Tüm numuneler 5 ila 10 dakika arasında maksimum basınç dayanımına ulaşmıştır.

Deplasman kontrollü test cihazı, 100 kN kapasiteli Shimadzu AG IS 100’dür. Deplasman kontrollü test cihazının yükleme hızı 0,001 mm/dk ile 10 mm/dk arasında ayarlanabilir (Şekil 5.34).

Test sonuçları Tablo 5.5’de sunulmuştur.



Şekil 5.34. Deplasman kontrollü yükleme cihazı

5.3.2.5. Su kemeri tuğlaları üzerinde yarmada çekme testi

Yarmada çekme testi prosedürü, Bölüm 4.5.3’te anlatılan şartlara uygun olarak TS 699’a göre yapılmıştır. Tuğla numuneler 1 ila 2 dakika arasında kırılmıştır (Şekil 5.35). Test sonuçları Tablo 5.5 ve Tablo 5.6’da sunulmuştur.



Şekil 5.35. Yarmada çekme testi

5.3.3. Su kemerini oluşturan harç üzerinde yapılan testler

Su kemerini oluşturan harç, karot numune almak için küçük ve zayıf olduğu için çıkartılan harç parçaları üzerinde Bölüm 4.5.6’da anlatılan prosedüre göre nokta yükü testi uygulanmıştır ve basınç mukavemetleri elde edilmiştir. 20 numune üzerinde yapılan testin sonuçları Tablo 5.7’de verilmiştir. Harç numunelerinin elastisite modülünü belirleyebilmek için harç parçalarında uygun olanlardan 3 tanesi düzgün kesilerek ve zımparalanarak preste kırılmış ve elastisite modülü ortalama 185 MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.1. Vezir Su Kemerli Schmidt testi değerleri

	Ayak-1 Batu	Ayak-1 Batu	Ayak-1 Batu (K)	Ayak-1 Batu (K)	Ayak-1 Batu	Ayak-1 Batu	Ayak-1 Batu (K)	Ayak-1 Batu (K)	Ayak-2 Doğu	Ayak-2 Doğu	Ayak-2 Doğu	Ayak-2 Doğu	Ayak-2 Batu	Ayak-2 Batu	Ayak-2 Batu	Ayak-2 Batu	Ayak-2 Batu	Ayak-2 Batu	DKP	DKP	Ayak-3 Doğu	Ayak-3 Doğu	Ayak-3 Batu
1	62	63	62	63	56	56	38	45	60	65	57	60	66	62	58	55	64	65	60	56	28	26	60
2	62	60	64	64	56	57	43	38	62	66	62	56	69	68	58	53	66	63	55	60	24	23	58
3	62	57	64	64	58	55	44	43	62	60	64	61	68	68	58	55	66	56	60	54	22	26	58
4	63	61	60	61	56	58	34	36	60	61	64	63	64	67	60	57	62	64	55	61	22	25	58
5	64	62	62	57	58	55	43	42	59	60	63	56	62	58	56	58	64	66	56	62	24	27	63
6	60	61	54	64	58	58	43	35	63	64	59	56	59	66	56	57	67	63	50	55	22	24	58
7	64	59	58	65	56	57	43	42	62	61	60	55	68	57	58	54	65	64	57	58	26	22	55
8	58	61	58	56	50	56	43	42	63	59	56	61	61	66	54	61	66	65	55	54	23	23	60
9	62	58	60	63	57	60	43	40	62	62	56	63	68	67	57	60	62	61	60	55	24	25	55
10	60	59	62	55	55	59	40	41	60	61	58	64	68	61	55	58	57	60	55	57	24	22	55
Ort.	61,7	60,1	60,4	61,2	56	57,1	41,4	40,4	61,3	61,9	59,9	59,5	65,3	64	57	56,8	63,9	62,7	56,3	57,2	23,9	24,3	58

	Ayak-3 Batu	Payanda 1	Payanda 1	Payanda 2	Payanda 2	Ayak-4 Doğu	Ayak-4 Doğu	Ayak-4 Batu	Ayak-4 Batu	Ayak-4 Batu	Ayak-4 Batu	Ayak-4 Kuruk	Ayak-4 Kuruk	Ayak-5 Doğu	Ayak-5 Doğu	Ayak-5 Doğu	Ayak-5 Doğu	Ayak-5 Doğu	Ayak-5 Doğu	Ayak-5 Batu	Ayak-5 Batu	Ayak-5 Batu	Ayak-5 Batu
1	57	64	63	65	66	40	36	48	47	62	64	62	65	63	63	48	43	51	48	63	64	62	61
2	57	66	65	55	65	44	42	48	47	61	64	64	67	63	56	50	44	48	52	65	62	63	61
3	60	64	65	62	65	46	40	42	50	62	63	61	66	61	64	42	45	46	45	65	63	62	66
4	62	66	66	64	63	44	46	49	49	60	64	63	67	56	66	50	48	48	45	66	65	64	65
5	55	67	67	62	56	40	45	47	45	60	60	65	65	61	64	41	47	46	51	64	65	63	63
6	55	67	68	64	63	38	44	48	52	58	60	61	62	63	57	46	50	52	55	64	67	60	63
7	54	64	67	61	61	42	44	50	42	64	57	62	61	58	62	48	52	48	50	60	61	62	60
8	59	63	62	62	57	45	46	50	49	61	58	66	60	65	61	51	46	48	48	63	66	64	64
9	65	64	60	63	63	46	42	48	46	56	61	68	63	63	64	50	46	56	55	64	67	63	65
10	63	62	64	60	61	42	40	42	48	56	62	66	64	63	62	41	42	48	46	66	61	66	60
Ort.	58,7	64,7	64,7	61,8	62	42,7	42,5	47,2	47,5	60	61,3	63,8	64	61,6	61,9	46,7	46,3	49,1	49,5	64	64,1	62,9	62,8

Tablo 5.2. Vezir Su Kemerı taş karotların basınç mukavemeti, ultra ses, yoğunluk-porozite test sonuçları

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi μ s	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Basınç Mukavemeti (Mpa)	R'den Basınç Mukavemeti (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)	Kırılma şekli
1	P1-1	7,98	2,488	2,542	2,124	68,2	19,8	4.030,303	141,281	61,72	150	4.865	14.429,845	KS
2	P1-2	9,20	2,505	2,539	1,339	50,45	21,2	4.339,623	143,524	62,70	81	5.230	16.729,779	KS
3	P1-3	9,50	2,392	2,514	4,853	52,23	24,5	3.877,551	136,886	59,80	82	6.530	13.356,766	KS
4	P1-4	9,10	2,46	2,515	2,187	51,2	21,8	4.174,312	124,296	54,30	81	8.600	15.479,469	KS
5	P1-5	8,90	2,346	2,44	3,852	50,9	21,9	4.063,927	133,910	58,50	81	4.800	14.671,620	KS
6	P1-6	10,30	2,493	2,52	1,071	53,32	25,3	4.071,146	138,717	60,60	84	5.900	14.723,792	KS
7	P2-1	7,91	2,338	2,525	7,406	58,9	20,6	3.839,806	136,680	59,71	110	4.890	13.097,994	KS
8	P2-2	5,90	2,345	2,523	7,055	56,5	15	3.933,333	133,292	58,23	97	5.200	13.743,830	KS
9	P2-3	6,80	2,398	2,543	5,702	58,32	17,2	3.953,488	136,336	59,56	110	8.900	13.885,042	KS

Tablo 5.2. Vezir Su Kemerı taş karotların basınç mukavemeti, ultra ses, yoğunluk-porozite test sonuçları (devam)

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi μ s	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Basınç Mukavemeti (Mpa)	R'den Basınç Mukavemeti (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)	Kırılma şekli
10	P2-4	13,00	2,345	2,523	7,055	54,32	32,5	4.000	144,737	63,23	85	4.800	14.213,671	KS
11	P2-5	11,03	2,398	2,543	5,702	56	27	4.085,185	124,342	54,32	97	6.500	14.825,514	KS
12	P3-1	6,83	2,498	2,54	1,654	59	18	3.794,444	140,090	61,20	114	3.720	12.790,357	KS
13	P3-2	11,15	2,453	2,54	3,425	55	29	3.844,828	144,669	63,20	91	3.300	13.132,276	KS
14	P3-3	11,65	2,34	2,53	7,510	56	29,5	3.949,153	140,319	61,30	97	4.215	13.854,603	KS
15	P3-4	13,43	2,468	2,54	2,835	50	35	3.837,143	146,958	64,20	81	2.435	13.079,833	KS
16	P3-5	9,25	2,478	2,56	3,203	58	24,5	3.775,510	126,585	55,30	110	4.405	12.663,028	KS
17	P3-6	7,10	2,398	2,52	4,841	56	20	3.550	130,934	57,20	97	2.931	11.195,487	KS
18	G4-1	9,95	2,366	2,47	4,211	62	24,1	4.128,631	152,657	66,69	128	6.875	15.142,527	KS

Tablo 5.2. Vezir Su Kemerı taş karotların basınç mukavemeti, ultra ses, yoğunluk-porozite test sonuçları (devam)

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi μ s	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Basınç Mukavemeti (Mpa)	R'den Basınç Mukavemeti (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)	Kırılma şekli
19	G4-2	11,20	2,41	2,57	6,226	63	28,3	3.957,597	149,521	65,32	132	9.850	13.913,918	KS
20	G4-3	12,30	2,56	2,578	0,698	63,2	29	4.241,379	177,539	77,56	132	7.615	15.980,873	KS
21	G4-4	13,02	2,51	2,578	2,638	59,8	29,8	4.369,128	128,714	56,23	118	4.890	16.958,042	KS
22	G4-5	9,23	2,51	2,556	1,800	61	22,1	4.176,471	151,810	66,32	125	7.258	15.495,483	KS
23	G5-1	11,50	2,56	2,57	0,389	59	26,7	4.307,116	163,256	71,32	114	6.530	16.480,084	KS
24	G5-2	10,60	2,53	2,565	1,365	65	25,2	4.206,349	142,654	62,32	140	4.984	15.717,987	KS
25	G5-3	9,86	2,54	2,55	0,392	62	22	4.481,818	151,879	66,35	128	6.320	17.844,104	KS
26	G5-4	9,98	2,52	2,56	1,563	63,5	23	4.339,130	147,324	64,36	132	7.010	16.725,984	KS
27	G5-5	10,20	2,52	2,53	0,395	61,2	23,1	4.415,584	168,246	73,50	125	8.560	17.320,589	KS
28	G5-6	7,98	2,51	2,55	1,569	66,3	19,5	4.092,308	158,403	69,20	143	7.030	14.877,256	KS

Tablo 5.3. Vezir Su Kemerı taş karotların çekme mukavemeti, ultra ses, yoğunluk-porozite test sonuçları

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Çap	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi μ s	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Çekme mukavemeti (MPa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)
1	P1-1	3,40	5,4	2,44	2,50	2,400	58,2	9	3.777,778	16,20	5,620	31.695.609
2	P1-2	3,60	5,4	2,45	2,51	2,390	58	9,5	3.789,474	17,20	5,636	32.019.739
3	P2-1	4,02	5,4	2,36	2,53	6,719	54,5	10,5	3.828,571	18,50	5,428	32.944.301
4	P2-2	4,03	5,4	2,42	2,49	2,811	55	10,2	3.950,980	22,40	6,556	34.529.904
5	P2-3	4,20	5,4	2,32	2,48	6,452	53	11	3.818,182	18,60	5,224	32.118.197
6	P2-4	5,20	5,4	2,36	2,51	5,976	52	13,2	3.939,394	24,23	5,496	34.603.404
7	P2-5	3,90	5,4	2,43	2,51	3,187	53	9,1	4.285,714	22,30	6,744	40.954.952
8	P2-6	4,50	5,4	2,35	2,52	6,746	50	11,9	3.781,513	18,50	4,849	32.012.377
9	G3-1	3,58	5,4	2,54	2,59	1,931	54	8,6	4.162,791	20,10	6,622	39.870.822
10	G3-2	2,83	5,4	2,53	2,54	0,394	53	6,1	4.631,148	17,50	7,307	48.394.636

Tablo 5.3. Vezir Su Kemerı taş karotların çekme mukavemeti, ultra ses, yoğunluk-porozite test sonuçları (devam)

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Çap	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi μ s	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Çekme mukavemeti (MPa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)
11	G3-3	4,40	5,4	2,51	2,57	2,335	54	9,5	4.631,579	22,10	5,924	48.975.349
12	G3-4	3,80	5,4	2,56	2,57	0,389	52,8	8,5	4.470,588	23,50	7,294	45.629.818
13	G3-5	3,58	5,4	2,54	2,58	1,550	61	7,8	4.589,744	20,48	6,748	48.281.730
14	G6-1	3,60	5,4	2,55	2,59	1,544	62	8,5	4.235,294	15,20	4,980	41.271.779
15	G6-2	4,20	5,4	2,56	2,57	0,389	62	8,8	4.772,727	26,50	7,442	52.005.902
16	G6-3	2,90	5,4	2,56	2,57	0,389	62	6,5	4.461,538	16,84	6,849	45.445.269
17	G6-4	3,50	5,4	2,56	2,57	0,195	61	7,8	4.487,179	16,90	5,695	45.879.695
18	G6-5	5,00	5,4	2,54	2,55	0,392	61	10,5	4.761,905	29,50	6,959	51.367.433
19	P7-2	4,50	5,4	2,45	2,51	2,390	60	11,5	3.913,043	19,50	5,111	34.142.030
20	P7-3	3,00	5,4	2,41	2,49	3,213	52	8,2	3.658,537	16,01	6,295	29.607.410
21	P7-4	2,80	5,4	2,39	2,51	4,781	51	8,5	3.294,118	12,01	5,059	24.195.701

Tablo 5.4. Vezir Su Kemerı kemer tuğlaları üzerinde yapılan Schmidt testi

	BK Ayak Kemer	Kemer-1	Kemer-1	Kemer-2	Kemer-2	Kemer-3	Kemer-3	Kemer-4	Kemer-4	Kemer-5	Kemer-5	Kemer-5 Üst	Kemer-5 Üst	G Yıkık Kemer	G Yıkık Kemer
1	40	40	40	36	33	32	32	30	26	30	25	34	35	47	36
2	42	32	45	34	33	36	37	35	26	28	22	26	27	42	42
3	46	35	41	32	32	36	30	36	28	29	28	28	30	42	40
4	42	32	42	36	32	32	35	35	27	35	26	31	30	44	36
5	42	34	45	34	40	32	32	30	30	26	28	28	33	47	32
6	48	39	43	32	38	35	33	32	29	30	33	28	33	48	43
7	50	38	41	34	36	36	33	28	30	24	32	26	31	42	42
8	48	39	36	34	42	30	30	28	35	31	22	31	33	47	36
9	50	30	42	35	38	30	29	30	34	30	24	32	31	49	40
10	40	38	44	28	32	30	30	32	32	28	25	32	36	42	38
Ort.	44,8	35,7	41,9	33,5	35,6	32,9	32,1	31,6	29,7	29,1	26,5	29,6	31,9	45	38,5

Tablo 5.5. Vezir Su Kemerı kemer tuğlaları basınç, ultra ses ve yoğunluk porozite testleri

No	Numune ismi	En (mm)	Uzunluk (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Boy L (mm)	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi (μs)	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Basınç Mukavemeti (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)
1	T1	35,33	34,74	1.227,36	34,14	1,82	2,1	13,33	28	12,1	2.821,49	11,82	9,631	1.028
2	T2	34,00	32,92	1.119,28	34,51	1,84	2,12	13,21	26	12,5	2.760,80	6,506	5,813	420
3	T3	35,56	35,25	1.253,49	35,00	1,85	2,12	12,74	33	12,1	2.892,56	11,85	9,455	1.265
4	T4	35,60	35,40	1.260,24	35,20	1,45	2,08	30,29	29	13,2	2.666,67	11,52	9,141	1.320
5	T5	35,40	35,10	1.242,54	34,25	1,95	2,14	8,88	32	12,5	2.740,00	11,25	9,054	1.015
6	T6	34,74	31,27	1.086,32	34,25	1,81	2,21	18,10	30	12,4	2.762,10	13,25	12,197	1.020
7	T7	35,33	32,21	1.137,98	35,65	1,78	2,19	18,72	26	11,5	3.100	14,38	12,636	956
8	T8	32,51	34,92	1.135,25	35,25	1,78	2,05	13,17	31	12,1	2.913,22	11,98	10,553	989
9	T9	34,25	35,20	1.205,60	32,15	1,81	2,01	9,95	31	10,9	2.949,54	15,27	12,666	938
10	T10	35,20	35,02	1.232,70	35,12	1,81	2,28	20,61	34	12,3	2.855,28	16,35	13,264	1.020
11	T11	35,78	35,20	1.259,46	35,00	1,78	2,15	17,21	25	12,3	2.845,53	12,45	9,885	1.307
12	T12	35,45	35,36	1.253,51	35,14	1,81	2,21	18,10	26	12,4	2.833,87	11,25	8,975	1.037
13	T13	35,02	35,98	1.260,02	35,30	1,89	2,06	8,25	30	14,7	2.401,36	11,78	9,349	990
14	T14	35,25	36,20	1.276,05	35,65	1,85	2,20	15,91	26	13,5	2.640,74	10,36	8,119	489
15	T15	35,48	28,32	1.004,79	45,00	1,81	2,32	21,98	37	15,1	2.980,13	15,56	15,486	1.480

Tablo 5.6. Vezir Su Kemerı kemer tuğlaları çekme, ultra ses ve yoğunluk porozite testleri

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Çap (mm)	Hacimsel kütle (dh)	Özgöl ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi (µs)	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Çekme mukavemeti (MPa)
1	T1	29,95	54	1,89	2,10	10	28	11,4	2.627,19	6,315	2,487
2	T2	30,61	54	1,85	2,12	12,74	35	10,9	2.808,26	7,987	3,078
3	T3	29,67	54	1,81	2,12	14,62	30	11,4	2.602,63	4,856	1,930
4	T4	27,74	54	1,45	2,08	30,29	25	11,1	2.499,10	2,895	1,231
5	T5	32,92	54	1,95	2,14	8,88	34	12,3	2.676,42	7,254	2,599
6	T6	32,51	54	1,81	2,21	18,10	33	11,2	2.902,68	7,226	2,622
7	T7	31,52	54	1,82	2,19	16,89	25	11,4	2.764,91	4,325	1,618
8	T8	32,5	54	1,84	2,05	10,24	36	11,6	2.801,72	7,896	2,866
9	T9	32,65	54	1,85	2,01	7,96	23	11,8	2.766,95	3,325	1,201
10	T10	32,22	54	1,45	2,28	36,40	24	11,8	2.730,51	2,253	0,825
11	T11	32,21	54	1,95	2,15	9,30	29	11,4	2.825,44	5,325	1,950
12	T12	31,24	54	1,81	2,21	18,10	32	10,2	3.062,75	8,256	3,117
13	T13	27,25	54	1,89	2,06	8,25	31	12,5	2.180	4,256	1,842
14	T14	28,95	54	1,85	2,20	15,91	26	11,6	2.495,69	3,258	1,327
15	T15	29,94	54	1,81	2,32	21,98	25	10,3	2.906,80	2,360	0,930

Tablo 5.7. Vezir Su Kemerli harç nokta yükü testi

No	Numune ismi	Genişlik (mm)	Çap (mm)	Eşdeğer çap De2 (mm ²)	P (N)	Is (Mpa)	F	Is(50) (Mpa)	Basınç Mukavemeti (Mpa)
1	h1-1	44,4	22,4	1.266,955	400	0,316	0,858	0,271	5,358
2	h1-2	48,5	30	1.853,503	850	0,459	0,935	0,429	7,038
3	h1-3	50	47	2.993,631	300	0,100	1,041	0,104	3,585
4	h1-4	53	28	1.890,446	400	0,212	0,939	0,199	4,589
5	h1-5	37	30	1.414,013	1000	0,707	0,880	0,622	9,097
6	h2-1	43	18	985,987	500	0,507	0,811	0,411	6,853
7	h2-2	53	39	2.633,121	700	0,266	1,012	0,269	5,337
8	h2-3	27	35	1.203,822	800	0,665	0,848	0,564	8,476
9	h2-4	35	26	1.159,236	600	0,518	0,841	0,435	7,109
10	h2-5	27	36	1.238,217	300	0,242	0,854	0,207	4,676
11	h2-6	44	21	1.177,070	800	0,680	0,844	0,574	8,582
12	h2-7	40	25	1.273,885	700	0,550	0,859	0,472	7,501
13	h2-8	30	42	1.605,096	500	0,312	0,905	0,282	5,476
14	h2-9	25	23	732,484	400	0,546	0,759	0,414	6,885
15	h2-10	35	30	1.337,580	300	0,224	0,869	0,195	4,548
16	h3-1	30	23	878,981	350	0,398	0,790	0,315	5,825
17	h3-2	33	35	1.471,338	500	0,340	0,888	0,302	5,685
18	h3-3	41	25	1.305,732	850	0,651	0,864	0,562	8,462
19	h3-4	41	32	1.671,338	300	0,179	0,913	0,164	4,219
20	h3-5	40	30	1.528,662	500	0,327	0,895	0,293	5,591

5.4. Zeytinler Köprüsü'nü Oluşturan Malzemeler Üzerinde Yapılan Testler

Urla Zeytinler Köyü'nde bulunan taş kemer köprü; kaba yontulmuş andezit taşı, harç, dolgu taşı ve kemeri oluşturan düzgün kesilmiş andezit taşı ile inşa edilmiştir. Yapının analizi için yapının malzeme parametreleri gereklidir. Bu nedenle yapıyı oluşturan bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için tahribatlı ve tahribatsız testler yapılmıştır.

5.4.1. Köprünün ayak ve yan duvarlarını oluşturan taşlar ile düzgün kesilmiş kemer taşları üzerinde yapılan testler

Kemer köprüyü oluşturan taşlar kaba yontulmuş gri ve pembe andezit taşlarıdır. Taşların ayrıtları temelde ve alt kısımlarda 50 cm'ye kadar ulaşmaktadır. Ortalama ayrıt uzunlukları 25 cm'dir. Pembe ve gri andezit taşlarının yapı içersindeki miktarı eşit kabul edilebilir düzeydedir. Kemer taşları sarı renkli bozunmuş andezit taşından örülmüştür. Bu taşlar köprünün diğer taşlarına göre daha yumuşak ve zayıf bir dokuya sahiptir. Yapı, tarihi öneme sahip olduğu için karot almak yerine, ayak ve üst yan duvarlarından yarı ayrık taşlar yerlerinden çıkartılarak karot alımı için laboratuara götürülmüştür. Laboratuarda, karot makinesi ile çapı 54 mm olan silindir numuneler bu taşlardan çıkarılmıştır. Tek eksenli basınç testi için boyları 27 mm ile 200 mm arasında değişen numuneler, yarmada çekme testi için ise boyları 30 mm 54 mm arasında değişen numuneler, çıkarılan karotlardan kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 5.36). Silindir numunelerin başlıkları zımpara makinesinde zımparalanarak düzgün bir yüzeye sahip olmaları sağlanmıştır.



Şekil 5.36. Hazırlanmış karot numuneleri

Silindir numuneler üzerinde Schmidt çekici, ultra ses darbe, yoğunluk, porozite, tek eksenli basınç ve yarmada çekme testleri yapılmıştır.

5.4.1.1. Köprü taşları üzerinde Schmidt çekici testi

3 açıklıklı kemer köprü yapı taşlarına Schmidt çekici testi yapılmıştır (Şekil 5.37). Su kemerine uygulanan prosedür, köprü için aynen uygulanmıştır.



Şekil 5.37. Kemer köprü Schmidt çekici testi

Köprünün yan duvarları ve ayakları için 40 farklı noktada, kemer taşları için ise 5 farklı noktada Schmidt çekici testi yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 5.8’de verilmiştir. Aynı şekilde karot numunesi alımı için laboratuara götürülen taşlar üzerinde de Schmidt testi yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 5.9 ve Tablo 5.10’da verilmiştir.

5.4.1.2. Köprü taşları üzerinde ultra ses darbe testi

Hazırlanan karot numuneler basınç ve yarmada çekme mukavemeti testine tabi tutulmadan önce ultra ses darbe testine tabi tutulmuştur. Su kemeri için uygulanan aynı prosedür bu yapı için de uygulanmıştır (Şekil 5.38). Test sonuçları Tablo 5.9 ve Tablo 5.10’da sunulmuştur.



Şekil 5.38. Ultra ses darbe testi

Köprü taşları (andezit) için Poisson oranı 0,21 alınmıştır (Koca, 1999). Ultra ses hızından elde edilen değerler ve elastisite modülü değerleri Tablo 5.9’da sunulmuştur. Ultra ses dalga hızından bulunan elastisite modülü değerleri tek eksenli basınç testinde bulunan elastisite değerinden daha büyüktür (Tablo 5.9 ve Tablo 5.10)

5.4.1.3. Köprü taşları üzerinde yoğunluk, porozite ve bağıl nem testi

Karot numuneleri ve karot alımından sonra kalan taş parçaları üzerinde yoğunluk ve porozite testleri Bölüm 4.5.4’te sunulan prosedüre göre yapılarak numunelerin d_h , hacimsel kütle (görünür yoğunluk), d_o , özgül ağırlık (gerçek yoğunluk), P, porozite ve % bağıl nem değerleri elde edilmiştir.

Elde edilen deney sonuçları Tablo 5.9 ve Tablo 5.10’da sunulmuştur.

5.4.1.4. Köprü taşları üzerinde tek eksenli basınç testi

Hazırlanmış karot numuneler su kemerinde olduğu gibi, deplasman kontrollü ve yük kontrollü olan 2 ayrı test cihazında test edilmiştir. Deplasman kontrollü cihazda numunelerin elastisite modülü tayini yapılmış, yük kontrollü cihazda ise numunelerin maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Yükleme, Bölüm 4.5.2’de anlatılan şartlara uygun olarak 0,2 mm/dakika deplasman yapacak şekilde uygulanmıştır. Tüm numuneler 5 ila 10 dakika arasında maksimum basınç dayanımına ulaşmıştır. Numunelerin kırılma şekli beklendiği gibi kum saati şeklinde olmuştur. Test sonuçları Tablo 5.9’da verilmiştir.

5.4.1.5. Yarmada çekme testi

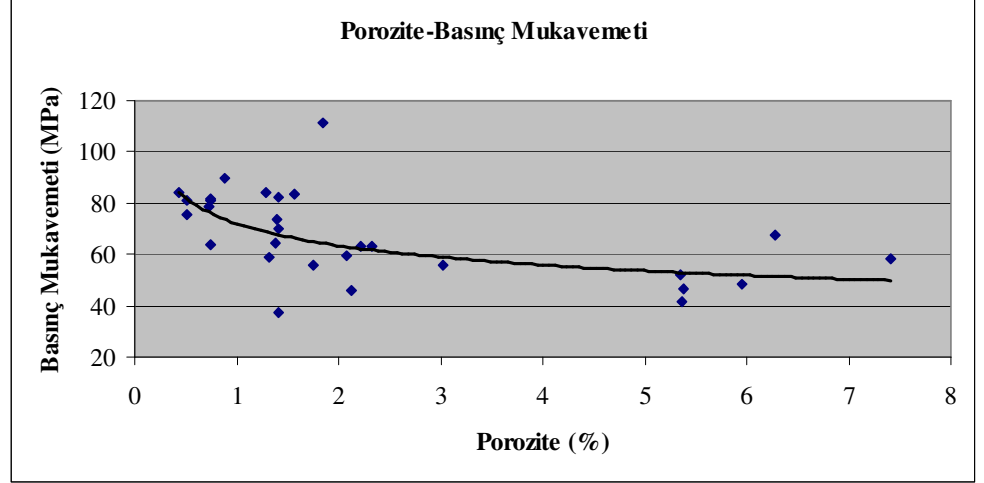
Yarmada çekme testi prosedürü, Bölüm 4.5.3'te anlatılan şartlara uygun olarak TS 699'a göre yapılmıştır. Numuneler 1 ila 2 dakika arasında kırılmıştır. Test sonuçları Tablo 5.10'da verilmiştir.

5.4.1.6. Test sonuçları arasındaki benzerlik

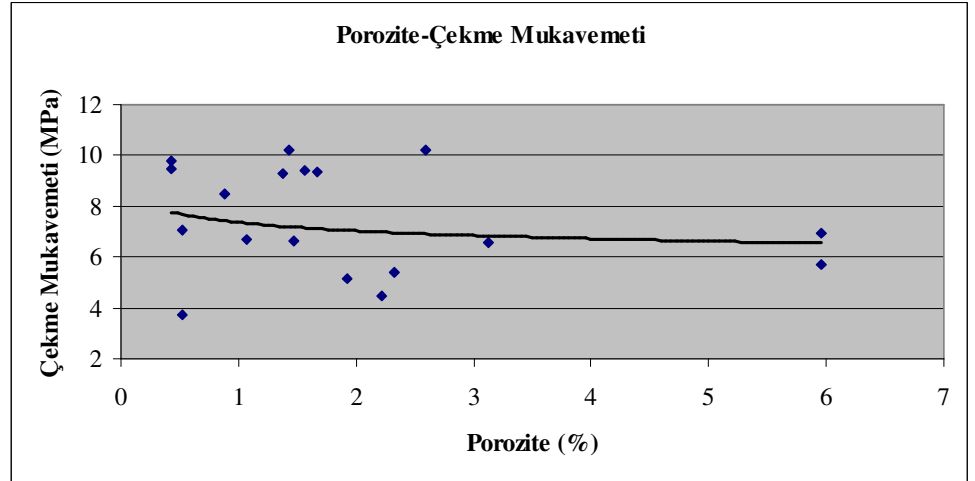
Kemer köprüden alınan numune miktarı yapıyı oluşturan tüm malzemelerin miktarı yanında oldukça küçüktür. Ayrıca tarihi öneme sahip yapılardan çok fazla numune alıp yapıya zarar vermek hem yasal, hem etik, hem de pratik olarak uygun değildir. Test sonuçları arasındaki benzerliğin belirlenmesi aradığımız parametrelere ulaşmada bize hız kazandırabilir. Bu amaçla yapılan testler birbirleri ile karşılaştırılıp aralarındaki ilişkiler gösterilmiştir.

Şekil 5.39'da porozite ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki görülmektedir. Porozite azaldıkça basınç mukavemeti artmaktadır.

Şekil 5.40'ta porozite ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki görülmektedir. Porozite azaldıkça çekme mukavemeti artmaktadır.



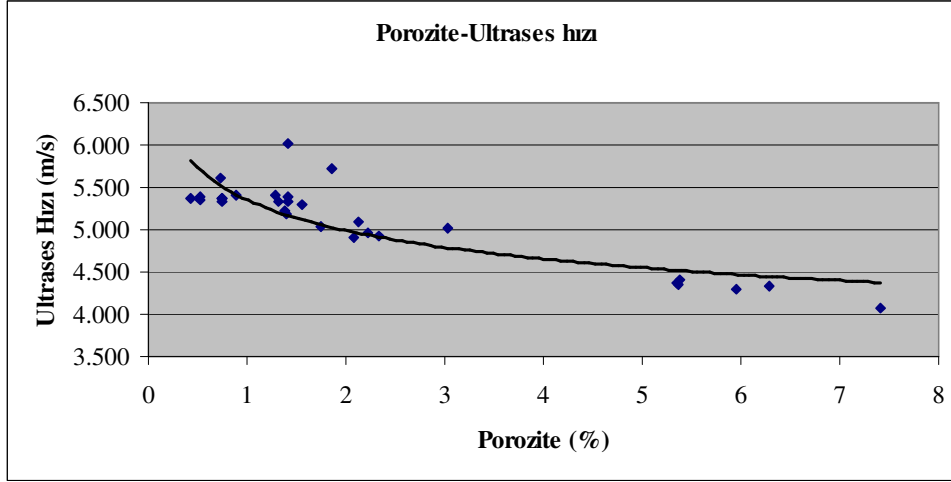
Şekil 5.39. Porozite-basınç mukavemeti arasındaki ilişki



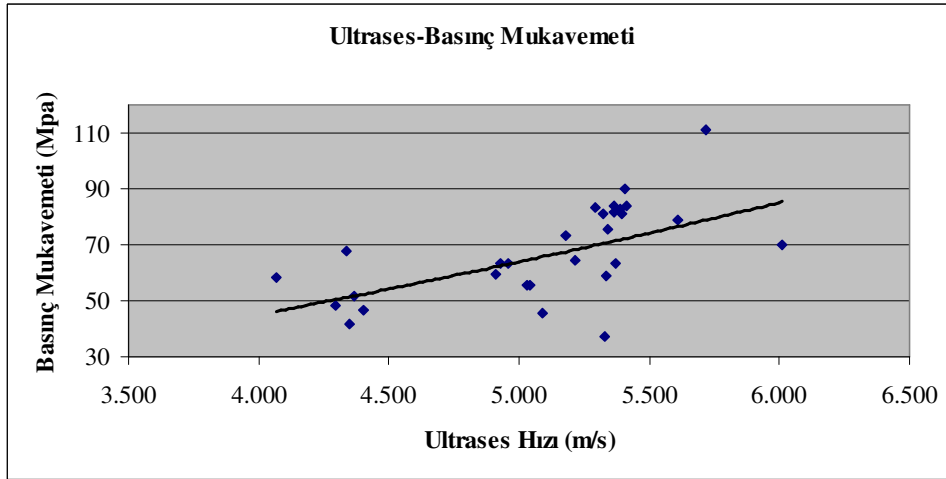
Şekil 5.40. Porozite-çekme mukavemeti arasındaki ilişki

Ultra ses hızı ile porozite arasında oldukça yakın bir ilişki olduğu Şekil 5.41’de net olarak görülmektedir. Porozite arttıkça ultra ses hızı azalmaktadır.

Ultra ses hızı ile basınç mukavemeti arasında da bir ilişki vardır. Şekil 5.42’de görüldüğü üzere ultra ses hızı arttıkça basınç mukavemeti artmaktadır.



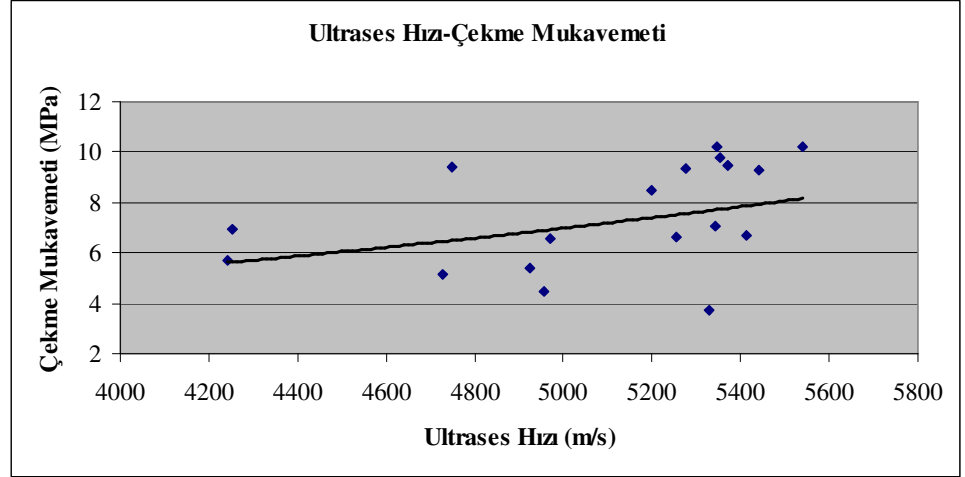
Şekil 5.41. Porozite-ultra ses hızı arasındaki ilişki



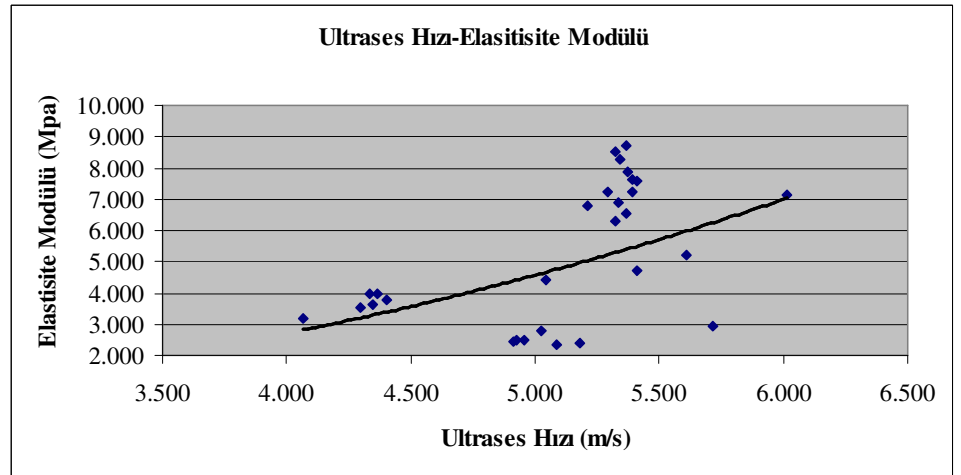
Şekil 5.42. Ultra ses hızı ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki

Şekil 5.43’de görüldüğü üzere ultra ses hızı ile çekme mukavemeti arasında bir ilişki mevcuttur. Ultra ses hızı arttıkça çekme mukavemeti artmaktadır.

Ultra ses hızı ile elastisite modülü arasında Şekil 5.44’de görüldüğü gibi bir ilişki vardır. Ultra ses hızı arttıkça elastisite modülü artmaktadır.



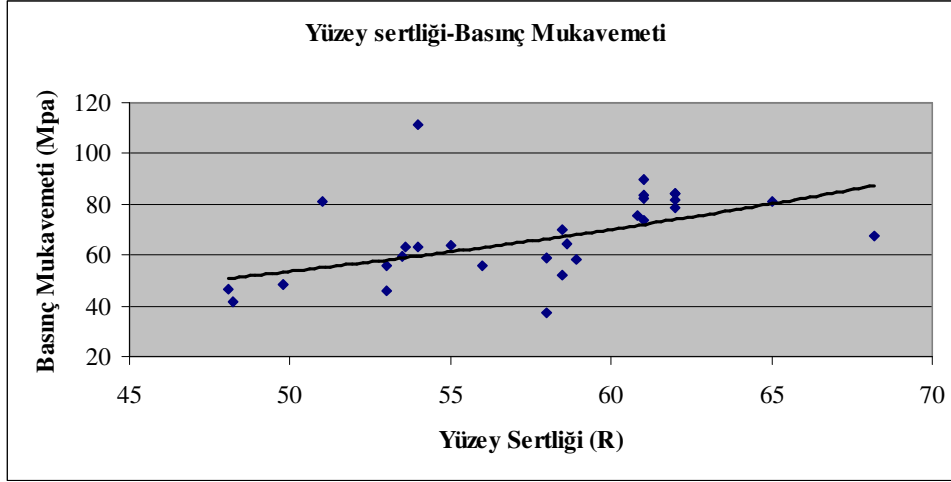
Şekil 5.43. Ultra ses hızı ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki



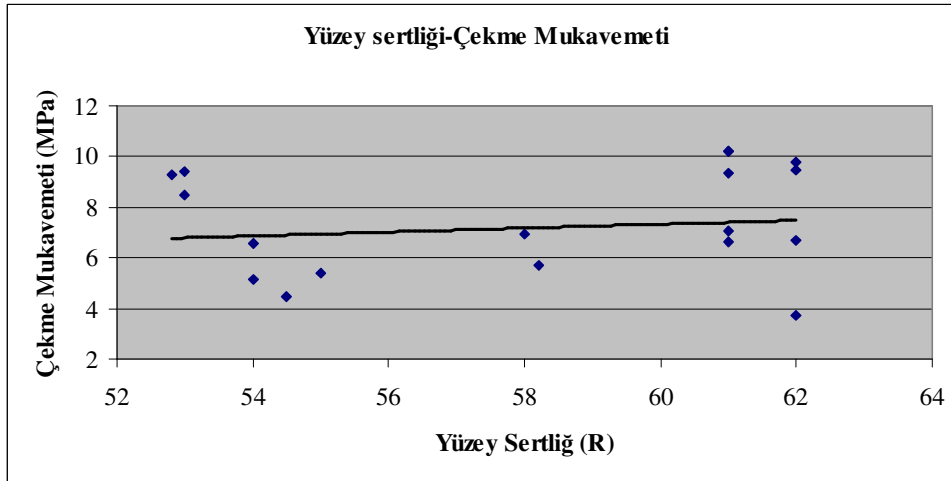
Şekil 5.44. Ultra ses hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki

Yüzey sertliği ve basınç mukavemeti arasında oldukça yakın bir ilişki vardır. Schmidt çekici testi basınç mukavemetini belirlemede oldukça başarılıdır (Şekil 5.45).

Yüzey sertliği artıkça çekme mukavemeti de artmaktadır (Şekil 5.46).



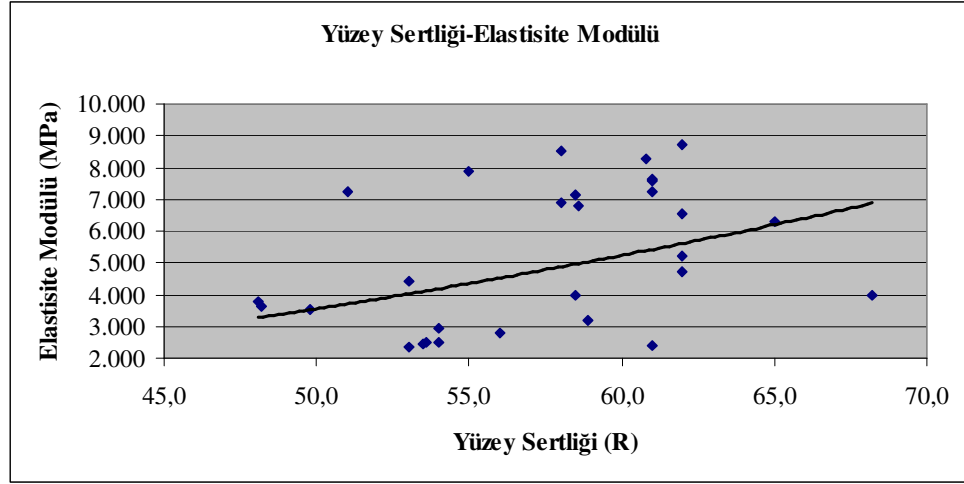
Şekil 5.45. Yüzey sertliği ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki



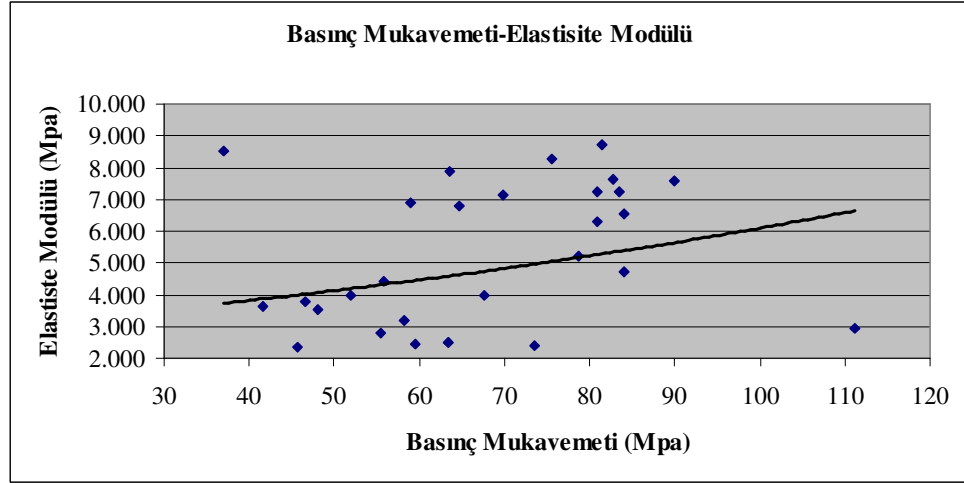
Şekil 5.46. Yüzey sertliği ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki

Yüzey sertliği elastisite modülü hakkında da yeterli bilgi vermektedir. Yüzey sertliği artıkça elastisite modülü artmaktadır (Şekil 5.47).

Basınç mukavemeti artıkça elastisite modülü de artmaktadır (Şekil 5.48).



Şekil 5.47. Yüzey sertliği ile elastisite modülü arasındaki ilişki



Şekil 5.48. Basınç mukavemeti ile elastisite modülü arasındaki ilişki

Bu sonuçlar göstermiştir ki yapıda çok sayıda tahribatlı test yapmak yerine az miktarda numuneye Schmidt, ultra ses, yoğunluk porozite, basınç ve çekme testi yapıp yapının geri kalanına Schmidt testi ve ultra ses testi yapıp aralarındaki ilişki doğru kurulursa yapı hakkında yeterli bilgiler sağlanabilir.

5.4.2. Köprü kemerini oluşturan taşların mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Köprünün kemerleri ustalıklı kesilmiş taşlardan oluşturulmuştur. Bu taşlar, daire şeklindeki kemer oluşturmak için yan kenar ayrıtları tek bir merkezi hedefleyecek şekilde hazırlanmıştır. Köprünün duvarlarında kullanılan andezit taşı sert ve düzgün şekil vermek için uygun olmadığı için kemer taşları daha yumuşak olan bozunmuş andezit taşlarından oluşturulmuştur. Bu taşlardan, köprüye zarar vereceği düşünüldüğü için numuneler alınmamıştır. Bunun yerine Schmidt test sonuçları kullanılarak basınç dayanımı ve elastisite modülü tahmin edilmiştir.

Yapılan Schmidt testleri sonucunda, kemer oluşturulan taşların yüzey sertliği $R = 39,13$ olarak elde edilmiştir. Şekil 5.45'ten yararlanarak, kemer taşlarının basınç mukavemeti 39 MPa olarak tahmin edilmiştir. elastisite modülü ise Şekil 5.47'den yararlanılarak $E = 2000$ MPa olarak tahmin edilmiştir.

5.4.3. Köprüyü oluşturan harç üzerinde yapılan testler

Su kemerini oluşturan harç, karot numune almak için küçük ve zayıf olduğu için çıkartılan 20 adet harç parçası üzerinde nokta yükü testi uygulanmıştır. Test sonuçları Tablo 5.11'de sunulmuştur.

Harç numunelerinin elastisite modülünü belirleyebilmek için harç parçalarında uygun olanlardan 3 tanesi düzgün kesilerek ve zımparalanarak harç presinde kırılmış ve elastisite modülü ortalama 180 MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.8. Kemer köprü Schmidt çekici testi

	Ayak-1 Kuzey (P)	Ayak-1 Kuzey (A)	Ayak-1 Kuzey (P)	Ayak-1 Kuzey (G)	Ayak-1 Kuzey (S)	Kemer-1 (S)	Kemer-1 (S)	Kemer-1 (S)	Ayak-1 Güney	Ayak-1 Güney (S)	Ayak-1 Güney (S)	Ayak-1 Güney Alt	Ayak-1 Güney Alt	Ayak-1 Güney Kemer	Ayak-2 (P)	Ayak-2 (S)	Ayak-2 (K)	Ayak-2 (G)	Ayak-2 (S)	Ayak-2 (S)
1	64	42	68	68	40	40	45	48	60	40	40	54	63	41	60	37	58	58	57	42
2	66	45	69	67	45	38	45	60	63	34	33	46	66	38	58	44	60	57	57	36
3	68	34	66	65	37	34	41	63	55	44	40	54	68	36	46	38	54	52	58	33
4	67	38	66	66	44	38	42	65	58	35	36	64	64	39	60	46	56	64	56	41
5	66	39	68	66	41	35	43	69	63	36	38	62	55	41	53	42	53	54	53	33
6	68	45	64	69	35	40	35	47	61	34	38	55	58	40	52	37	50	64	56	35
7	62	35	66	68	40	37	40	62	61	34	36	60	66	39	56	38	54	66	52	32
8	69	35	68	64	38	42	39	65	53	34	33	55	55	44	58	38	49	60	57	36
9	67	35	64	68	39	44	37	68	56	36	34	64	69	43	58	46	50	54	62	37
10	65	38	61	65	41	36	35	68	55	34	38	60	67	35	54	36	50	54	64	34
Ort.	66,2	38,6	66	66,6	40	38,4	40,2	61,5	58,5	36,1	36,6	57,4	63,1	39,6	55,5	40,2	53,4	58,3	57,2	35,9

Tablo 5.8. Kemer köprü Schmidt çekici testi (devam)

Ayak-2 (G)	Ayak-2 (P)	Ayak-2 (K)	Ayak-1 Kuzey (P)	Ayak-1 Kuzey (G)	Ayak-2 Kuzey (K)	Ayak-2 (P)	Ayak-2 (G)	Ayak-3 (G)	Ayak-3 (P)	Ayak-3 (S)	Ayak-3 Kuzey Kemer (S)	Ayak-3 Kuzey (P)	Ayak-3 Kuzey (G)	Ayak-3 Kuzey Üst (P)	Döşeme	Ayak-3 Bordür (S)	Ayak-3 Güney Kemer (S)	Ayak-3 Güney (G)	Ayak-3 Güney (K)	Ayak-3 Güney (P)
51	63	41	52	53	46	50	58	64	51	45	46	52	65	55	40	38	44	52	46	54
42	56	41	62	53	45	41	59	65	58	35	48	53	55	56	38	44	50	52	46	64
53	56	52	55	63	40	52	60	64	51	37	40	51	59	65	39	44	44	51	47	56
52	63	42	52	53	38	45	58	56	56	45	48	50	55	60	36	44	55	57	56	62
42	60	42	53	56	39	48	50	61	49	43	41	52	56	55	38	44	58	56	52	56
51	56	48	54	53	30	42	58	66	48	36	48	51	56	55	34	36	42	53	46	60
52	60	52	53	60	40	50	60	65	51	40	41	60	56	58	42	38	40	47	47	59
53	63	51	62	55	43	50	60	56	57	40	41	52	63	65	38	36	44	52	50	54
43	62	44	54	63	48	49	60	56	50	41	42	50	57	58	43	38	45	51	49	60
50	66	47	52	54	40	50	58	64	55	40	40	51	65	61	40	38	46	56	56	54
48,9	60,5	46	54,9	56,3	40,9	47,7	58,1	61,7	52,6	40,2	43,5	52,2	58,7	58,8	38,8	40	46,8	52,7	49,5	57,9

Tablo 5.9. Kemer köprü basınç, ultra ses, yoğunluk porozite testleri

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi (μ s)	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Basınç Mukavemeti (Mpa)	R'den Basınç Mukavemeti (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)	Kırılma şekli
1	P1-1	9,780	2,363	2,522	6,278	68,2	22,55	4.337,029	154,8	67,626	150	3.987	16.709,786	KS
2	P1-2	9,420	2,338	2,525	7,407	58,9	23,15	4.069,114	133,4	58,277	110	3.209	14.709,100	KS
3	P1-3	8,230	2,385	2,520	5,348	58,5	18,85	4.366,048	118,7	51,855	99	3.980	16.934,143	KS
4	P1-4	8,145	2,376	2,511	5,376	48,1	18,50	4.402,703	106,7	46,613	80	3.780	17.219,677	KS
5	P1-5	9,800	2,375	2,509	5,357	48,2	22,55	4.345,898	95,1	41,545	79	3.618	16.778,199	KS
6	P1-6	6,680	2,371	2,521	5,960	49,8	15,55	4.295,820	110,2	48,142	79	3.520	16.393,754	KS
8	P2-1	8,445	2,497	2,550	2,073	53,5	17,20	4.909,884	136,3	59,544	84	2.435	21.415,523	KS
9	P2-2	5,900	2,481	2,538	2,222	54	11,90	4.957,983	145,2	63,432	85	2.485	21.837,171	KS
10	P2-3	5,640	2,488	2,548	2,326	53,6	11,45	4.925,764	145,1	63,388	85	2.505	21.554,279	KS

Tablo 5.9. Kemer köprü basınç, ultra ses, yoğunluk porozite testleri (devam)

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi (μ s)	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Basınç Mukavemeti (Mpa)	R'den Basınç Mukavemeti (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)	Kırılma şekli
11	P2-4	6,215	2,497	2,532	1,399	61	12	5.179,167	168,1	73,436	125	2.381	23.829,013	KS
12	P2-5	10,050	2,507	2,551	1,747	53	19,93	5.043,915	127,7	55,787	84	4.404	22.600,692	KS
13	G3-2	7,090	2,556	2,604	1,852	54	14,40	4.923,611	254,5	111,181	85	2.931	21.535,440	KS
14	G4-2	6,460	2,397	2,472	3,030	56	12,85	5.027,237	127,1	55,525	85	2.781	22.451,484	KS
15	G4-3	6,130	2,411	2,464	2,128	53	12,05	5.087,137	104,5	45,652	85	2.370	22.989,691	KS
16	P5-1	10,150	2,536	2,570	1,288	62	18,75	5.413,333	192,2	83,965	130	4.740	26.032,496	KS
17	P5-2	11,170	2,535	2,575	1,563	61	21,10	5.293,839	190,9	83,397	125	7.212	24.895,893	KS
18	P5-3	16,430	2,545	2,579	1,323	58	30,80	5.334,416	135,1	59,020	110	6.875	25.279,004	KS
19	P5-4	18,490	2,540	2,576	1,408	61	34,30	5.390,671	189,2	82,654	125	7.606	25.814,984	KS
20	P5-4-1	7,990	2,540	2,576	1,408	58	15	5.326,667	84,7	37,002	110	8.521	25.205,616	KS

Tablo 5.9. Kemer köprü basınç, ultra ses, yoğunluk porozite testleri (devam)

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi (µs)	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Basınç Mukavemeti (Mpa)	R'den Basınç Mukavemeti (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)	Kırılma şekli
21	P5-4-2	10,220	2,540	2,576	1,408	58,5	17	6.011,765	159,8	69,810	112	7.125	32.106,297	KS
22	P5-5	15,800	2,552	2,588	1,381	58,6	30,30	5.214,521	147,9	64,612	112	6.813	24.155,453	KS
23	G6-1	16,880	2,566	2,579	0,517	51	31,30	5.392,971	185,2	80,907	85	7.256	25.837,024	KS
24	G6-1-1	9,350	2,566	2,579	0,517	60,8	17,50	5.342,857	172,8	75,490	120	8.250	25.359,074	KS
25	G6-2	17,490	2,554	2,574	0,743	65	32,85	5.324,201	185,3	80,950	145	6.320	25.182,286	KS
26	G6-2-1	7,780	2,554	2,574	0,743	62	14,50	5.365,517	186,4	81,431	130	8.720	25.574,636	KS
27	G6-2-2	9,400	2,554	2,574	0,743	55	17,50	5.371,429	145,5	63,563	98	7.890	25.631,020	KS
28	G6-3	20,100	2,568	2,580	0,434	62	37,45	5.367,156	192,3	84,008	130	6.520	25.590,263	KS
29	G6-4	12,600	2,562	2,580	0,725	62	22,45	5.612,472	180,1	78,679	130	5.230	27.983,026	KS
30	G6-5	12,330	2,560	2,583	0,891	61	22,80	5.407,895	205,7	89,862	125	7.561	25.980,214	KS

Tablo 5.10. Kemer köprü çekme, ultra ses, yoğunluk porozite testleri

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Çap	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi μ s	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Çekme mukavemeti (MPa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)
1	P1-6-1	3,31	5,42	2,371	2,521	5,960	58,2	7,8	4.243,590	16,08	5,709	40.331.812,268
2	P1-6-2	2,85	5,42	2,371	2,521	5,960	58	6,7	4.253,731	16,9	6,969	40.524.817,663
3	P2-2	5,90	5,42	2,481	2,538	2,222	54,5	11,9	4.957,983	22,4	4,462	55.420.092,832
4	P2-3	5,64	5,42	2,488	2,548	2,326	55	11,45	4.925,764	26	5,417	54.912.092,637
5	P2-6	4,99	5,42	2,513	2,536	0,885	53	9,6	5.197,917	36,1	8,502	60.861.859,219
6	G3-1	4,61	5,42	2,548	2,598	1,923	54	9,75	4.728,205	20,1	5,124	51.597.016,981
7	G3-3	2,83	5,42	2,547	2,587	1,563	53	5,95	4.747,899	22,6	9,401	51.812.709,078
8	G4-1	4,23	5,42	2,385	2,462	3,125	54	8,5	4.970,588	23,6	6,564	54.044.858,177
9	P5-7	3,21	5,42	2,534	2,569	1,370	52,8	5,9	5.440,678	25,4	9,299	67.566.519,196

Tablo 5.10. Kemer köprü çekme, ultra ses, yoğunluk porozite testleri (devam)

No	Numune ismi	Boy L (cm)	Çap	Hacimsel kütle (dh)	Özgül ağırlık (do)	Porozite (P %)	Yüzey sertliği R	Ultra ses süresi μ s	Ultra ses hızı V (m/s)	Kırılma yükü (kN)	Çekme mukavemeti (MPa)	V'den Elastisite Modülü (Mpa)
10	G6-1-2	3,58	5,42	2,566	2,579	0,517	61	6,7	5.343,284	21,48	7,051	65.417.092,758
11	G6-1-3	3,25	5,42	2,566	2,579	0,517	62	6,1	5.327,869	10,40	3,759	65.040.196,325
12	G6-3-1	4,19	5,42	2,568	2,580	0,434	62	7,8	5.371,795	33,8	9,480	66.124.763,230
13	G6-3-2	2,89	5,42	2,568	2,580	0,434	62	5,4	5.351,852	24	9,759	65.634.692,561
14	G6-6	3,10	5,42	2,557	2,594	1,429	61	5,8	5.344,828	26,9	10,197	65.835.117,252
15	G6-7	3,38	5,42	2,532	2,600	2,597	61	6,1	5.540,984	29,3	10,187	70.914.223,385
16	G6-8	4,14	5,42	2,581	2,609	1,075	62	7,65	5.411,765	23,5	6,671	67.871.508,037
17	G6-9	2,97	5,42	2,529	2,567	1,471	61	5,65	5.256,637	16,8	6,647	63.016.738,174
18	G6-10	2,69	5,42	2,550	2,593	1,667	61	5,1	5.274,510	21,34	9,323	64.089.945,101

Tablo 5.11. Kemer köprü harç numunler nokta yükü testi

No	Numune ismi	Genişlik (mm)	Çap (mm)	Eşgeç çap De2 (mm2)	P (N)	Is (Mpa)	F	Is(50) (Mpa)	Basınç Mukavemeti (Mpa)
1	h1-1	45	22,4	1.284,076	1500	1,168	0,861	1,006	13,180
2	h1-2	47	30	1.796,178	1400	0,779	0,928	0,724	10,177
3	h1-3	52	47	3.113,376	1100	0,353	1,051	0,371	6,426
4	h1-4	53	28	1.890,446	900	0,476	0,939	0,447	7,234
5	h1-5	37	44,4	2.092,739	850	0,406	0,961	0,390	6,628
6	h2-1	43	48,5	2.656,688	900	0,339	1,014	0,343	6,130
7	h2-2	53	50	3.375,796	700	0,207	1,070	0,222	4,836
8	h2-3	27	53	1.822,930	1100	0,603	0,931	0,562	8,458
9	h2-4	33	37	1.555,414	1110	0,714	0,899	0,641	9,302
10	h2-5	27	43	1.478,981	850	0,575	0,889	0,511	7,911
11	h2-6	44	45	2.522,293	800	0,317	1,002	0,318	5,857
12	h2-7	41	27	1.410,191	1200	0,851	0,879	0,748	10,439
13	h2-8	30	35	1.337,580	600	0,449	0,869	0,390	6,623
14	h2-9	50	27	1.719,745	800	0,465	0,919	0,428	7,027
15	h2-10	25	44	1.401,274	900	0,642	0,878	0,564	8,477
16	h3-1	30	40	1.528,662	1400	0,916	0,895	0,820	11,203
17	h3-2	36	30	1.375,796	1000	0,727	0,874	0,635	9,239
18	h3-3	41	25	1.305,732	800	0,613	0,864	0,529	8,110
19	h3-4	35	35	1.560,510	1400	0,897	0,899	0,807	11,065
20	h3-5	30	30	1.146,497	1200	1,047	0,839	0,878	11,825

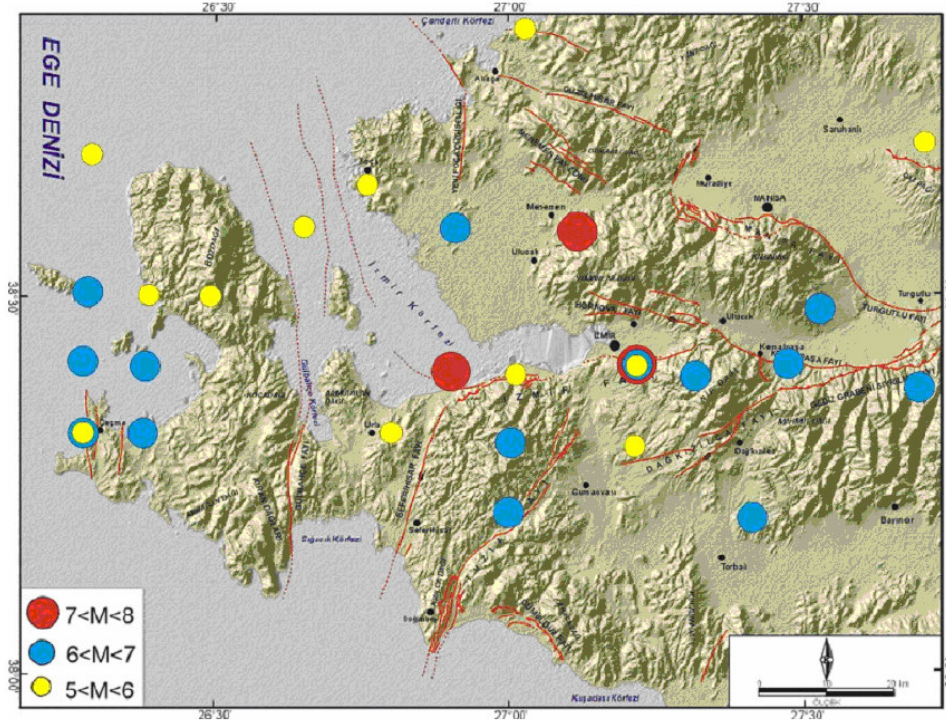
5.5. Bölgesel Zemin Araştırmaları ve Sismik Risk Belirleme

Yapıların oturduğu zemin türünün ve sismik riskin belirlenmesi yapıların olası depremlerden nasıl etkileneceği hakkında önemli bilgiler verir. İzmir şehri yüksek deprem riski olan ve kötü zemin koşullarına yerleşmiş bir şehirdir. İzmir, tarihinde birçok güçlü depreme maruz kalmıştır ve şehir birçok kere tamamen yıkılmıştır. Bu amaçla tez konusu olan Vezir Su Kemerî'nin ve Zeytinler'deki kemer köprünün bulunduğu yerin zemin parametreleri ve yapıların bulunduğu bölgenin depremselliği incelenmiştir. Ayrıca, yapıların bulunduğu bölgelerin zemin hakim periyotları mikrotremor ölçümlerle elde edilmiştir.

5.5.1. Yapıların bulunduğu bölgelerin sismik risk durumu

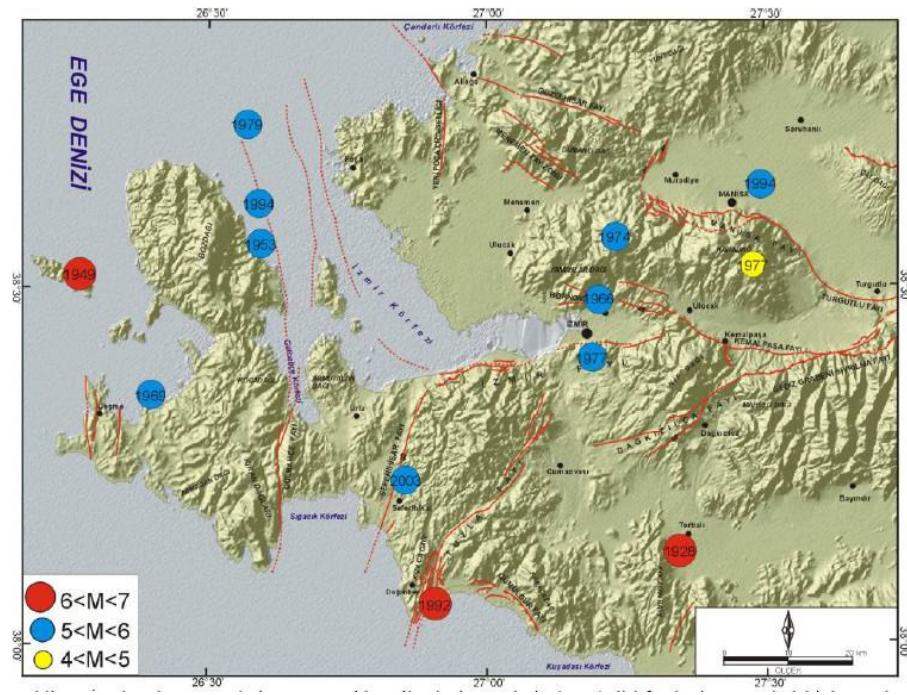
İzmir ve çevresi, neotektonik dönemde açılmalı tektonik rejimin egemen olduğu Batı Anadolu'da yer alır. İzmir kent yerleşimi, bu açılmalı tektonik rejimin ürünü olan Gediz grabeninin batı ucunda, Doğu-Batı uzanımlı tektonik bir oluğa yerleşmiştir ve İzmir körfezini çevreler.

İzmir ve yakın çevresi, Doğu Akdeniz'de tarihsel çağlarda pek çok uygarlığın hüküm sürdüğü bir bölge olması nedeniyle tarihsel dönem deprem kayıtlarının en fazla olduğu bölgelerimizden biridir. Kayıtlar, İzmir ve yakın çevresindeki çoğu yerleşmenin tarihsel dönemde çok sayıda depremden etkilendiğini ortaya koymaktadır (Şekil 5.49). Son 2000 yılda İzmir ve çevresinde yıkıcı hasar yapan büyük depremler Tablo 5.12'de sunulmuştur.

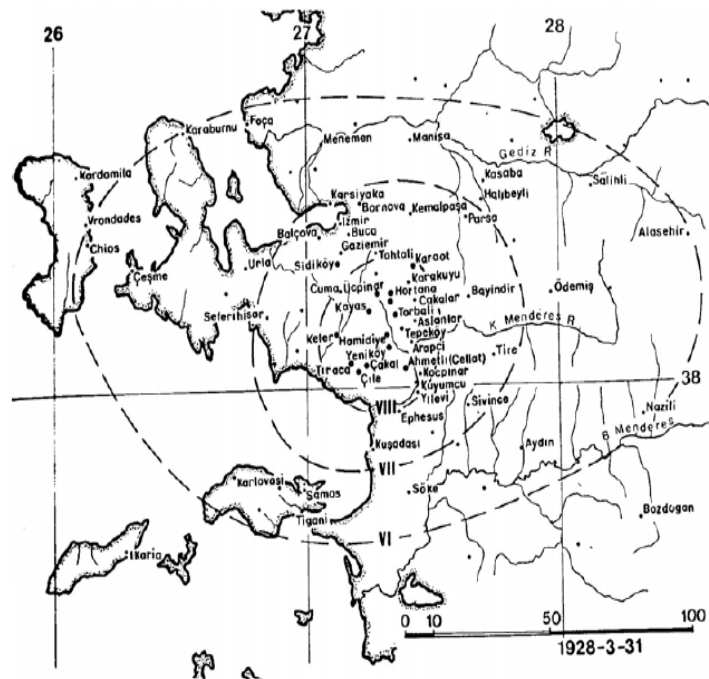


Şekil 5.49. İzmir ve yakın çevresindeki tarihsel dönem depremlerinin diri fay haritası üzerindeki dağılımı (Emre vd., 2005).

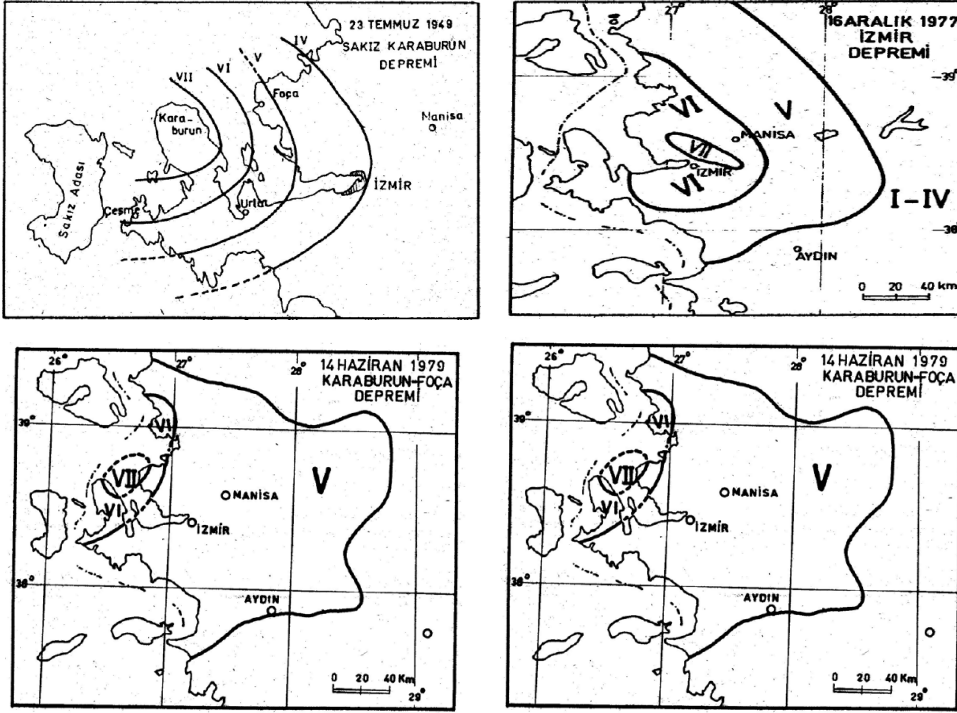
Depremler 1900’lü yılların başından itibaren, sismograflar tarafından kayıtlanmaya başlamıştır. İzmir kenti merkez olmak üzere yaklaşık 50 km yarıçaplı bir daire içerisinde kalan alanda son yüzyılda meydana gelen 14 depremin magnitüdü 4’ten büyüktür. (Şekil 5.50, Tablo 5.12 ve Tablo 5.13). Bu depremler bölgede can kaybı ve maddi hasarlara neden olmuştur. Son yüzyılda meydana gelen depremler içerisinde en büyük deprem 31 Mart 1928 tarihli Torbalı depremidir (M: 6.5). Bu deprem çok geniş bir alanda etki yapmıştır (Şekil 5.52), 2000’den fazla evin yıkılmasına ya da hasar görmesine sebep olmuştur. İzmir güneyinde meydana gelmiş 6 Kasım 1992 depreminin büyüklüğü ise M: 6.0’dır. 2003 yılında meydana gelmiş Urla depremi (M:5.7) ise Seferihisar’da kısmen hasara yol açmıştır. Bölgede meydana gelmiş diğer bazı depremlere ilişkin makrosismik haritalar Şekil 5.52’de sunulmuştur.



Şekil 5.50. İzmir ve çevresinde son yüzyılda meydana gelmiş kuvvetli depremler (Emre vd., 2005)

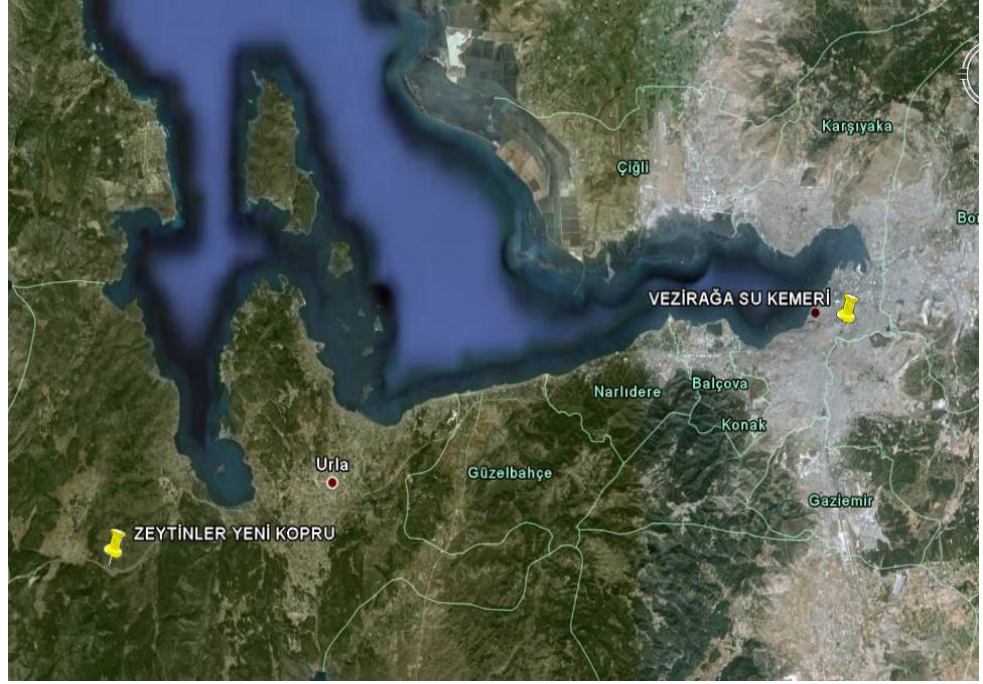


Şekil 5.51. Torbalı depreminin etki alanı (Ambresys and Jackson, 1988).

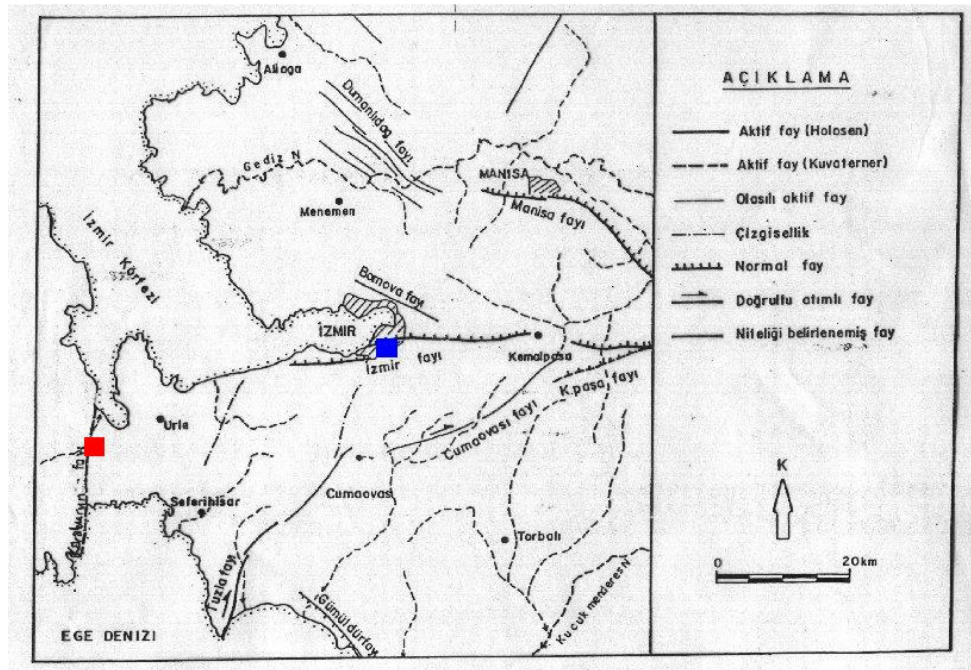


Şekil 5.52. İzmir ve çevresinde meydana gelmiş diğer bazı depremlere ilişkin makrosismik haritalar (Emre vd. 2005)

İnceleme konusu olan Vezir Su Kemerı ve Zeytinler Köprüsü yapılarının bulunduğu alanlar sismik açıdan aktif bölgelerdir. Su kemerı İzmir fayına, kemer köprü ise Gülbahçe fayına çok yakın mesafededir (Şekil 5.53 ve Şekil 5.54).



Şekil 5.53. Vezir Su Kemerı'nın ve Zeytinler Köprüsü'nün yerlerinin uydudan görünümü (Google Earth)



Şekil 5.54. Vezir Su Kemerı'nın, ve Zeytinler Köprüsü'nün yakınında bulunan İzmir fayı ve Güzelbahçe (Karaburun) fayı (Şaroğlu vd. 1992).

İzmir fayı, İzmir körfezinin doğusunda, bu körfezi güneyden morfolojik olarak sınırlandıran Doğu-Batı uzanımlı bir faydır. İzmir körfezinin doğu yarısı bu

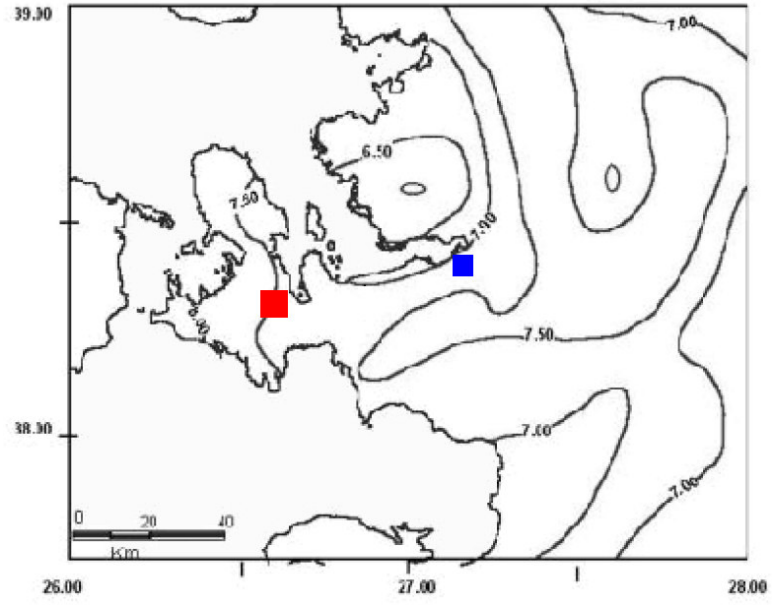
fayın kuzey bloğunda gelişmiş bir tektonik çukurluk veya oluk niteliğindedir. Bu tektonik oluk Batı Anadolu açılmalı tektonik rejimi içerisinde şekillenmiş en büyük çöküntü havzalarından birini oluşturan Gediz graben sisteminin batıya doğru devamında yer alır. Fayın kuzey bloğunda şekillenmiş İzmir çöküntü havzasının tabanı Karaburun yarımadası ile Bayraklı arasında Ege Denizi suları altındadır ve körfezi oluşturur. Körfezin kuzeyi Gediz nehri deltası tarafından doldurularak düzlenmiştir.

İzmir fayı Güzelbahçe ile Pınarbaşı arasında toplam 35 km uzunluğunda eğim atımlı normal bir faydır. Batı ucunda fay ikiye çatallanır. Güney kolu Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultulu ve sağ yönlü doğrultu atımlı Seferihisar fayının doğrultusunda sonlanır. Kuzeybatı'ya yönelen kuzey kol ise olasılıkla İzmir körfezi tabanında Çiçekadaları ile Uzunada doğusunda yer alan Kuzey Kuzeybatı-Güney Güneydoğu doğrultulu fay zonuyla bağlantılıdır (Aksu vd., 1987; Ocakoğlu vd., 2005). Fay İzmir kent yerleşmesini Doğu-Batı yönünde boydan boya kateder. Vezir Su Kemeru bu fayın güneyinde horsta bulunur ve kemerin tam altından sol yanal doğrultu atımlı bir fay bulunmaktadır (Şaroğlu vd. 1992).

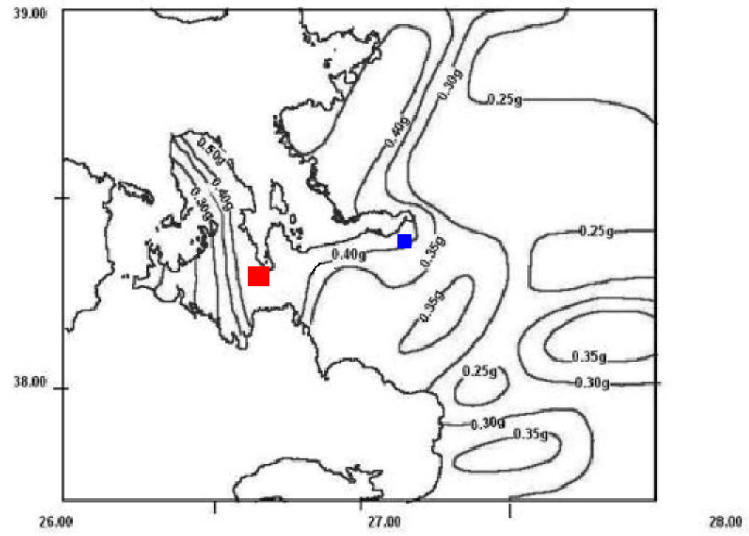
Gülbahçe fayı, İzmir körfezi ile Karaburun yarımadasını yapısal ve morfolojik olarak ayıran önemli bir hattır. Bu fay Karaburun fayı olarak da adlandırılmıştır. Gülbahçe fayının da doğrultu atımlı bir fay olduğu tahmin edilmektedir. Gülbahçe fayının karadaki bölümü Gülbahçe körfezi ile güneydeki Sığacık körfezi arasında 15 km uzunluğundadır. Kuzey-Güney doğrultulu olan fayın her iki ucu da su altındadır. Sualtı bölümleriyle birlikte değerlendirildiğinde fayın toplam uzunluğu 70 km'yi bulmaktadır. Fayın karadaki bölümü güneyde Karaburun bloğuna ait Triyas-Jura-Kretase yaşlı ayrılmamış kireçtaşlarında izlenir. Zeytinler Köprüsü bu fayın 3 km batısında yer almaktadır (Emre vd., 2005).

İzmir Körfezi çıkışında elde edilen sismik kayıtlara göre Gülbahçe fayı, İzmir yöresinin önemli deprem kaynaklarının biri olarak değerlendirilir (Emre vd., 2005).

Sonuç olarak Vezir Su kemeri 7 şiddetinde ve etkin yer ivmesi 0,4 g olan bir depreme maruz kalabilir. Zeytinler'de bulunan kemer köprü ise 7,5 şiddetinde ve etkin yer ivmesi 0,4 g olan bir depreme maruz kalabilir (Şekil 5.55 ve Şekil 5.56).



Şekil 5.55. İzmir için beklenen depremlerin MSK şiddet haritası (Koeri, İzmir Deprem Raporu)



Şekil 5.56. İzmir için beklenen depremlerin etkin yer ivme haritası (Koeri, İzmir Deprem Raporu)

Tablo 5.12. İzmir ve yakın çevresinde tarihsel dönemde hasara yol açmış büyük depremler (Koeri)

Tarih	Saat (UT)	Enlem (K)	Boylam (D)	Şiddet (Io)	Büyüklik (M)	Açıklama
17	Gece	38.40	27.50	X	7.0	Batı Anadolu'da Efes'le birlikte 13 önemli İyon şehri tamamen yıkılmıştır.
105		38.90	27.00	VIII	6.4	Eusebios'a göre, Aliağa, Çandarlı ve Nemrut Limanı harap olmuştur.
176 ve 177		38.60	26.65	VII	5.8	Milet, Sakız Adası ve Sisam adalarında deprem olmuştur.
178		38.30	27.10	VIII	6.5	İzmir şehri harap olmuştur
688		38.41	27.20	IX	6.5	İzmir'de şiddetli bir deprem, 20.000 ölüden bahsedilmektedir.
1039		38.40	27.30	VIII	6.8	Cedrenos depremin birçok bölge ve şehir hasar görmüştür.
20 Mart 1389		38.40	26.30	VIII	6.7	İzmir, Foça kalesi ve Ikaria Adası da harap olmuştur.
20 Mayıs 1654		38.50	27.10	VIII	6.4	Deprem İzmir'de, birçok can kaybına neden olmuştur.
2 Haziran 1664		38.41	27.20	VII	5.8	Genel panik yaratan ve birkaç evi yıkan bir deprem.
1668		38.41	27.20	IX		İzmir'de tahribat yapmış, 2000 kişinin öldüğünden bahsedilir.
14 Şubat 1680		38.40	27.20	VII	6.2	İzmir'e 25 km uzaklıktaki 3 kasaba yerle bir olmuştur
10 Temmuz 1688		38.40	26.90	X	6.8	İzmir'de büyük tahribat, kıyıda kaymalar olmuştur 20.000 kişinin öldüğünden bahsedilir.
13 Ocak 1690		38.60	27.40	VII	6.4	Bu deprem İzmir ve ona yakın alanlarda hasara yol açmıştır.
Eylül(Ekim) 1723		38.40	27.00	VIII	6.4	
4 Nisan 1739	04:30	38.50	26.90	IX	6.8	Eski ve Yeni Foça'da da etkilenmiştir.
24 Kasım 1772		38.80	26.70	VIII	6.4	Deprem ve deprem etkisiyle oluşan dalgalar Foça kalesinin 5 kapısını ve camisini tamamen yıkmıştır
3-5 Temmuz 1778	02:30	38.40	26.80	IX	6.4	15 saniye sürmüş ve hemen hemen İzmir'i tamamıyla harap etmiştir.
13 Ekim 1850	09:23	38.40	27.20	VIII		Batı Anadolu, İzmir, Manisa'da hissedilmiştir.
3 Kasım 1862	03:00	38.50	27.90	X	6.9	
1 Şubat 1873	01:00	37.75	27.00	IX		Sisam adası, İzmir, Aydın.
29 Temmuz 1880	04:40	38.60	27.10	IX	6.7	Depremin merkezi Menemen civarındadır.
15 Ekim 1883	15:30	38.30	26.20	IX	6.8	Çeşme yarımadasının batı kısmında bulunan bütün köylerde geniş hasarlar olmuştur.
1 Kasım 1883		38.30	26.30	VIII		İzmir Körfezi ve Çeşme Yarımadasında şiddetli bir depremdir.

Tablo 5.13. İzmir ve yakın çevresinde son yüzyılda gelişmiş büyük depremler (Koeri)

Tarih	Saat (UT)	Enlem (K)	Boylam (D)	Derinlik (km)	Büyüklik (M)	Şiddet (Io)	Açıklama
19 Ocak 1909 Foça Depremi	04:57	38.00	26.50	60	6.0	IX	Depremin merkezi Güzelhisar, Menemen ve Foça arasındadır. 700 ev yıkılmıştır.
31 Mart 1928 Torbalı Depremi	00:29	38.18	27.80	10	6.5	VIII	Depremin merkezi Torbalı'da Küçük Menderes ile İzmir K-G çukurluklarının birleştiği yerdedir.
22 Eylül 1939 Dikili Depremi	00:36	39.07	26.94	10	6.6	VIII IX	Depremin merkezi Dikili ile Midilli arasındadır. 1000 ev yıkılmış, 41 kişi ölmüştür
23 Temmuz 1949 Karaburun Depremi	15:03	38.57	26.29	10	6.6	VIII VI X	Depremin merkezi Karaburun-Çeşme yarımadasın
2 Mayıs 1953 Karaburun Depremi	05:41	38.48	26.57	40	5.0	VII VIII	Depremin merkezi Karaburun yarımadasının kuzeyidir
16 Temmuz 1955 Söke-Balat Depremi	07:07	37.65	27.26	40	6.8	VIII	Depremin merkezi Ege denizindedir.
19 Haziran 1966 Menemen Depremi	17:55	38.55	27.35	9	4.8	VI	
6 Nisan 1969 Karaburun Depremi	03:49	38.47	26.41	16	5.9	VIII VII	Merkezi Karaburun açıkları olan bu depremdir.
1 Şubat 1974 İzmir Depremi	00:01	38.55	27.22	24	5.3	VII	
16 Aralık 1977 İzmir Depremi	07:37	38.41	27.19	24	5.5	VIII	
14 Haziran 1979 Karaburun Depremi	11:44	38.79	26.57	15	5.7	VII	Depremin merkezi Ege denizindedir. İzmir ve çevresinde kuvvetlice hissedilmiştir..
6 Kasım 1992 Doğanbey Depremi	22:08	38.16	26.99	17	5.7	VII	Depremin merkezi Doğanbey civarındadır olarak hissedilmiştir.
28 Ocak 1994 Manisa Depremi	18:45	38.69	27.49	5	5.2	VII	
24 Mayıs 1994 Karaburun Depremi	05:05	38.66	26.54	17	5.0	VII	
10 Nisan 2003 Urla Depremi	03:40	38.26	26.83	16	5.6	VII	Depremin merkezi Urla ile Seferihisar arasına düşmektedir.

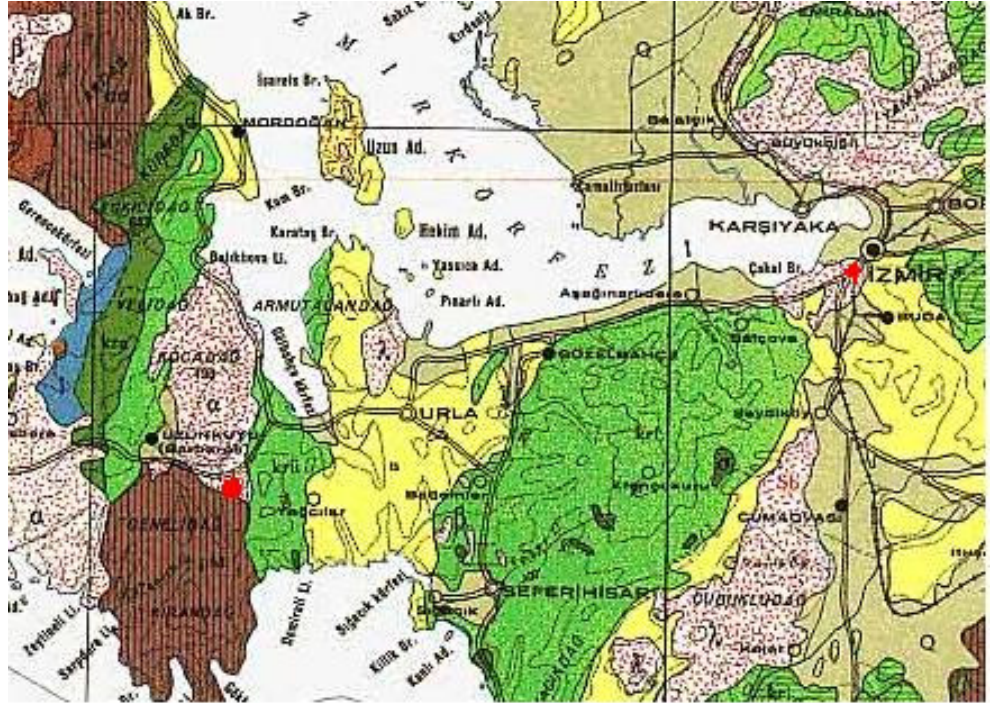
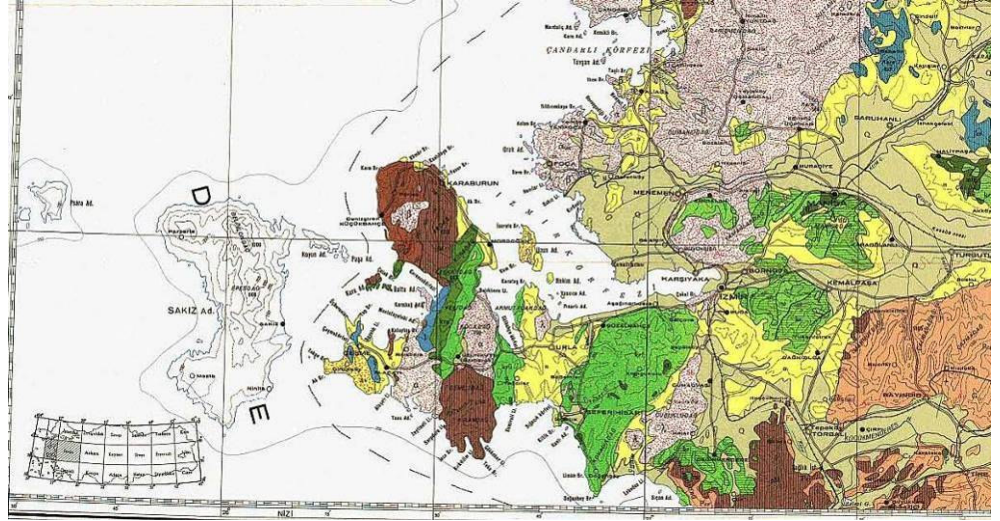
5.5.2. Yapıların bulunduğu zeminlerin incelenmesi

Zemin koşullarını belirlemek için su kemeri ve köprü civarında daha önceden yapılmış zemin etüdü raporları incelenmiştir.

Kadifekale İzmir'in tarihi kalesinin bulunduğu bir tepede bulunan bir gecekondulu mahallesidir. Bu bölgede alt yapı olmaması yüzünden yaklaşık 50 yıldır bu bölgedeki gecekondulardan gelen atık sular bölgede ana kaya olan andeziti bozmuş zemini gevşetmiştir. 1990'lı yılların sonunda bölgede ciddi heyelanlar meydana gelmiş su kemerinin altından geçen Yeşildere yolunun bir şeridi trafiğe dahi kapatılmıştır. Su kemerinin bulunduğu Kadifekale'nin yamaçlarında heyelan tehlikesi sebebiyle 2001 yılında heyelan önleme çalışmaları yapılmıştır (Yeşildere Heyelan Önleme ve İyileştirme Projesi, 2001). Bu proje kapsamında bölgede yapılan sondaj ve zemin etüdü çalışmaları sonucunda su kemerinin bulunduğu alan Z3 sınıfı ve zemin emniyet gerilmesi 15 N/cm^2 'dir (Yeşildere Sahası Heyelan Önleme ve İyileştirme Projesi, 2001).

Zeytinler Köprüsü'nün bulunduğu bölge civarında bina yapmak için yapılan zemin etüt raporlarında yararlanarak köprünün bulunduğu alanın, Z2 sınıfı C grubu olduğu ve zemin emniyet gerilmesi'nin 14 N/cm^2 ve yatak katsayısının 300 kN/m^3 olduğu görülmüştür (İlerler, 2009).

İzmir ili ve çevresinin jeoloji haritasından yararlanılarak her iki yapının da andezit ana kayanın olduğu bir zemine oturduğu belirlenmiştir (Şekil 5.57) (Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, 2010). Kırmızı noktalarla gösterilen haritanın sağ tarafındaki nokta Zeytinler Köprüsü'nün ve sol tarafındaki nokta ise Vezir Su Kemeri'nin bulunduğu yeri gösterir ve bu yerler pembe üzerine siyah noktalı renk olarak haritada boyanmıştır. Bu renk ile boyanan bölgelerde ana kayanın andezit kaya olduğunu belirtilmiştir. Yapılarda kullanılan ana malzemenin andezit taşı olması da bu bilgiyi destekler niteliktedir. Geçmişte ağır kaya kütlelerin nakliyesi oldukça zor olduğu için yapılar yerel malzemeler kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.57. İzmir jeoloji haritası (MTA,2010)

5.5.3. Mikrotremor ölçümler

Mikrotremorlar, Bölüm 4.6.1’de de bahsedildiği gibi, düşük enerjili, genlikleri 10^{-4} mm ile 10^{-2} mm aralığında, periyotları 10^{-3} saniyeden bir kaç saniyeye kadar süren sismik dalgalar. Mikrotremorların en önemli özelliği, noktadan noktaya belirgin değişimler göstermesidir. Bu değişimler ölçülen yerin jeolojik özellikleri ile ilişkilidir. Mikrotremor ölçümler yardımıyla zemin hakim periyodu ve zemin büyütme katsayıları elde edilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan yapıların zemin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Vezir Su kemeri çevresindeki 3 noktada ve Zeytinler Köprüsü çevresindeki 5 noktada 20'şer dakikalık mikrotremor ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5.58, Şekil 5.59).



Şekil 5.58. Vezir Su Kemer i mikrotremor ölçümü



Şekil 5.59. Zeytinler Köprüsü mikrotremor ölçümü

Verilerin değerlendirilmesinde Nakamura (1989) yöntemi kullanılmıştır. Nakamura (1989), mikrotremor kayıtlarından kaynak etkisini uzaklaştırmak için bir yaklaşım önermiştir. Nakamura (1989) yöntemi referans noktası gerektirmeyen bir yöntem olarak, sismik yoğunluğun az olduğu veya temel kayanın bulunmadığı alanlarda kolayca uygulanabilen bir yöntemdir. Bu yöntem, ölçüm yapılan yerin transfer fonksiyonunun modifiye edilmesine dayanır. Buna göre birinci varsayım, mikrotremorları oluşturan Rayleigh türü yüzey dalgalarıdır ve bunlar yüzey kaynakları tarafından yaratılır. Bu dalga türü, tabakalı bir ortamda hem yatay hem de düşey hareketlerden eşit şekilde etkilenmektedir.

5.5.3.1. Kullanılan cihaz ve teknik özellikleri

Arazi çalışması için kullanılan ekipman üç eksenli ivmeölçer ve diz üstü bilgisayardan oluşmaktadır. İvmeölçerin görünümü Şekil 5.60'ta gösterilmiştir. GURALP CMG-5 tipi üç bileşenli dijital ivmeölçer cihazı kullanılmıştır. Ölçümler sırasında düz zemin şartlarını sağlamak için zemin kazılmış ve zemine metal bir plaka yerleştirilmiştir. Ölçü aleti kuzeye yönlendirilerek cihaz, plakanın üstüne oturtulmuştur. Kuzey-Güney, Doğu-Batı ve Düşey yönde olmak üzere eş zamanlı üç adet mikrotremor kaydı alınmıştır.

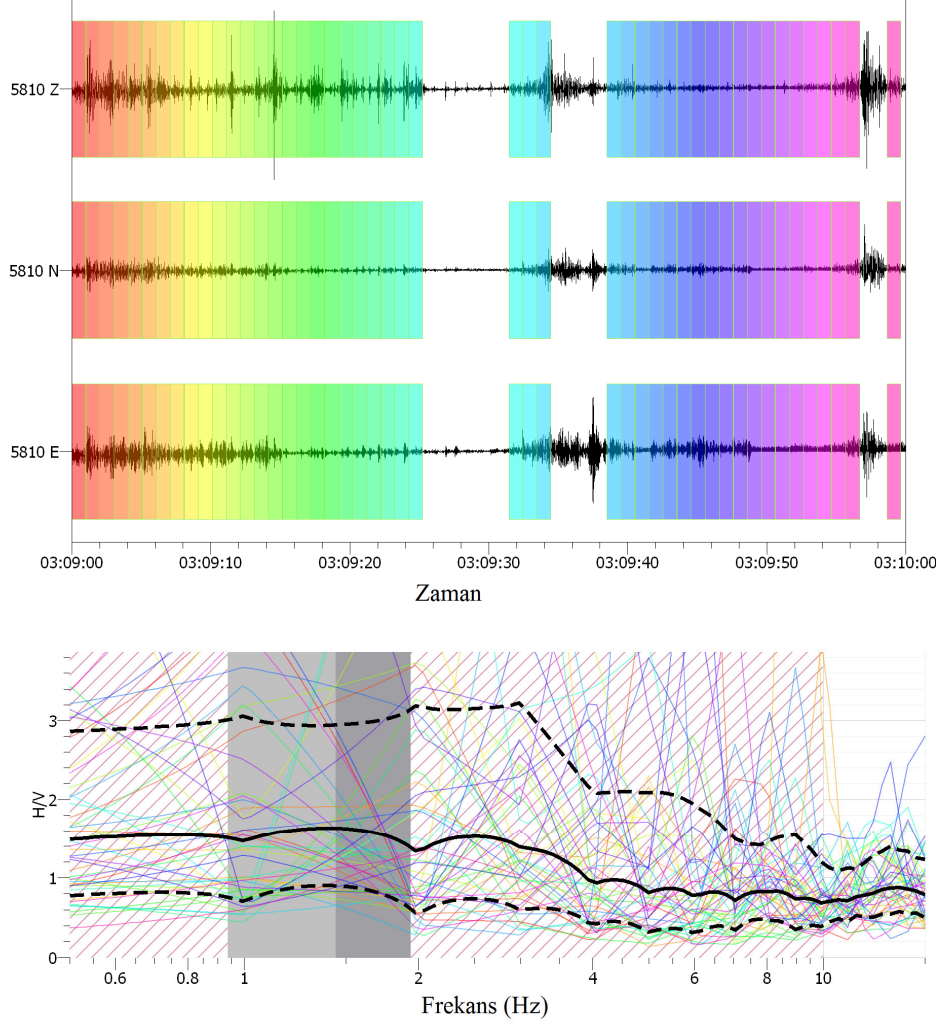


Şekil 5.60. CMG-5 tipi üç bileşenli dijital ivmeölçer cihazı

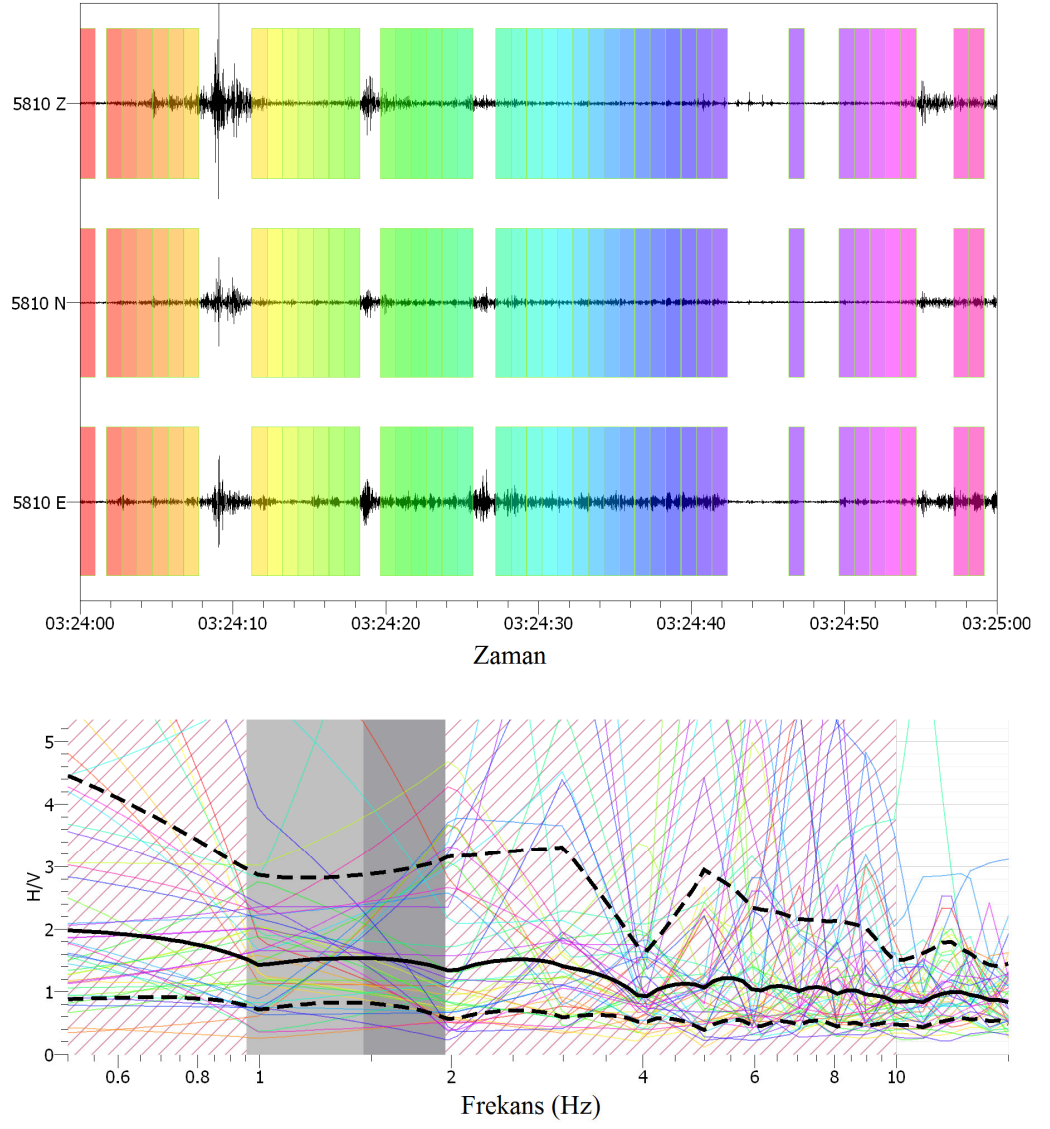
5.5.3.2. Ölçümlerin Değerlendirilmesi

Yapıların bulunduğu zeminlerin, zemin hakim periyotlarını ve zemin büyütmesi değişimlerini incelemek amacı ile çalışma alanları içerisinde $T=1$ saniye periyotlu toplam 8 noktaya (su kemeri civarında 3, köprü civarında 5 nokta) ait mikrotremor ölçümü gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme yöntemi olarak Nakamura (1989) yöntemi kullanılmıştır. Ücretsiz bir yazılım olan Geopsy V.2.6.3 (Sesaray-2.0.5) kullanılarak 20'şer dakikalık ivme kayıtlarının birer

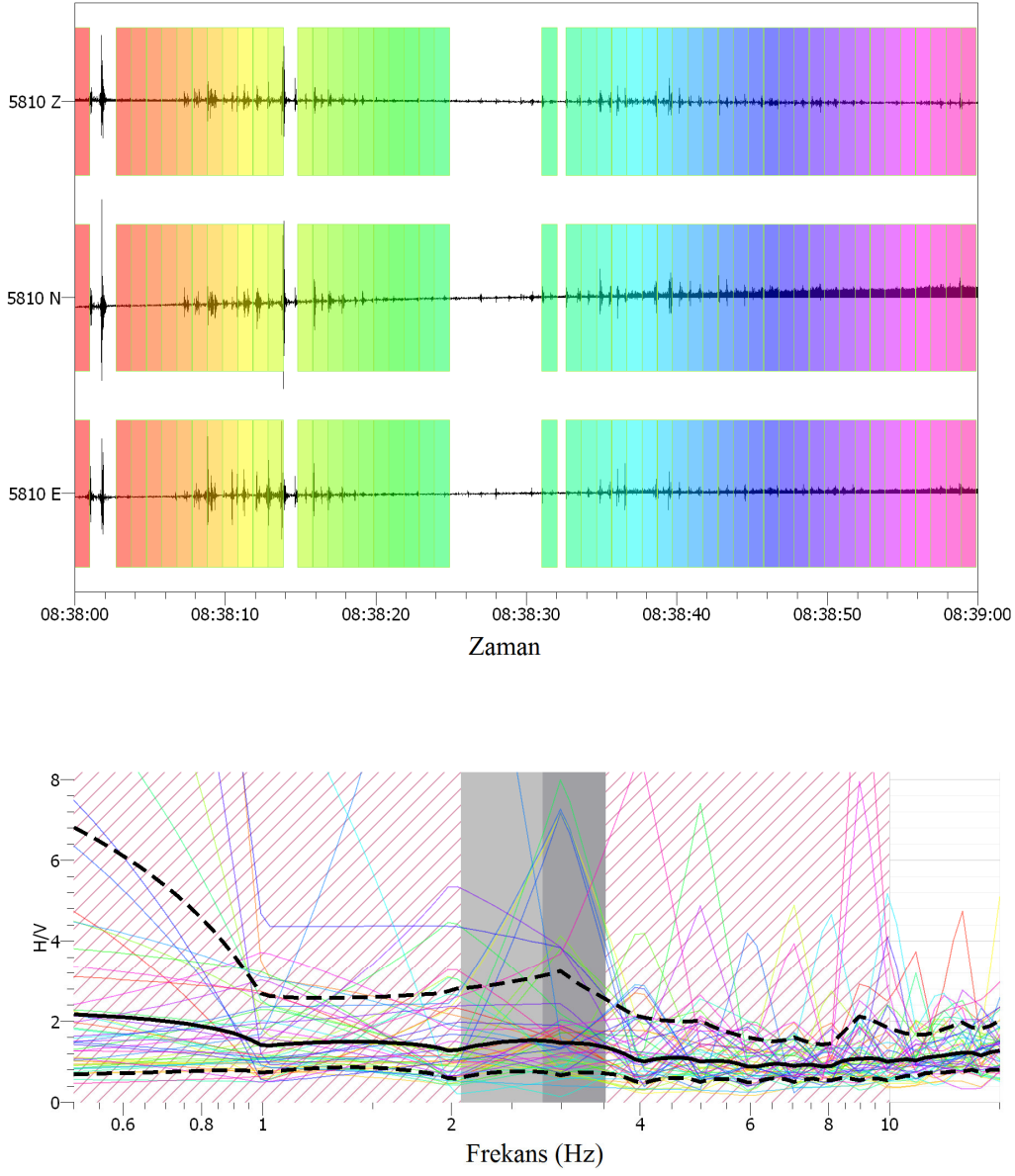
dakikalık kısımları için zemin hakim frekansları elde edilmiştir. Şekil 5.61, Şekil 5.62, Şekil 5.63, Şekil 5.64’de, bulunan hakim frekanslarına çeşitli örnekler verilmiştir.



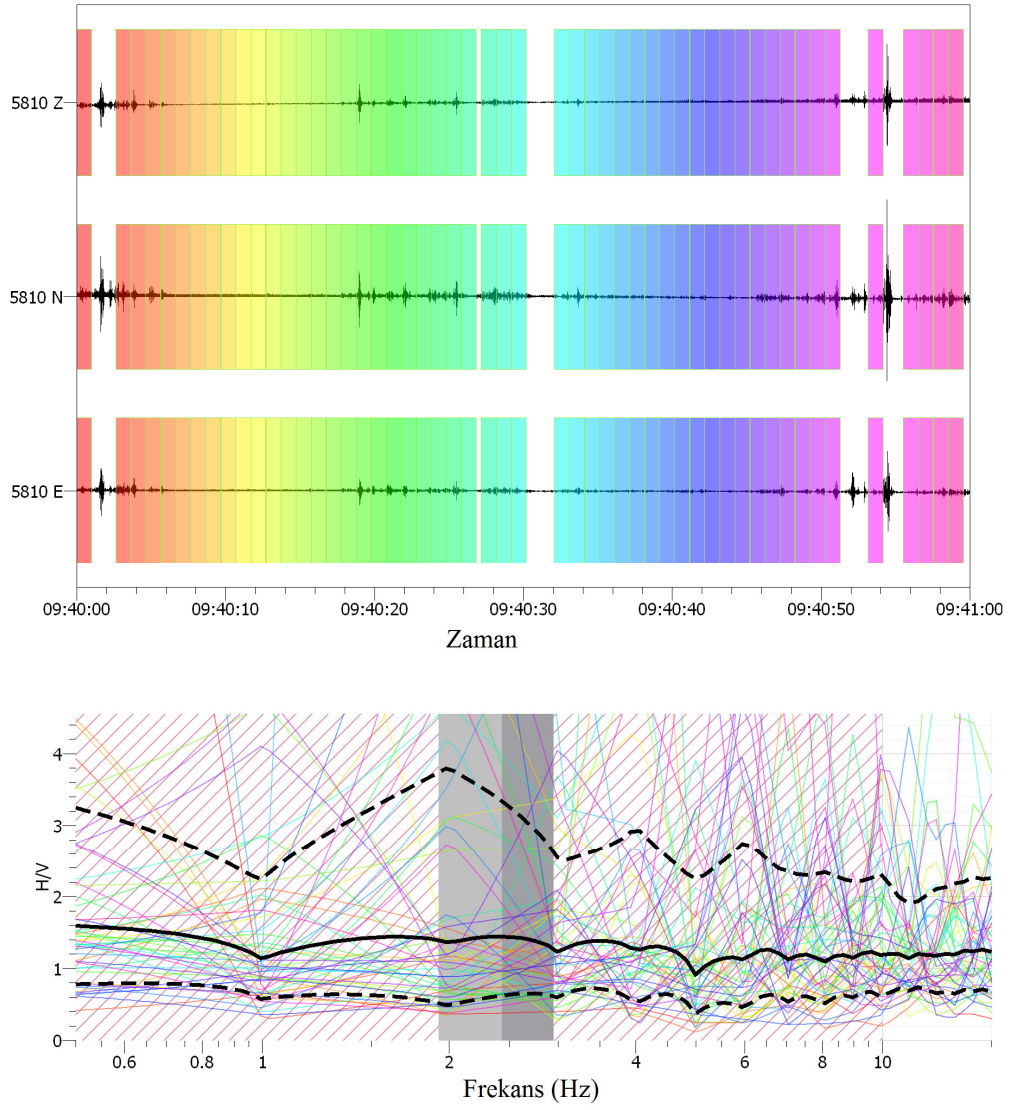
Şekil 5.61. Su kemeri civarı mikrotremor ölçümler ve ölçüm sonucu belirlenen hakim frekans aralığı



Şekil 5.62. Su kemeri civarı mikrotremor ölçümler ve ölçüm sonucu belirlenen hakim frekans aralığı



Şekil 5.63. Köprü civarı mikrotremor ölçümler ve ölçüm sonucu belirlenen hakim frekans aralığı



Şekil 5.64. Köprü civarı mikrotremor ölçümler ve ölçüm sonucu belirlenen hakim frekans aralığı

Yukarıdaki şekillerden de anlaşıldığı gibi Vezir Su Kemerı'nin bulunduğu bölgedeki hakim periyot 0.5 saniye ile 1.2 saniye aralığında Zeytinler bölgesi ise 0.28 ile 0.45 saniye aralığındadır.

5.6.Dinamik İzleme

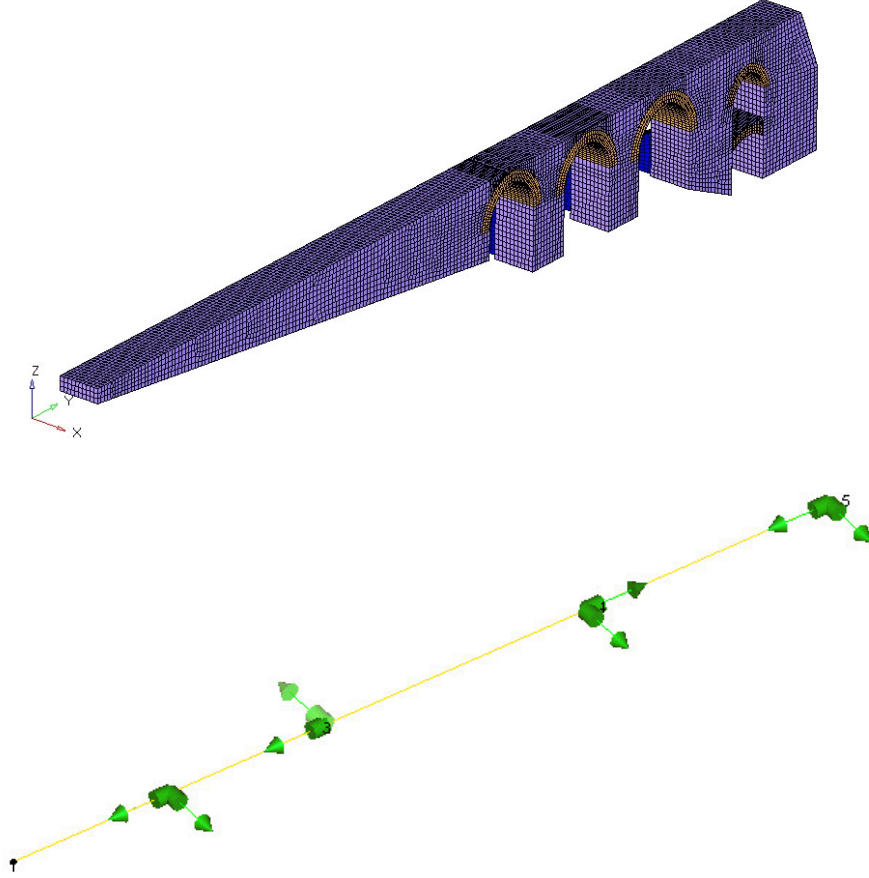
Su kemerinin ve köprünün titreşim testleri yapılmış ve köprünün dinamik karakteristikleri deneysel ölçümlerden elde edilmiştir. Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı gibi dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve deneysel sonuçlara göre sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

5.6.1. Yapıların OMA ile dinamik parametrelerinin belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında incelenen yapıların dinamik parametrelerini belirlemek için Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılmıştır. Yapılara yerleştirilen ivmeölçerler ve bunlardan toplanan veriler yardımı ile yapıların dinamik parametreleri deneysel olarak elde edilmiştir. Bu dinamik parametreler, yapıların sonlu elemanlar modellerinin iyi birer doğrulayıcısı (düzelticisi) olarak kullanılabilir.

5.6.1.1. Vezir Su Kemerinin OMA uygulaması

Vezir Su Kemerinde OMA uygulaması için ilk olarak yapının bilgisayar destekli (CAD) çizimi AutoCAD programında (AutoCAD, 2004) oluşturulmuş daha sonra bu dosya Hypermesh (Hypermesh, 2008) programına aktararak burada model mesh edilmiş ve SAP2000 (SAP 2000 V14, 2009) programına aktarılmıştır (Şekil 5.65). Bölüm 5.4.1’de elde edilen parametreler kullanılarak, Solid elemanların, elastisite modülü ve birim hacim kütlesi programa girilmiştir ve modal analiz yapılmıştır. Elde edilen teorik frekanslar ve mod şekilleri göz önüne alınarak hangi tip ivmeölçerlerin kullanılacağına ve bunların kemerin hangi bölgelerine hangi doğrultularda yerleştirileceğine karar verilmiştir. Köprünün düşey hareketine ait modlar ilk 10 modda oluşmadığı için OMA uygulamasında düşey ivmeyi ölçen ivmeölçerler köprüye yerleştirilmemiştir. İvmeölçerlerin su kemerinin üst kısmına kemer boyunca ve bu doğrultuya dik olarak yerleştirilmesine karar verilmiştir. Operasyonel Modal Analiz için ivmeölçerlerin su kemerinin üst noktasına yerleştirilme şeması, Şekil 5.65’de görülmektedir.



Şekil 5.65. Vezir Su Kemerı, OMA testi için ivmeölçerlerin yerleşim şeması

Vezir Su Kemerı, OMA testi, 8 adet tek eksenli ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.66, Şekil 5.67 ve Şekil 5.68). Kullanılan ivmeölçerler 0-50 Hz aralığındaki sinyallere duyarlı ve 10 Volt/g hassasiyetindedir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 veri toplama ünitesinde birleştirilip PULSE yazılımına aktarılmıştır. Burada sinyaller işlendikten sonra OMA yazılımı (OMA, 2006) kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.



Şekil 5.66. 0-50 Hz aralığındaki titreşimlere duyarlı, 10 V/g hassasiyetinde ivmeölçer



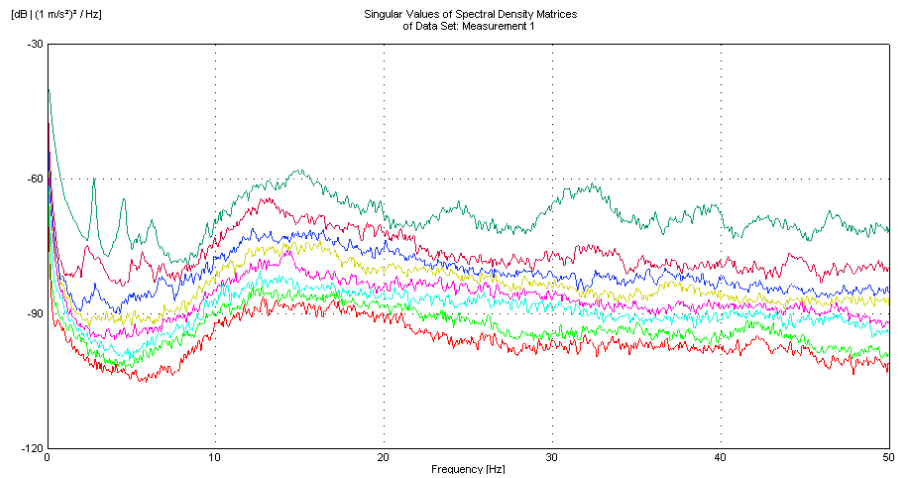
Şekil 5.67. İvmeölçerler ve veri toplama cihazı arasında iletimi sağlayan kablolar



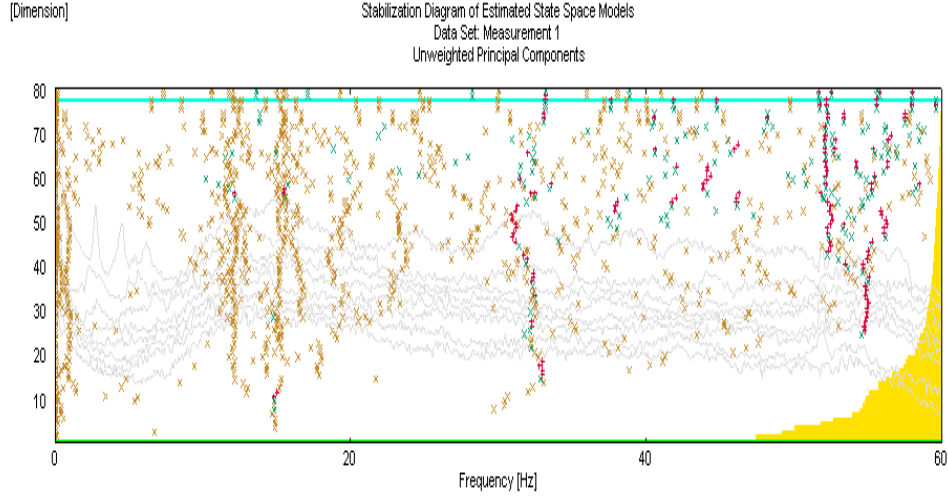
Şekil 5.68. Su kemerine ivmeölçerlerin yerleştirilmesi

Vezir Su Kemer için her biri yaklaşık 30-40 dakika süren 2 adet OMA testi yapılmıştır. Test sonucunda su kemerinin deneysel mod şekil ve frekans değerleri PP ve SSI yöntemlerine göre elde edilmiştir (Şekil 5.69, Şekil 5.70, Şekil 5.71). Sonuçların ilk 5 mod için oldukça tutarlı olduğu görülmüştür (Tablo 5.14, Tablo 5.15 ve Tablo 5.16).

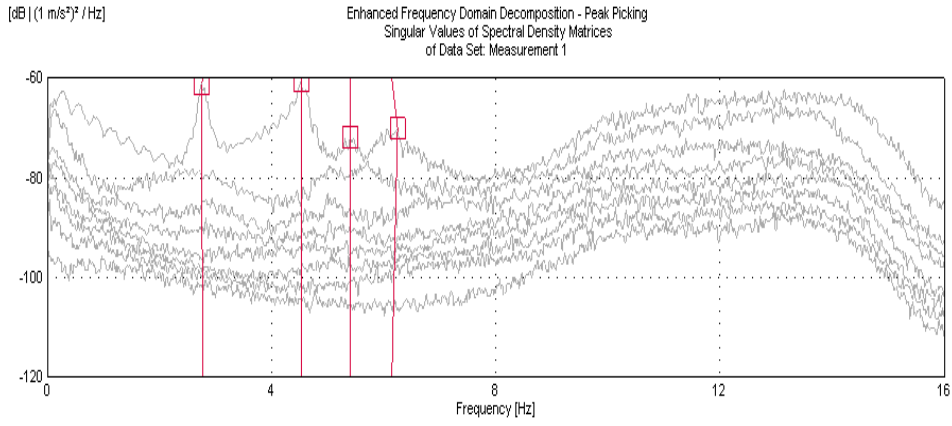
Deneysel Modal analiz yöntemine göre su kemerinin ilk dört mod şekli ve PP yöntemine göre frekans değerleri Şekil 5.72’de verilmiştir.



Şekil 5.69. Vezir Su Kemer için, ivmeölçerlerden alınan veri



Şekil 5.70. Vezir Su Kemerı için, SSI yöntemiyle elde edilen stabilizasyon diyagramı



Şekil 5.71. Vezir Su Kemerı için, Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler

Tablo 5.14. Su kemerı 1. ölçüm için deneysel ve teorik frekans değerleri

Frekans No	Teorik Frekanslar	Deneysel Frekanslar (PP)	Sönüm Oranı (PP) (%)	Deneysel Frekanslar (SSI)	Sönüm Oranı (SSI) (%)
1	2,877	2,769	2,641	2,758	1,896
2	4,205	4,513	3,459	4,556	3,304
3	5,555	5,413	2,037	5,39	3,846
4	5,83	6,198	3,714	6,08	2,723
5	7,3699	-	-	-	-
6	9,283	-	-	-	-
7	9,500	-	-	-	-
8	11,055	-	-	-	-

Tablo 5.15. Su kemeri 2. ölçüm için deneysel ve teorik frekans değerleri

Frekans No	Teorik Frekanslar	Deneysel Frekanslar (PP)	Sönüm oranı (%) (PP)	Deneysel Frekanslar (SSI)	Sönüm oranı (%) (SSI)
1	2,877	2,778	2,513	2,758	1,896
2	4,205	4,542	3,516	4,52	3,304
3	5,555	5,405	2,635	5,375	3,846
4	5,83	6,149	4,318	6,099	2,723
5	7,3699	7,035	1,776	7,015	2,105
6	9,283	-	-	-	
7	9,500	-	-	-	
8	11,055	11,57	0,4271	-	

Tablo 5.16. Su kemeri ilk 5 moduna ait deneysel ve teorik frekansların kıyaslanması

Frekans No	Teorik Frekanslar	Deneysel Frekanslar (PP)	Deneysel Frekanslar (SSI)	Sönüm oranı (%) (PP)	Sönüm oranı (%) (SSI)
1	2,877	2,778	2,779	2,577	1,896
2	4,205	4,542	4,52	3,4875	3,304
3	5,555	5,405	5,375	2,336	3,846
4	5,83	6,149	6,099	4,016	2,723
5	7,3699	7,035	7,015	1,776	2,105

Mod 1 $f = 2,778$ HzMod 2 $f = 4,542$ HzMod 3 $f = 5,405$ HzMod 4 $f = 6,149$ Hz

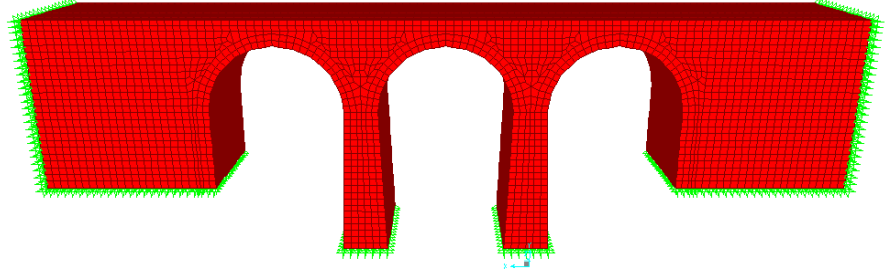
Şekil 5.72. Deneysel Modal analiz yöntemine göre su kemeri için ilk dört mod şekli ve PP yöntemine göre frekans değerleri

5.6.1.2. Zeytinler Köprüsü OMA uygulaması

Zeytinler’de bulunan kemer köprüye OMA uygulaması için ilk olarak yapının CAD çizimi AutoCAD programında oluşturulmuş, daha sonra bu dosya Hypermesh programına aktararak burada model mesh edilmiş ve SAP2000 programına aktarılmıştır (Şekil 5.73). Bölüm 5.4.1’de elde edilen parametreler kullanılarak, solid elemanların, elastisite modülü ve birim hacim kütlesi programa girilmiştir ve modal analiz yapılmıştır. Elde edilen teorik frekanslar ve mod şekilleri göz önüne alınarak hangi tip ivmeölçerlerin kullanılacağına ve bunların köprünün hangi bölgelerine hangi doğrultularda yerleştirileceğine karar verilmiştir.

Kemer köprü OMA testi, 12 adet tek eksenli ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.66). Kullanılan ivmeölçerler 0–50 Hz aralığındaki sinyallere duyarlı ve 10 Volt/g hassasiyetindedir. İvmeölçerlerden elde edilen sinyaller 17 kanallı Brüel&Kjaer 3560 veri toplama ünitesinde birleştirilip PULSE yazılımına aktarılmıştır. Burada sinyaller işlendikten sonra OMA yazılımı (OMA, 2006) kullanılarak dinamik karakteristikler elde edilmiştir.

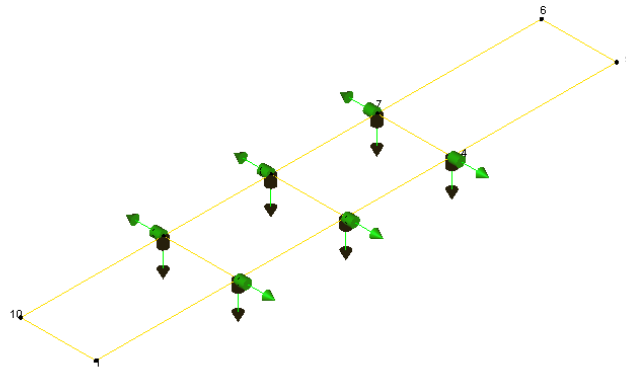
Kemer köprü için her biri yaklaşık 20-40 dakika süren 3 adet test yapılmıştır. İlk test 20 dakikalık ve kontrol amaçlı yapılan bir testtir. İlk testin amacı ivmeölçerlerin doğru çalışıp çalışmadığının kontrolü ve çevresel titreşimlerin yeterli olup olmadığının kontrol edilmesidir. Daha sonra 40 dakika süren ikinci test yapılmıştır. Bu testte ivmeölçerlerin köprü boyunca yerleşimi Şekil 5.75’de gösterilmektedir. Daha sonra köprünün sağ ve sol yanından 10 adet veri toplamak için referanslı ölçüm yapılmıştır. Bu işlem için iki ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. İlk ölçüm düzeneğinde ivmeölçerler Şekil 5.76a’da gösterilen noktalara (köprünün sol yanındaki her bir açıklık için orta noktalara ve mesnetlere) yerleştirilmiş, ikinci ölçüm düzeneğinde ise ivmeölçerler Şekil 5.76b’de gösterilen noktalara (köprünün sağ yanındaki her bir açıklık için orta noktalara ve mesnetlere) yerleştirilmiş ve titreşim sinyalleri toplanmıştır. Köprüyü titreştirmek amacıyla dışarıdan kuvvet uygulanmış, köprü üzerinden sürekli taşıt geçirilerek çevresel etkilerden yararlanılmıştır.



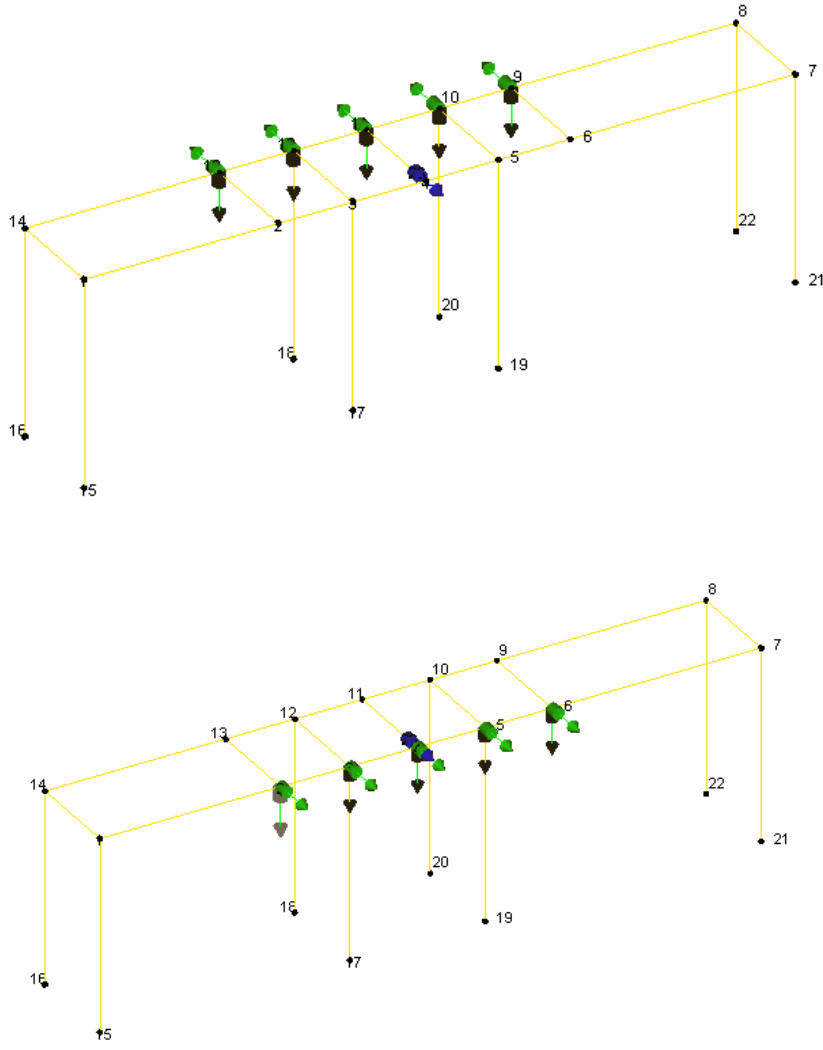
Şekil 5.73. Kemer köprü 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli



Şekil 5.74. 0–50 Hz aralığındaki titreşimlere duyarlı, 10 V/g hassasiyetinde ivmeölçer



Şekil 5.75. Kemer köprü OMA testi için ivmeölçerlerin yerleşim şeması



Şekil 5.76. Zeytinler Köprüsü referanslı ölçüm için ivmeölçerlerin yerleşim şemaları



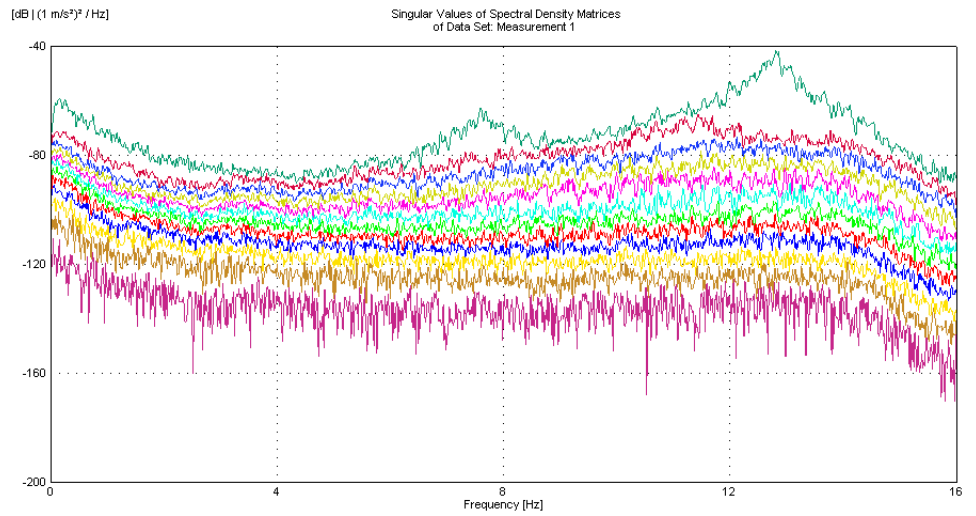
Şekil 5.77. İvmeölçerler ve veri toplama cihazı arasında iletimi sağlayan kablolar



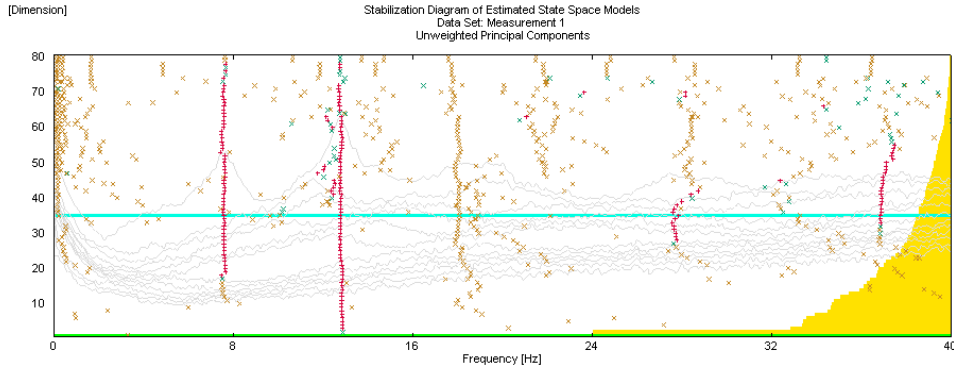
Şekil 5.78. Köprüye ivmeölçerlerin yerleştirilmesi ve veri toplama cihazı

Test sonucunda köprünün deneysel mod şekil ve frekans değerleri PP ve SSI (Piklerin Seçimi ve Stokastik Alt Alan Ayırıştırma metotları) yöntemlerine göre elde edilmiştir (Şekil 5.79). Deneysel ve teorik sonuçların ilk 5 mod için tutarsız olduğu görülmüştür (Tablo 5.16, Tablo 5.17 ve Tablo 5.18). Sonlu elemanlar iyileştirmesi yapılması gerekmektedir.

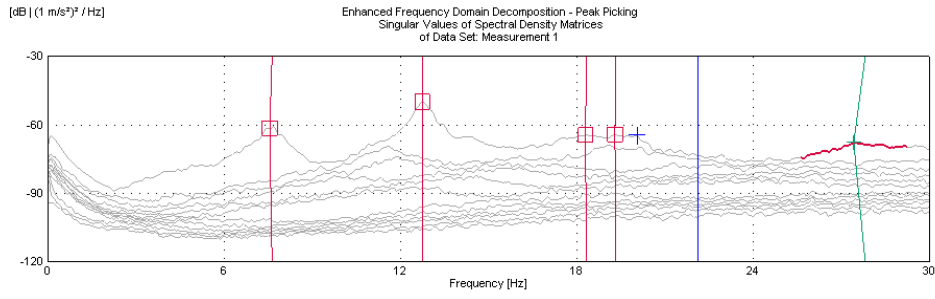
Deneysel Modal analiz yöntemine göre köprünün ilk dört mod şekli ve PP yöntemine göre frekans değerleri Şekil 5.84’de verilmiştir.



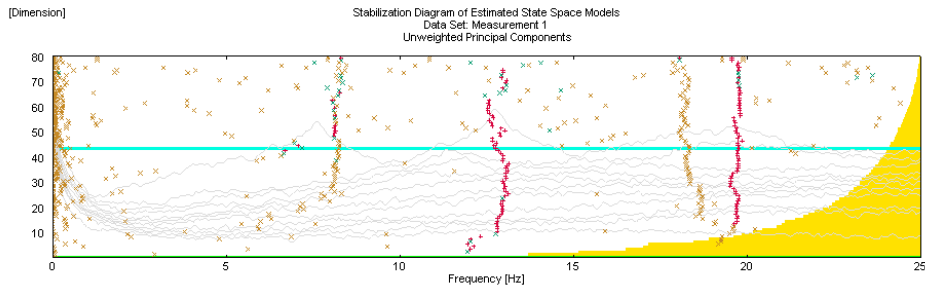
Şekil 5.79. Zeytinler Köprüsü referanssız ölçüm için ivmeölçerlerden alınan veri



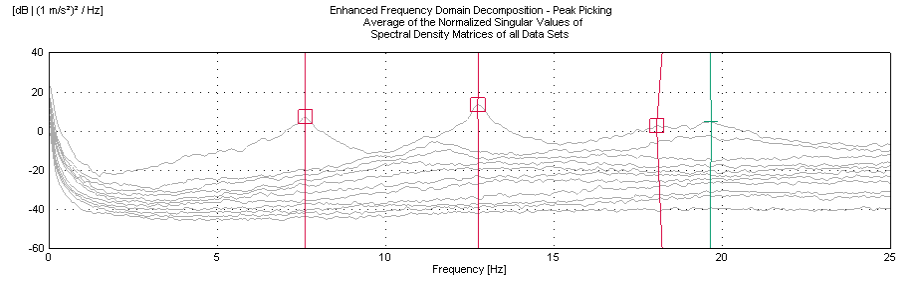
Şekil 5.80. Zeytinler Köprüsü referanssız ölçüm için, SSI yöntemiyle elde edilen stabilizasyon diyagramı



Şekil 5.81. Zeytinler Köprüsü için, Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler



Şekil 5.82. Zeytinler Köprüsü referanslı ölçüm için, SSI yöntemiyle elde edilen stabilizasyon diyagramı



Şekil 5.83. Zeytinler Köprüsü referanslı ölçüm için, Piklerin Seçilmesi (PP) yöntemi kullanılarak elde edilen tekil değerler

Tablo 5.17. Kemer köprü referanssız ölçüm için deneysel ve teorik frekans değerleri

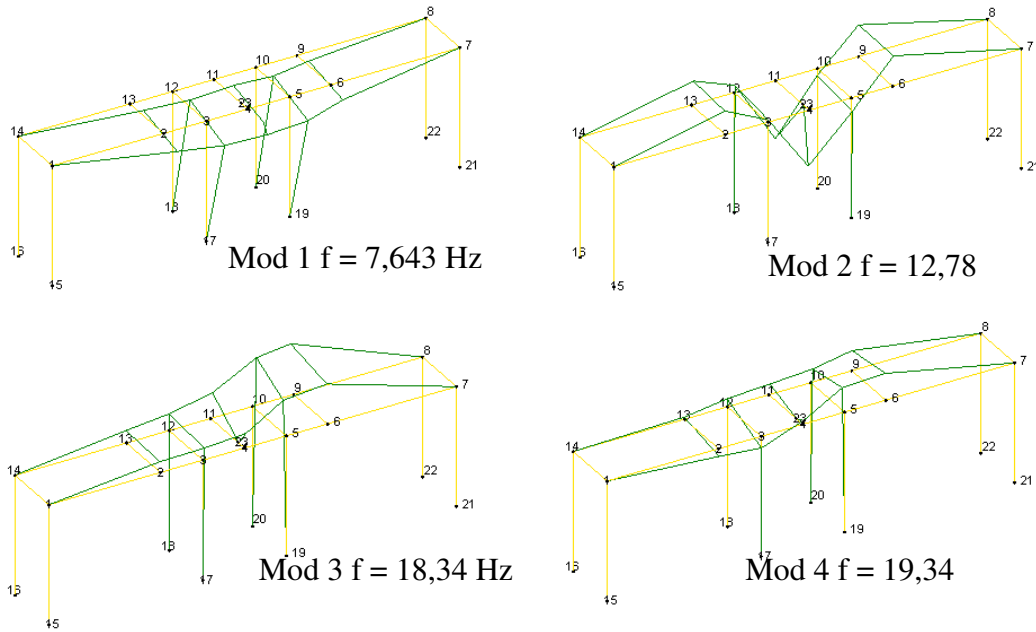
Frekans No	Teorik Frekanslar	Deneysel Frekanslar (PP)	Sönüm Oranı (PP) (%)	Deneysel Frekanslar (SSI)	Sönüm Oranı (SSI) (%)
1	4,599	7,643	4,334	7,599	3,459
2	7,669	12,78	1,677	12,79	0,879
3	7,936	18,34	3,147	-	-
4	8,341	19,34	1,041	-	-
5	11,296	27,83	3,184	27,87	1,678
6	12,558	-	-	36,83	4,783
7	12,640	-	-	-	-
8	12,900	-	-	-	-

Tablo 5.18. Kemer köprü referanslı ölçüm için deneysel ve teorik frekans değerleri

Frekans No	Teorik Frekanslar	Deneysel Frekanslar (PP)	Sönüm Oranı (PP) (%)	Deneysel Frekanslar (SSI)	Sönüm Oranı (SSI) (%)
1	4,599	7,614	3,484	7,513	5,823
2	7,669	12,77	1,265	12,86	0,6786
3	7,936	18,23	2,079	18,21	0,6164
4	8,341	19,63	2,46	19,8	0,4893
5	11,296	-	-	-	-
6	12,558	-	-	-	-
7	12,640	-	-	-	-
8	12,900	-	-	-	-

Tablo 5.19. Kemer köprü ilk moduna ait deneysel ve teorik frekansların kıyaslanması

Frekans No	Teorik Frekanslar	Deneysel Frekanslar (PP)	Deneysel Frekanslar (SSI)	Sönüm oranı (%) (PP)	Sönüm oranı (%) (SSI)
1	4,599	7,643	7,513	3,909	4,641
2	7,669	12,78	12,86	1,471	0,7788
3	7,936	18,34	18,21	2,613	0,6164
4	8,341	19,34	19,8	1,7505	0,4893
5	11,296	27,83	27,87	3,184	1,678



Şekil 5.84. Deneysel Modal analiz yöntemine göre köprünün ilk dört mod şekli ve PP yöntemine göre frekans değerleri

5.7. Darbe- eko metoduyla yapıların test edilmesi

Su kemerinde 12 farklı noktada, kemer Köprüsüde ise 7 farklı noktada darbe-eko testi yapılmıştır (Şekil 5.85 ve Şekil 5.86) ve SIBIE yöntemi kullanılarak sonuçlar irdelenmiştir. Analiz MS Office Excel programında hazırlanmış bir programla yapılmıştır. Kumamoto Üniversitesinde betonarme yapılar için geliştirilen program modifiye edilmiş ve tez konusu yığma yapılara göre tekrar düzenlenmiştir.



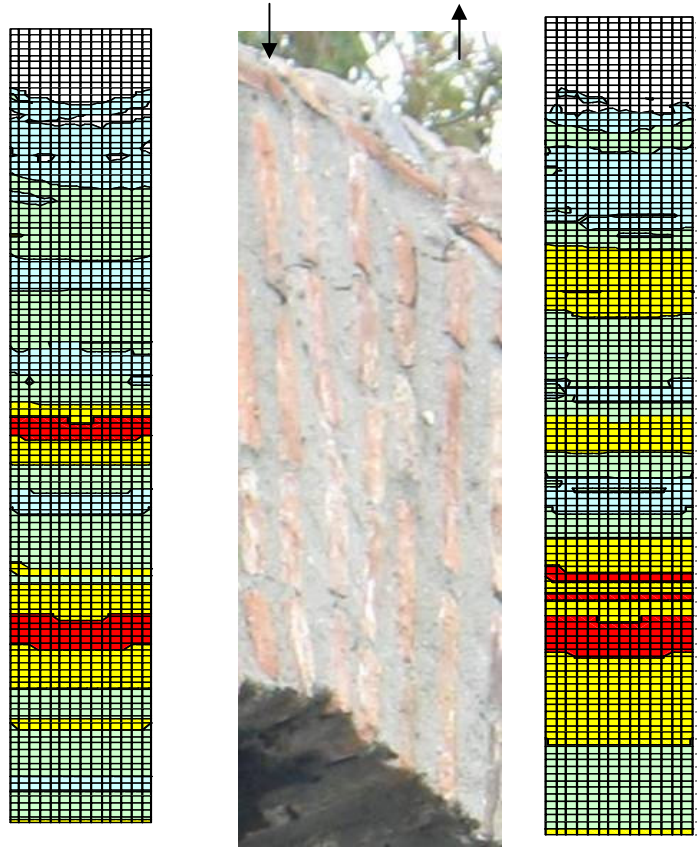
Şekil 5.85. Vezir Su Kemerı üzerinde darbe-eko testi



Şekil 5.86. Zeytinler’de bulunan kemer köprü üzerinde darbe-eko testi

Darbe-eko testinde darbe belli bir mesafeden düşürülen bir çelik bilye veya bir çekiç ile verilmiştir. Yığma yapıların darbe-eko testinde çekiç kullanılarak elastik dalgalar elde edilmiş ve doğru vuruş hızını elde etmek için birçok kere denemeler yapılmıştır. Yansıyan elastik dalgaların yüzeyde oluşturduğu titreşimleri tespit etmek için, 50 kHz’lik ivmeölçer kullanılmıştır. Sistemin frekans aralığı DC’den 50 kHz’e kadardır. Fourier spektra analizleri FFT (hızlı Fourier dönüşümü) ile analiz edilmiştir. Sistemin örnekleme süresi 4 μ (mikro) saniyedir ve her dalga formu için sayısallaştırılmış veri sayısı 2048’dir (11 bit). Test edilen bölgelerin kesitleri kare elemanlara bölünerek mesh edilmiş ve SIBIE yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada mesh boyutu 10 mm olarak seçilmiştir. Darbenin uygulandığı nokta ile ivmeölçerin yerleştirildiği nokta arasındaki mesafe 5 cm olarak seçilmiştir ve bu durumda her darbede, 10 cm genişliğindeki bir bölge analiz edilebilmektedir.

Su kemerinde ilk olarak kemerlerin çatlaklı bölgeleri üzerinde testler yapılmıştır. Yapılan testlerin sonuçları Şekil 5.87’de görülmektedir. Yüzeyden de görülen çatlak sarı bölge şekilde de görülmektedir; ayrıca kemerin yüzeyinden görünmeyen başka bir büyük çatlak ya da boşluğun var olduğu SIBIE yönteminde açıkça görülmektedir ki burada çatlağın kalınlığı 4-5 cm olarak tahmin edilmektedir.



Şekil 5.87. Su kemerinin Kuzey yönün ilk kemerinin test sonucu

Sonuç olarak Vezir Su Kemerî'nin Kuzey yönün 1. ve 3. kemerinde gözle görülen çatlaklardan başka içyapıda da çatlakların var olduğu tespit edilmiş ve bunların genişliği hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Daha sonra Vezir Su

Kemerî'nin Kuzey yönündeki yığma duvarındaki çatlak etrafında da test yapılmış (Şekil 5.88) ve çatlak derinliğinin yüzeyden 1 metre kadar içerde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.88. Su kemerinin Kuzey yığma duvarındaki çatlak derinliğinin tespiti

Zeytinler'deki kemer köprünün yığma kolonları üzerinde darbe-eko testi (Şekil 5.89) yapılmıştır ve kolonun taş yapısının sürekli olduğu (kolon içersinde moloz taş olmadığı) anlaşılmıştır.

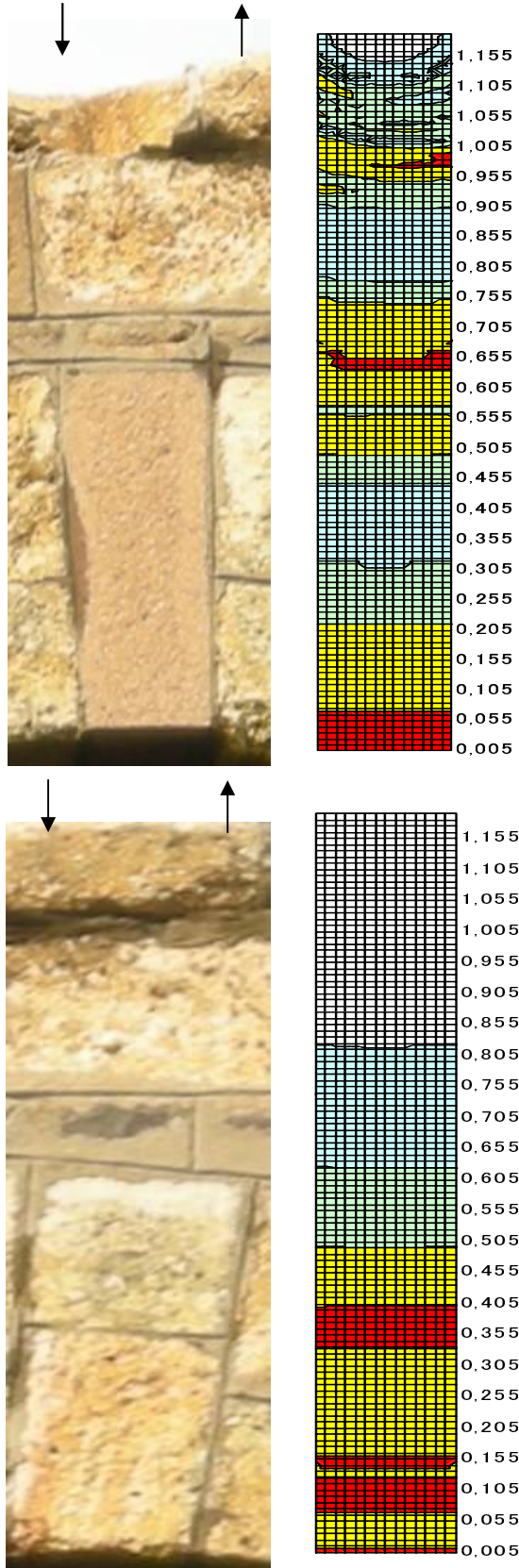
Kemer köprünün orta kemerinde darbe-eko testi yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.90 ve Şekil 5.91'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre kırmızı bölgeler yansımanın en fazla olduğu yerlerdir. Şekillerdeki kırmızı yüzeyler malzeme geçişlerindeki harcın iki taşa tam olarak yapışmadığını göstermektedir ve en alttaki kırmızı bölge ise dip yansımasını belirtmektedir. Sonuç olarak taşlar arasındaki harç kalınlığının 2 cm olduğu ve harcın tam olarak yüzeylere temas etmediği tahmin edilmiştir ve taş boyutlarının iç kesimlerde nasıl devam ettiği anlaşılmıştır.



Şekil 5.89. Darbe-eko testinin köprü ayaklarında uygulanması



Şekil 5.90. Köprü kemeri darbe-eko testi



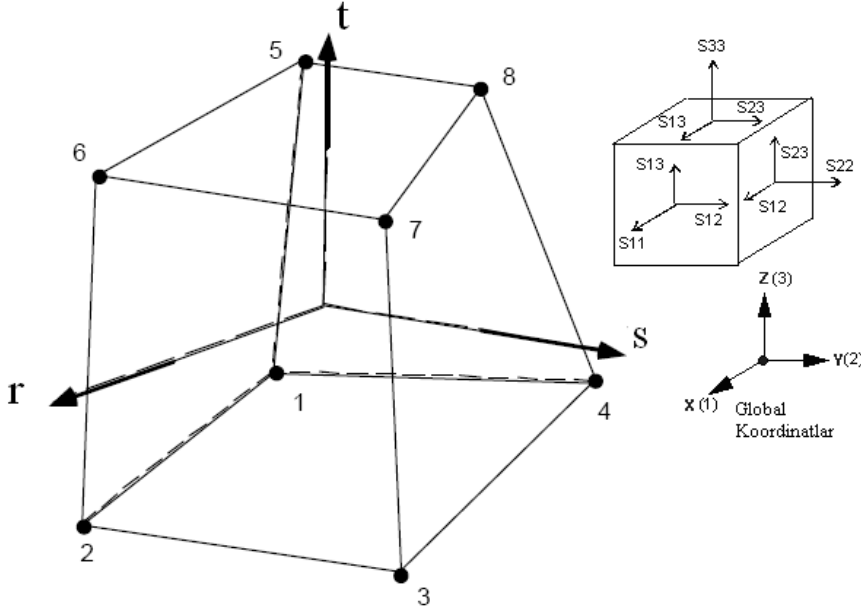
Şekil 5.91. Köprü kemerleri darbe-eko testi

6. VEZİR SU KEMERİ VE ZEYTİNLER KÖPRÜSÜ'NÜN SONLU ELAMANLAR YÖNTEMİ İLE ÜÇ BOYUTLU ANALİZLERİ

Bu bölümde Vezir Su Kemerı ve Zeytinler Köprüsü'nün sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan statik analizleri ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5'te sunulan malzeme testlerinin sonuçları ve yapı üzerinde yapılan test sonuçları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi için gerekli parametreler elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak hazırlanan sonlu elemanlar modelinden analiz sonucu elde edilen dinamik parametreler, Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile deneysel olarak elde edilen dinamik parametreler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda malzeme parametreleri ve sınır koşulları düzeltilip, sonlu elemanlar modelinin OMA sonucu elde edilen dinamik parametreler ile yakın sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Mikrotremor ölçümlerden elde edilen zemin hakim periyodu değerleri davranış spektrumu analizinde kullanılmıştır. Vezir Su Kemerı'nin kemerlerinde meydana gelen çatlakların meydana geliş nedenleri araştırılmıştır. Son olarak yapıların olası depremlerde güvenilirlikleri araştırılmış ve değerlendirilmiştir.

Yapıların sonlu elemanlar modelinde 3 boyutlu hexahedral (altı yüzlü 8 düğüm noktalı) elemanlar kullanılmıştır (Şekil 6.1). Bu elemanların katı modellemede hassasiyeti oldukça başarılıdır (SAP 2000, 2009). Altı yüzlü 8 düğüm noktalı eleman için baz şekil fonksiyonları Eşitlik 6.1'de verilmiştir.

$$\bar{N}_1(r) = \frac{1}{2}(1 - r^2), \bar{N}_2(s) = \frac{1}{2}(1 - s^2), \bar{N}_3(t) = \frac{1}{2}(1 - t^2) \quad 6.1$$



Şekil 6.1. Altı yüzlü Hex eleman (Rao, 2004)

Solid eleman için rijitlik matrisi aşağıda açıklanmıştır.

Lokal koordinatları bilinen eleman üzerindeki bir noktanın global koordinatları aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Zeinkiewicz et al., 1991).

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ z_8 \end{Bmatrix} \quad 6.2$$

Buradaki x_i ($i=1,2 \dots 8$), y_i ($i=1,2 \dots 8$) ve z_i ($i=1,2 \dots 8$) sırasıyla düğüm noktalarının global eksen takımındaki koordinatlarını vermektedir. N matrisi 3x8 boyutundadır.

$$N_i(r, s, t) = \frac{1}{8} (1 + rr_i) (1 + ss_i) (1 + tt_i) : i=1,2, \dots, 8 \quad 6.3$$

Eşitlik 6.4 de verilen lineer Lagrangian şekil fonksiyonları için r_i , s_i , t_i ile gösterilen değerler ilgili düğüm noktalarının lokal koordinat değerleridir.

Eşitlik 6.2’de verilen N matrisi lineer Lagrangian şekil fonksiyonları cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & \dots & N_8 \end{bmatrix}_{3 \times 8} \quad 6.4$$

Denlem 6.2 başka bir gösterim ile

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^8 N_i x_i \\ \sum_{i=1}^8 N_i y_i \\ \sum_{i=1}^8 N_i z_i \end{Bmatrix} \quad 6.5$$

olarak ifade edilebilir. Genel deplasman fonksiyonları ise düğüm noktaları deplasmanlarına bağlı olarak,

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_8 \end{Bmatrix} = [N] \vec{Q}^{(e)} \quad 6.6$$

türev ile ifade edilebilir. Burada Q düğüm noktalarının deplasmanlarını veren matristir. u, v, w sırasıyla x, y ve z yönlerindeki deplasmanlardır.

Şekil değiştirme ile deplasmanlar arasındaki ilişki de Elastisite Teorisinden bilindiği üzere aşağıdaki matris denklem takımı ile belirlenir.

$$\vec{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = \underset{6 \times 24}{[B]} \underset{24 \times 1}{\vec{Q}} \{e\} \quad 6.7$$

Burada B matrisi, gerilme-deplasman matrisidir ve

$$\underset{6 \times 24}{[B]} = \underset{6 \times 3}{[B_1]} \underset{3 \times 8}{[B_2]} \dots \underset{3 \times 8}{[B_8]} \quad 6.8$$

olarak yazılabilir.

$$\underset{6 \times 3}{[B_i]} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad i=1,2,\dots,8 \quad 6.9$$

B matrisi türev ifadesi,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial y}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial y}{\partial s} + \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} \quad 6.10$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad 6.11$$

şeklinde yazılır. J matrisi Jacobiyan matrisidir ve

$$[J]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} x_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} y_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} z_i \right) \\ \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial s} x_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial s} y_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial s} z_i \right) \\ \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial t} x_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial t} y_i \right) & \sum_{i=1}^8 \left(\frac{\partial N_i}{\partial t} z_i \right) \end{bmatrix} \quad 6.12$$

eşitliği ile tanımlanmıştır. Buradaki $\frac{\partial N_i}{\partial r}$, $\frac{\partial N_i}{\partial s}$ ve $\frac{\partial N_i}{\partial t}$ ifadeleri

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial r} &= \frac{1}{8} r_i (1 + s s_i) (1 + t t_i) \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} &= \frac{1}{8} s_i (1 + r r_i) (1 + t t_i) \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} &= \frac{1}{8} t_i (1 + r r_i) (1 + s s_i) \end{aligned} \right\}, \quad i=1,2, \dots, 8 \quad 6.13$$

eşitlikleri ile elde edilir.

Lokal ve global eksenler arasındaki ilişkiden aşağıdaki ifade yazılır.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \\ \frac{\partial N_i}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad 6.14$$

Eleman rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[K^{(e)}] = \int \int \int_{V^{(e)}} [B]^T [D][B] dV \quad 6.15$$

Burada D gerinim ile gerilme arasındaki ilişkiyi veren malzeme matrisidir, dV ise

$$dV = dxdydz = \det[J] drdsdt \quad 6.16$$

ile tanımlanmıştır. Bu ifade yerine yazıldığında

$$[K^{(e)}] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] \det[J] drdsdt \quad 6.17$$

$$[K^{(e)}] = \sum_{r=R_1}^{R_2} \sum_{s=S_1}^{S_2} \sum_{t=T_1}^{T_2} \{ [B]^T [D][B] \det[J] \}_{(R_i, S_j, T_k)} \quad 6.18$$

elde edilir. Sekiz düğüm noktalı hex (prizma) elemanı için lineer şekil fonksiyonlu eleman matrisinin lokal koordinatlardaki rijitlik ifadesi eşitlik 6.18’de elde edilmiş olur (Zeinkiewicz et al., 1991).

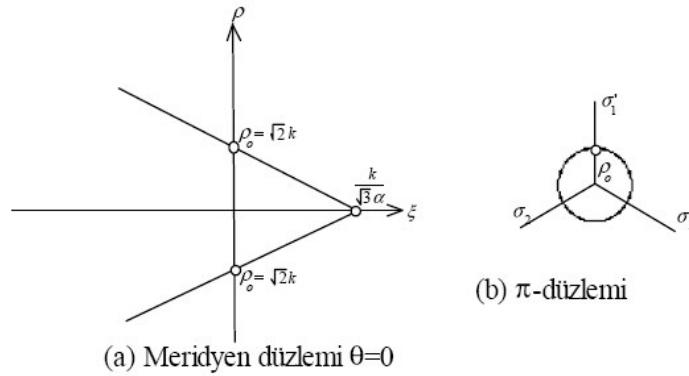
6.1. Drucker-Prager Malzeme Modeli

Lineer teoride malzemenin akma gerilmesi aşılmadıkça, gerilme-birim deformasyon ilişkisi doğrusal kabul edilir ve hesaplar doğrusal elastisite teorisine göre yapılır ve akma gerilmesi üzerindeki gerilmeler (pekleşme) dikkate alınmaz. Yapıların elastik olarak incelenmesinin, gerilme dağılımının her zaman düzgün olmadığı ve yüksek gerilmeli yerel bölgelerin plastikleşebileceğinin dikkate alınması durumunda, gerçeği tam olarak yansıtmayacağı söylenebilir. Plastik hesap, süneklikten faydalanan malzeme içerisinde üniform dağılmayan gerilmeleri daha gerçekçi bir şekilde hesaplamaya imkan verir. Son yıllarda,

malzemelerin bünye bağıntılarının belirlenmesinde kullanılan pek çok matematiksel model geliştirilmiştir. Söz konusu modeller betonun mekanik davranışını, plastik ve visko-plastik teoriler yardımıyla ifade edebilmektedir. Yapıların plastik analizinde kullanılmak üzere hazırlanmış, sonlu eleman yöntemi ile çalışan paket programlarda yer alan ve en çok kullanılan malzeme modeli yaklaşımı Drucker-Prager malzeme modelidir. Malzemenin lineer olmayan davranışı, yığmanın çekmede çatlaması, basınçta ise plastikleşmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Drucker-Prager yaklaşımı bu etkilerin göz önüne alınabildiği bir elasto-plastik malzeme modelidir (Zeinkiewicz et al., 1991). Söz konusu modelde akma kriterinin Von-Mises kriterinin genelleştirilmiş formu olduğu söylenebilir. Drucker-Prager, akma kriterini, Von-Mises kriterinde hidrostatik gerilme etkisini ek bir terim ile dikkate alarak,

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad 6.19$$

şeklinde ifade etmektedir. Bu bağıntıda α ve k malzeme sabitleri, I_1 gerilme tansörünün birinci invariantını, J_2 ise deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantını göstermektedir. $\alpha = 0$ olması durumunda kriter, Von-Mises kriteri ile aynı olacaktır (Chen et.al. 1987). Yukarıdaki denklemin gösterdiği akma yüzeyi, asal gerilme uzayında bir dairesel koni olacaktır; meridyenleri ve π -düzlemindeki kesiti Şekil 6.2’de görülmektedir.

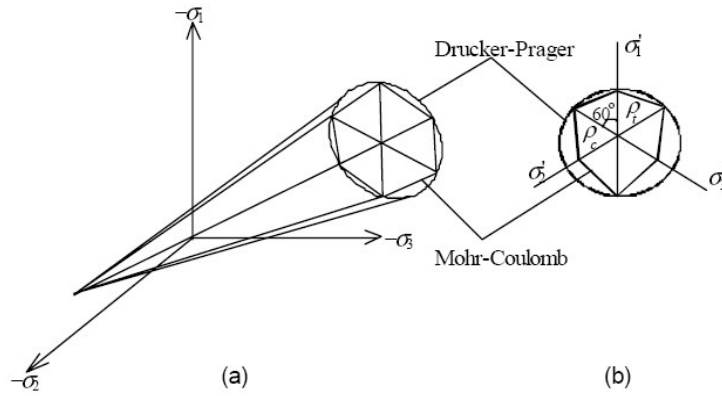


Şekil 6.2. Drucker-Prager kriteri (Chen et.al., 1987)

Şekil 6.3’te görüldüğü gibi Drucker-Prager kriteri, Mohr-Coulomb kriterine oldukça yakındır. Drucker-Prager daire, Mohr-Coulomb altıgenine dıştan çizilen bir sınır daire olarak düşünülürse, iki yüzey $\theta = 60^\circ$, α , k ile belirlenecek basınç meridyenine uygun düşer. Burada α ve k değerleri, ϕ ve c değerlerine bağlı olarak,

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}}, k = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}} \quad 6.20$$

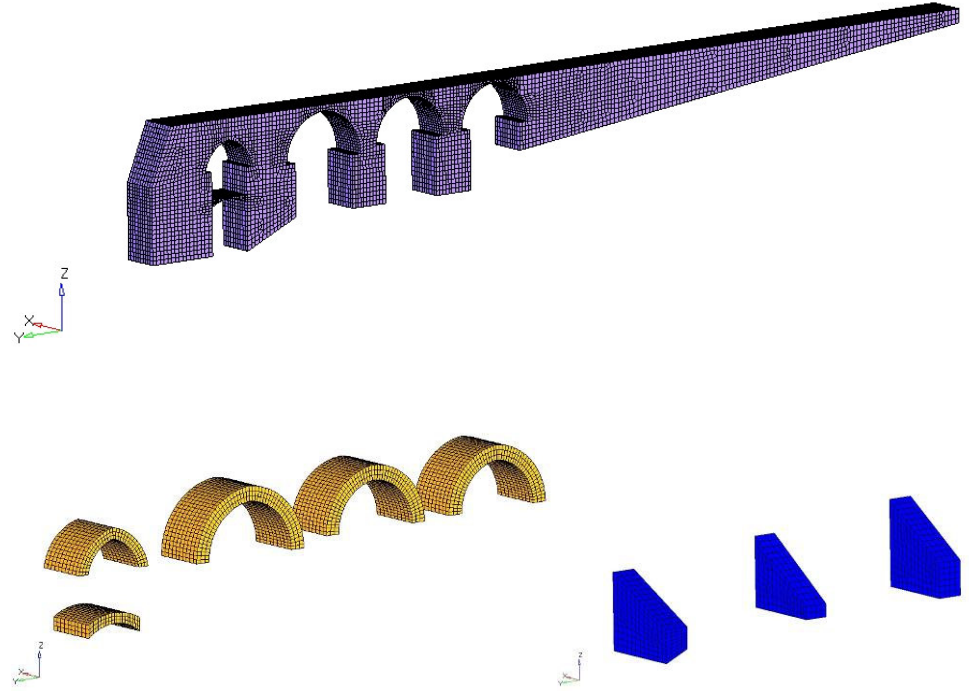
eşitlikleri ile belirlenebilir. Bu ifadelerde φ ve c , sırası ile malzemenin içsel sürtünme açısını ve kohezyonunu ifade eden parametrelerdir. Bilgisayar programı, plastik analiz safhasında bu değerleri dikkate almaktadır. Yukarıdaki bağıntıdaki sabitlerle belirlenen koni, Mohr-Coulomb akma yüzeyindeki altıgen piramidi çevreleyen bir dış sınır görünümündedir (Şekil 6.3).



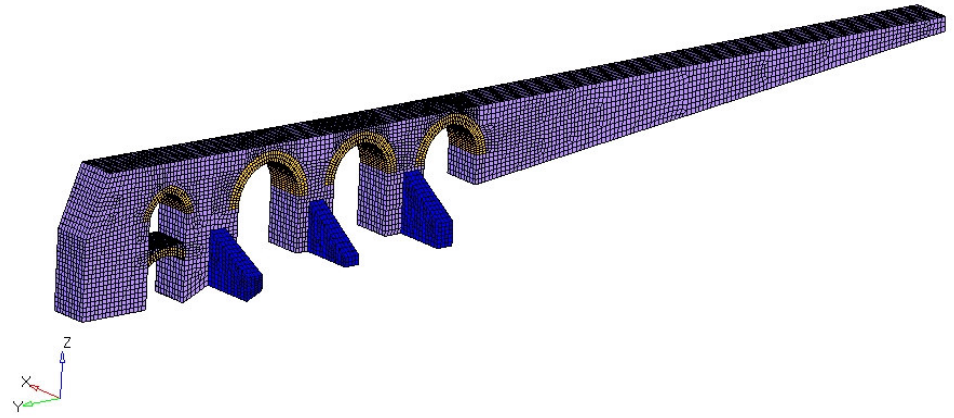
Şekil 6.3. Drucker-Prager ve Mohr-Coulomb kriterlerinin karşılaştırılması, (a) asal gerilme uzayında, (b) deviatorik düzlemde (Chen, 1982)

6.2. Yapıların 3 Boyutlu Katı Modellerinin FEM Analizi İçin Hazırlanması

Bu bölümde su kemeri ve köprünün daha önceden hazırlanmış modelleri tekrar düzenlenerek FEM analizi için hazırlanmıştır. Yapılar zemine sabit mesnetli olarak tanımlanmıştır. Vezir Su Kemerî taş ve harçtan oluşan yığma duvarları ile tuğla ve harçtan oluşan kemerlerden oluşmaktadır. Bu amaçla yapının üç boyutlu katı modeli hazırlanırken malzeme parametrelerinin daha kolay oluşturulabilmesi için taş yığma ve tuğla yığma ayrı ayrı modellenmiştir (Şekil 6.4) ve tüm model ise Şekil 6.5'te sunulmuştur.

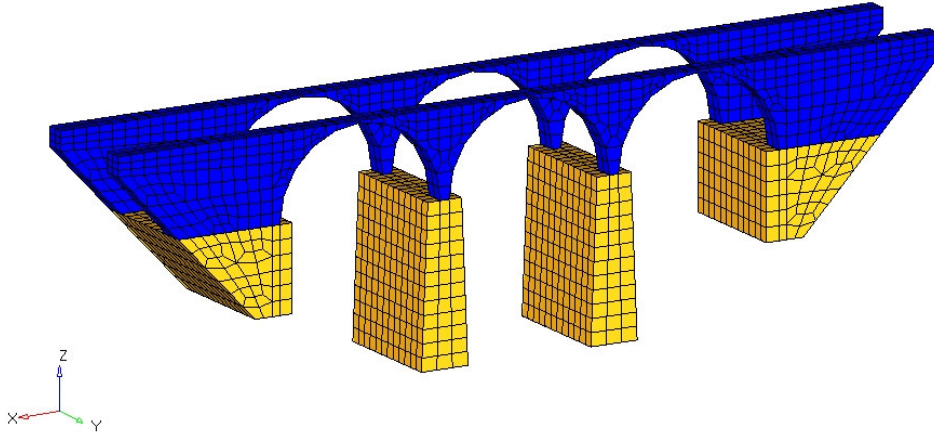


Şekil 6.4. Vezir Su Kemerı'ni oluşturan yığma taş duvarlar, payandalar ve yığma tuğla kemerler

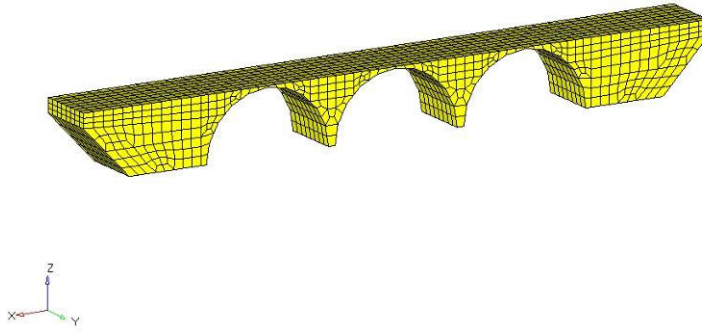


Şekil 6.5. Vezir Su Kemerı üç boyutlu katı modeli

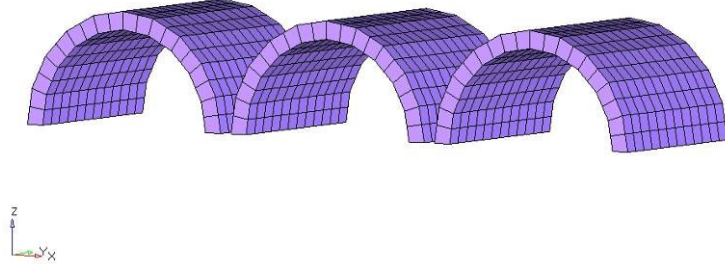
Kemer köprünün ise yığma taş yan duvarları, yığma taş kolon ayakları (Şekil 6.6), dolgu taşı ve harçtan oluşan dolgu malzemesi (Şekil 6.7), yumuşak taş ve harçtan oluşan kemerleri (Şekil 6.8) ve tempan taşları ayrı ayrı modellenmiştir ve tüm model Şekil 6.9’de sunulmuştur.



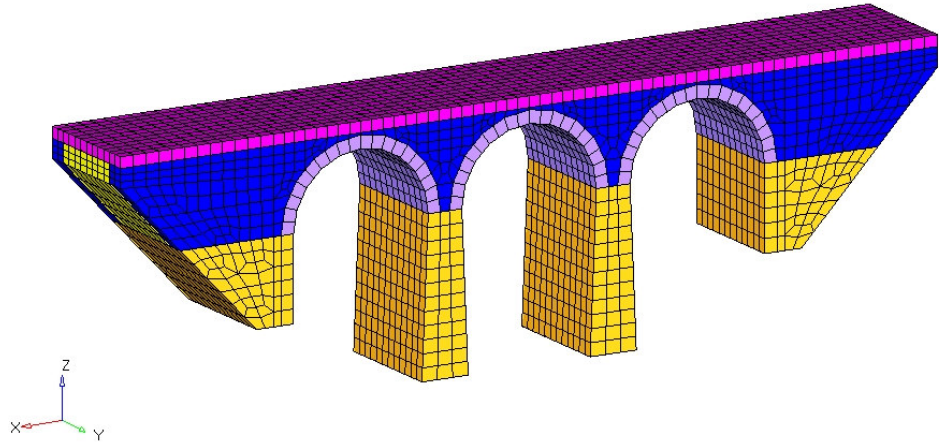
Şekil 6.6. Zeytinler Köprüsü yan duvarlar ve taşıyıcı kolon ayaklar



Şekil 6.7. Zeytinler Köprüsü dolgu malzemesi



Şekil 6.8. Zeytinler Köprüsü bozunmuş andezit (yumuşak taş) taşından oluşan kemer



Şekil 6.9. Zeytinler Köprüsü

6.3. Yığmalara Ait Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

Tez kapsamındaki yığma yapıları oluşturan kompozit yığma sistem, homojenleştirme yaklaşımı (makro model) ile modellenmiştir. Yığma kompoziti oluşturan taş/tuğla ve harç bir bütün olarak düşünülmüştür. Yığma sistemin elastik parametreleri ve yığmayı oluşturan taş/tuğla ve harcın mekanik özellikleri literatürde kabul görmüş çeşitli denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

Yığma sistemlerin basınç dayanımı aşağıdaki denklemden elde edilmiştir (Eurocode 6, 1996).

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad 6.21$$

Burada, K , α ve β birer sabittir, f_b (MPa); taş veya tuğlanın basınç mukavemetini, f_m (MPa); harcın basınç mukavemetini ifade eder. K sabitinin değeri, yığma sistemin morfolojik yapısına göre 0,4 ile 0,6 arasında 0,05'lik farklarla değişen değerler alır. α ve β sabitleri için ise düzgün şekilli yığmalarda sırasıyla 0,7 ve 0,3, kaba örülmüş yığmalarda ise 0,65 ve 0,25 değerleri önerilmiştir. f_m için alınabilecek en büyük değer 20 MPa veya f_b değerinin iki katıdır (Eurocode 6, 1996).

Çok ince harca sahip (0,5 mm ile 3 mm arasında) yığma sistemlerde ise aşağıdaki formül kullanılır.

$$f_k = K \cdot f_b^{0,85} \quad 6.22$$

Koçak (Koçak, 1999), çalışmasında yığma sistemin çekme mukavemeti olarak basınç mukavemetinin % 10'nun alınabileceğini önermiştir.

Yığma sistemlerin elastisite modülleri için Lourenço (Lourenço, 2001) ve Eurocode 6 (1996) aşağıdaki denklemi kullanmıştır.

$$E = \frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}} \rho \quad 6.23$$

Burada, ρ bir sabittir ve harç ile taş veya tuğla arasındaki aderansa göre değişmektedir (Lourenço, 2001). Diğer parametreler t_m , t_u , E_m ve E_u ise sırasıyla harcın ortalama kalınlığını, taş veya tuğlanın ortalama yüksekliğini, harcın elastisite modülünü ve taş veya tuğlanın elastisite modülünü ifade eder.

Eurocode 6 (1996) ise elastisite modülü için aşağıdaki denklemi sunmuştur.

$$E = 1000 \cdot f_k \quad 6.24$$

Eurocode 6 (1996) G kayma modülü için ise elastisite modülü değerinin % 40'nın alınabileceğini önermiştir.

$$G = 0,4E \quad 6.25$$

Yığma yapılar için Poisson oranı Koçak tarafından 0,17 olarak önerilmiştir (Koçak, 1999).

6.3.1. Vezir Su Kemerine ait yığma parametrelerinin belirlenmesi

Vezir Su Kemerinin yığma taş ve harçtan oluşan duvarları için Denklem 6.21 kullanılarak basınç mukavemeti,

$$f_k = 0,5 \cdot 62,65^{0,65} \cdot 6,50^{0,25} = 11,75 \text{ MPa}$$

olarak elde edilmiştir.

Yığma sistemin çekme mukavemeti değeri ise Koçak'ın (Koçak, 1999) önerisine göre, basınç dayanımı %10'u olarak dikkate alındığında;

$$f_{ts} = 0,1 \cdot 11,75 = 1,17 \text{ MPa}$$

olarak elde edilmiştir.

Yığma sistemin elastisite modülü değeri ise Denklem 6.23 kullanılarak,

$$E = \frac{0,02 + 0,25}{\frac{0,02}{0,185} + \frac{0,25}{5,923}} \cdot 0,5 = 0,898 \text{ GPa}$$

olarak bulunmuştur.

Kayma modülü, Denklem 6.25 kullanılarak

$$G = 0,4 \cdot 898 = 359 \text{ MPa}$$

elde edilmiştir.

Yığma yapıyı oluşturan taşın ortalama görünür yoğunluğu 2430 kg/m^3 ve harcın yoğunluğu 1700 kg/m^3 olarak düşünülürse yığma sistemin ortalama görünür yoğunluğu 2100 kg/m^3 olarak alınabilir.

Su kemerinin pişmiş tuğla ve harçtan oluşan kemer birimleri için Denklem 6.21 kullanılarak basınç mukavemeti,

$$f_k = 0,5 \cdot 10,41^{0,65} \cdot 6,50^{0,25} = 3,68 \text{ MPa}$$

olarak elde edilmiştir.

Yığma tuğla sistemin çekme mukavemeti değeri, Koçak'ın (Koçak, 1999) önerisine göre,

$$f_{ts} = 0,1 \cdot 3,68 = 0,37 \text{ MPa}$$

olarak elde edilmiştir.

Yığma sistemin elastisite modülü değeri ise Denklem 6.23 kullanılarak,

$$E = \frac{0,04 + 0,05}{\frac{0,01}{0,185} + \frac{0,25}{1,018}} 0,5 = 0,170 \text{ GPa}$$

olarak bulunmuştur.

Kayma modülü, Denklem 6.25 kullanılarak

$$G = 0,4 \cdot 170 = 67,8 \text{ MPa}$$

elde edilmiştir.

Yığma kemeri oluşturan tuğlanın ortalama görünür yoğunluğu 1800 kg/m^3 ve harcın yoğunluğu 1700 kg/m^3 olarak düşünülürse yığma sistemin ortalama görünür yoğunluğu 1750 kg/m^3 alınabilir.

Su kemerine ait yığma parameterleri Tablo 6.1'de sunulmuştur

Tablo 6.1. Vezir Su Kemer Malzeme Parameterleri

	Yığma Taş	Yığma Tuğla
Basınç Dayanımı (MPa)	11,75	3,68
Çekme Dayanımı (MPa)	1,17	0,37
Elastisite Modülü (MPa)	898	170
Kayma Modülü	359	67,8
Görünür Yoğunluk (kg/m^3)	2100	1750
Poisson oranı	0,17	0,17

6.3.2. Köprü'ye ait yığma parametrelerinin belirlenmesi

Kemer köprünün yığma taş ve harçtan oluşan duvarları için Denklem 6.21 kullanılarak basınç mukavemeti,

$$f_k = 0,5 \cdot 67,50^{0,65} \cdot 11,95^{0,25} = 14,36 \text{ MPa}$$

olarak elde edilmiştir.

Yığma sistemin çekme mukavemeti değeri ise Koçak'ın (Koçak, 1999) önerisine göre,

$$f_{ts} = 0,1 \cdot 14,36 = 1,43 \text{ MPa} \quad 6.26$$

olarak elde edilmiştir.

Yığma sistemin elastisite modülü değeri ise denklem 6.23 kullanılarak,

$$E = \frac{0,02 + 0,40}{\frac{0,02}{0,180} + \frac{0,40}{6,980}} 0,5 = 1,25 \text{ GPa}$$

olarak bulunmuştur.

Kayma modülü, Denklem 6.25'den

$$G = 0,4 \cdot 1250 = 500 \text{ MPa}$$

elde edilmiştir.

Yığma yapıyı oluşturan taşın ortalama görünür yoğunluğu 2490 kg/m^3 ve harcın yoğunluğu 1800 kg/m^3 olarak düşünülürse yığma sistemin ortalama görünür yoğunluğu 2100 kg/m^3 alınabilir.

Köprünün taş ve harçtan oluşan dolgu malzemesi için denklem 6.23 kullanılarak elastisite modülü $E = 650 \text{ MPa}$ olarak hesaplanmıştır. Frunzio, çalışmalarında dolgu malzemesine ait Poisson oranı için ise 0,05 olarak önermiştir (Frunzio et al., 1998).

Dolguyu oluşturan tuğlanın ortalama görünür yoğunluğu 2490 kg/m^3 ve harcın yoğunluğu 1800 kg/m^3 olarak düşünülürse yığma sistemin ortalama görünür yoğunluğu 1950 kg/m^3 alınabilir.

Kemer taşları için basınç dayanımı Denklem 6.21 kullanılarak

$$f_k = 0,5 \cdot 39^{0,65} \cdot 11,95^{0,25} = 10,05 \text{ Mpa}$$

elde edilmiştir. Kemerin çekme mukavemeti değeri ise Koçak'ın (Koçak, 1999) önerisine göre,

$$f_{ts} = 0,1 \cdot 10,05 = 1,01 \text{ MPa}$$

olarak elde edilmiştir.

Yığma sistemin elastisite modülü değeri ise Denklem 6.23 kullanılarak,

$$E = \frac{0,01 + 0,4}{\frac{0,01}{0,185} + \frac{0,4}{2,00}} 0,5 = 0,8069 \text{ GPa}$$

olarak bulunmuştur.

Kayma modülü, Denklem 6.25'den,

$$G = 0,4 \cdot 807 = 322 \text{ MPa}$$

elde edilmiştir

Köprüye ait yığma parameterleri Tablo 6.2'de sunulmuştur

Tablo 6.2. Köprüye ait Malzeme Parameterleri

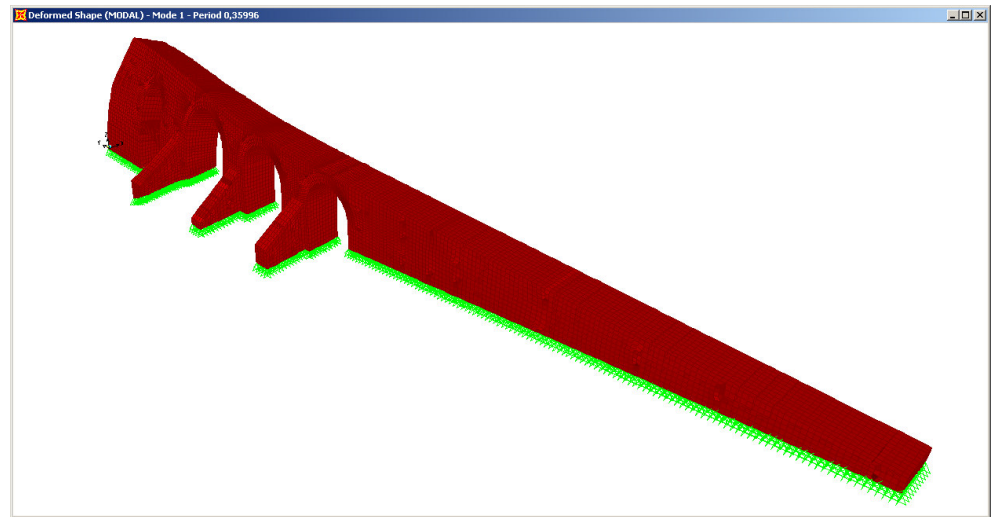
	Yığma Taş	Taş Kemer
Basınç Dayanımı (MPa)	14,36	10,05
Çekme Dayanımı (MPa)	1,43	1,01
Elastisite Modülü (MPa)	1250	807
Kayma Modülü (MPa)	500	328
Görünür Yoğunluk (kg/m^3)	2000	2000
Poisson oranı	0,17	0,17

6.4. Yapıların Sonlu Eleman Modellerinin İyileştirilmesi

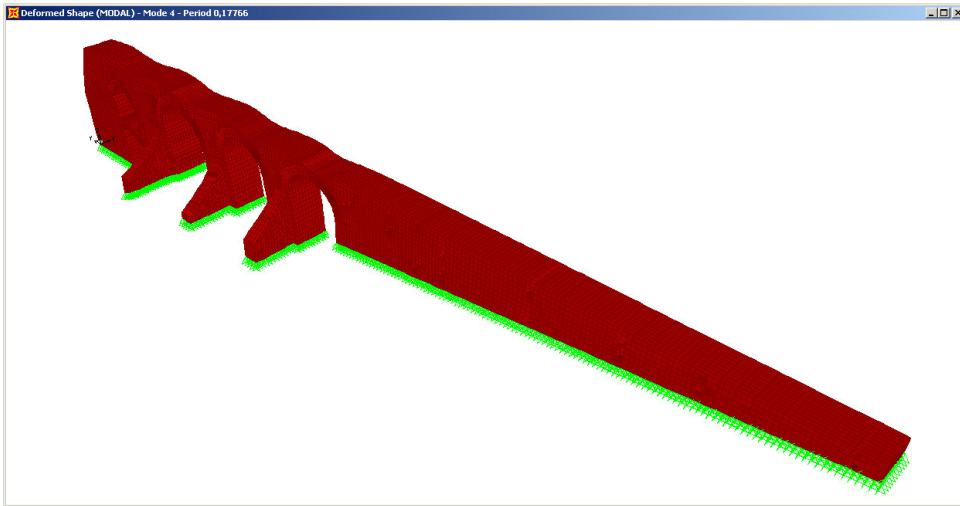
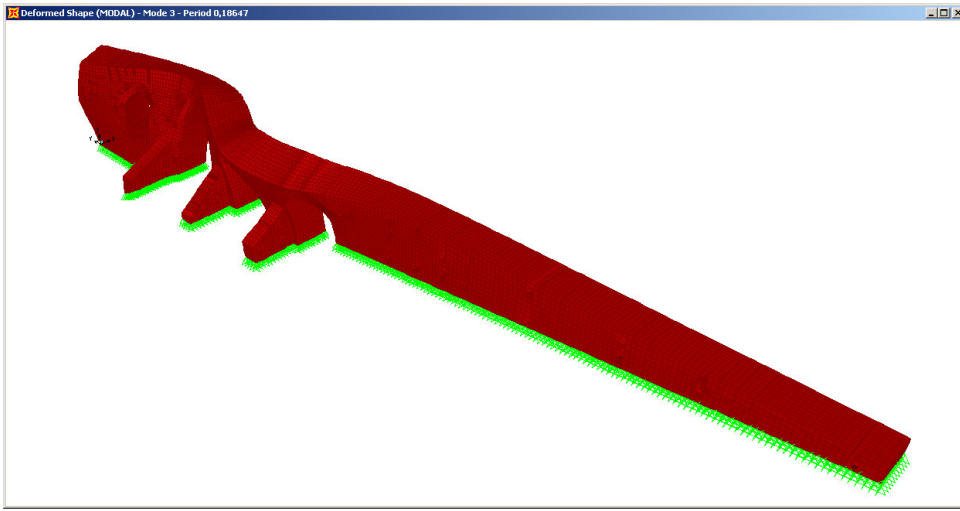
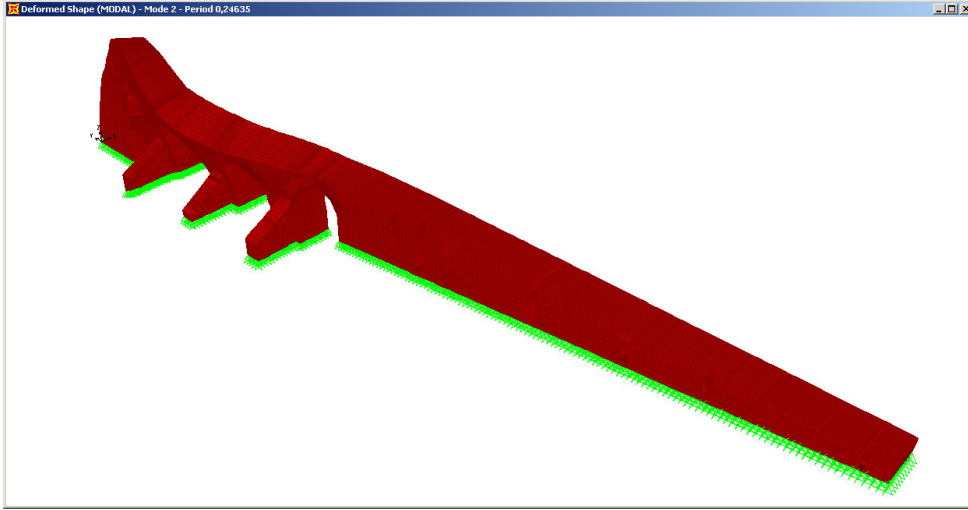
Bölüm 5.4'te Operasyonel Modal Analiz yöntemi kullanılarak belirlenen yapılara ait dinamik parametreler, bu bölümde yapıların SAP2000 sonlu eleman programıyla analitik olarak belirlenen dinamik karakteristikleri ile karşılaştırılmıştır. Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle elde edilen frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları analitik olarak elde edilen değerlerle karşılaştırılıp sonlu elemanlar modelinde iyileştirme yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelindeki iyileştirmeler taşıyıcı sistem elemanlarının malzeme özelliklerindeki değişimleri dikkate alarak gerçekleştirilmiştir.

6.4.1. Su kemeri modal analiz ve sonlu elemanlar model iyileştirmesi

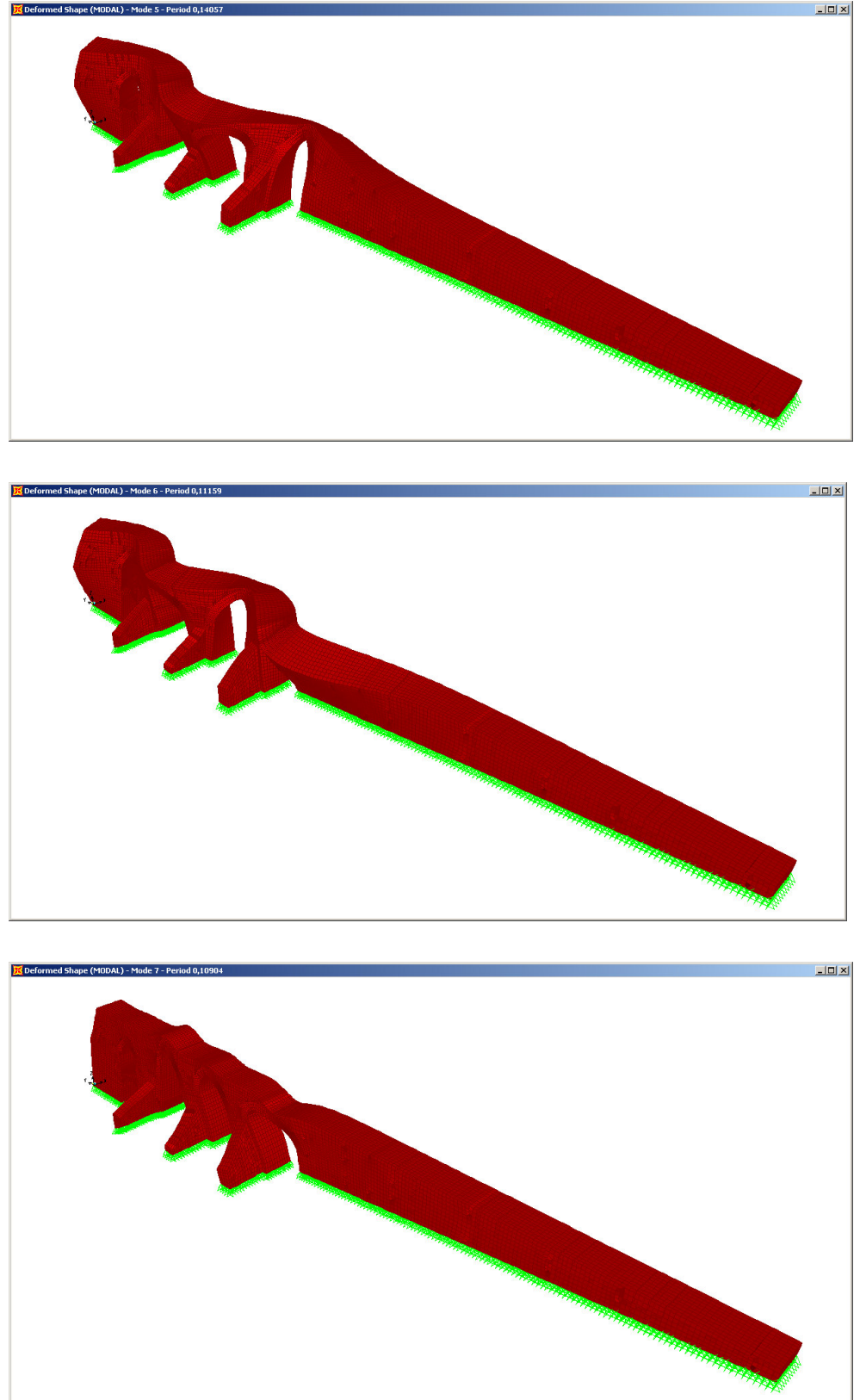
Tablo 6.1'deki malzeme parametreleri kullanılarak SAP 2000 programında yapılan modal analiz sonucu elde edilen ilk 8 moda ait mod şekilleri verilmiştir (Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13)



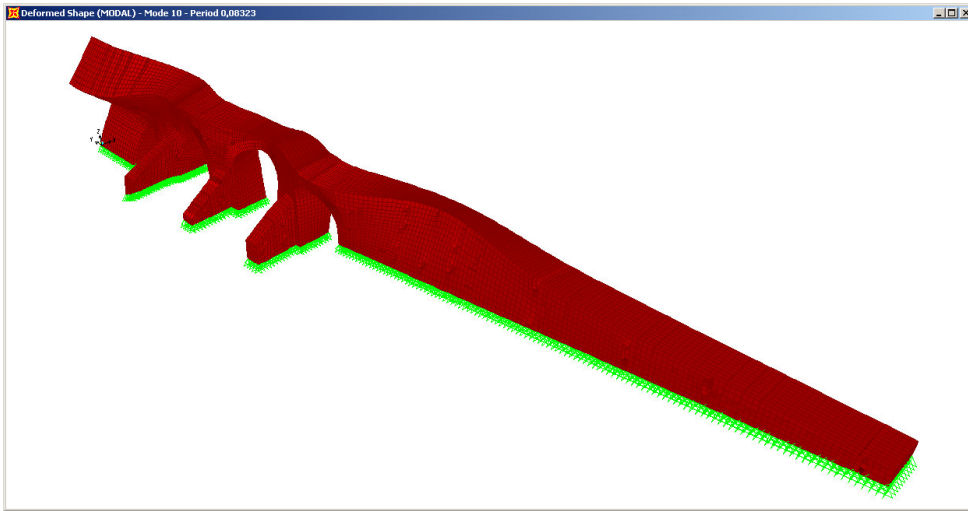
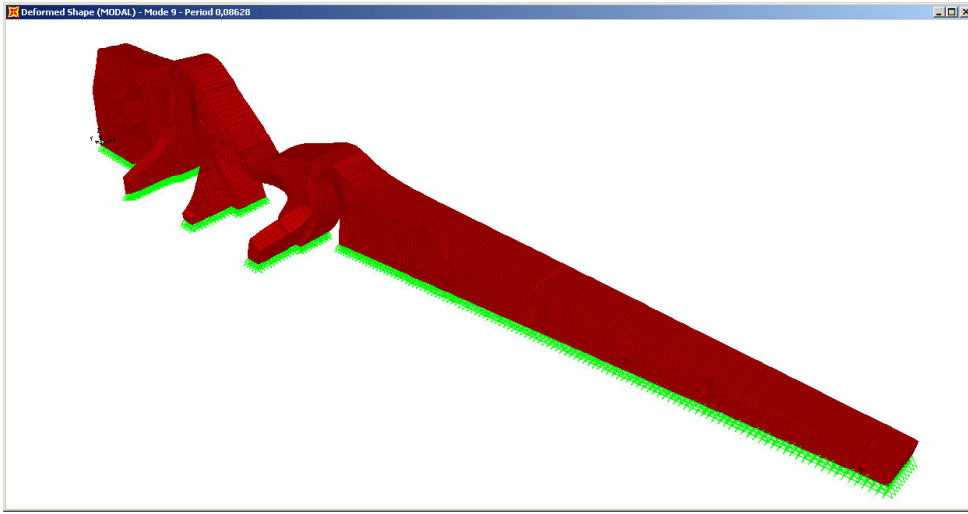
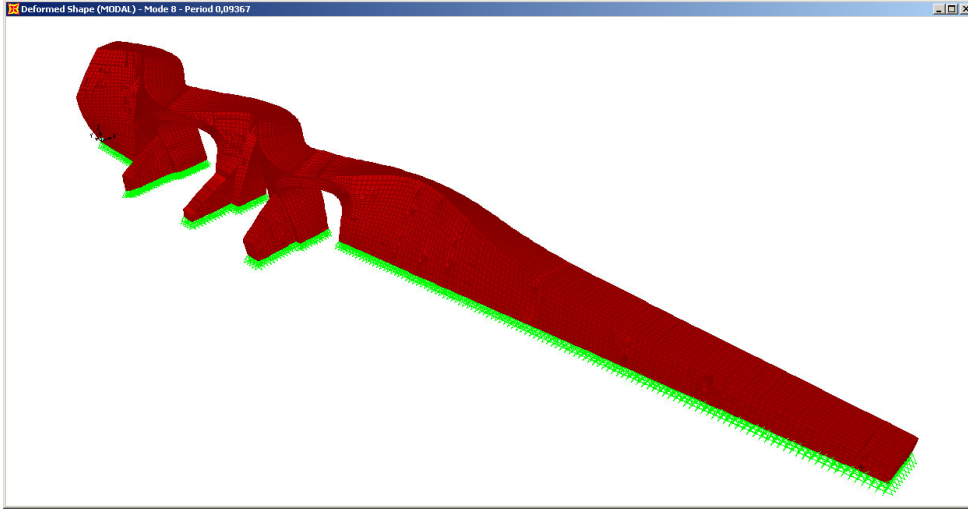
Şekil 6.10. Su kemeri Mod 1



Şekil 6.11. Su kemeri Mod 2, Mod 3 ve Mod 4



Şekil 6.12. Su kemeri Mod 5, Mod 6 ve Mod 7



Şekil 6.13. Su kemeri Mod 8, Mod 9 ve Mod 10

Tablo 6.3’de de görüldüğü üzere deneysel sonuçlar ve ampirik formüller kullanılarak elde edilen malzeme parametrelerinin birbirleri ile hemen hemen uyumlu olduğu gözükmemektedir. Ancak, deneysel ve analitik frekans değerlerini birbirine daha da yaklaştırmak için malzeme parametreleri Tablo 6.4’deki değerlerine getirilerek sonlu elemanlar iyileştirmesi yapılmış ve yapıya ait gerçek malzeme parametreleri elde edilmiştir. İyileştirilen frekanslar ile deneysel frekanslar arasındaki fark %5’den daha küçük bir değerdedir.

Tablo 6.3 . Su kemerinin analitik ve deneysel frekansların karşılaştırılması

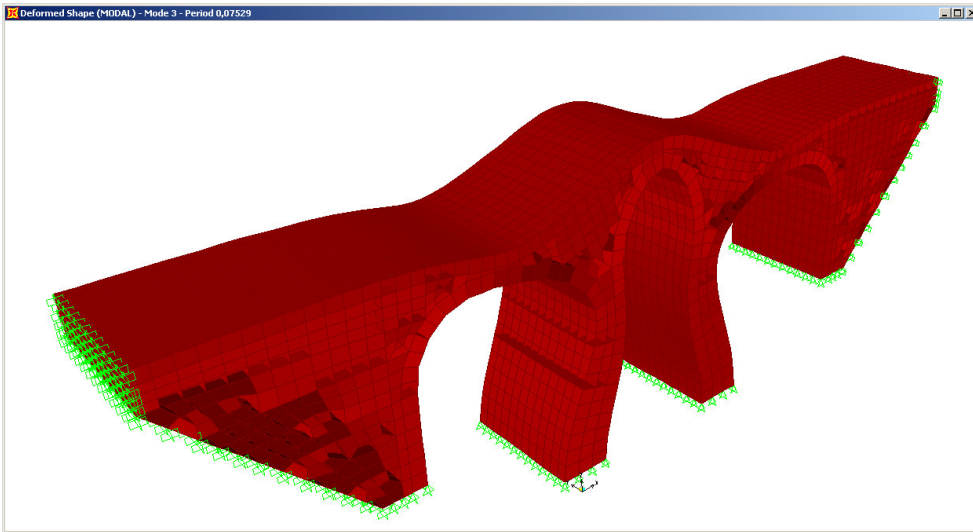
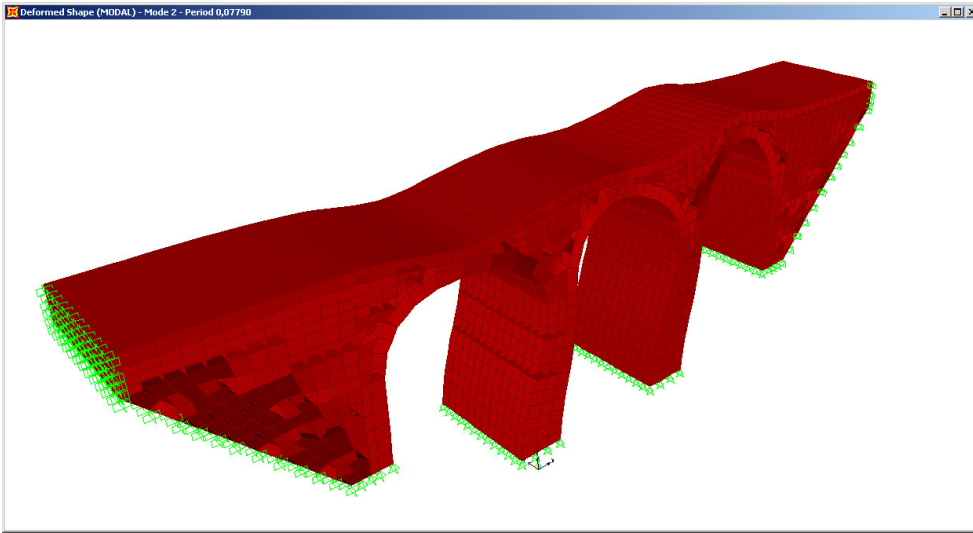
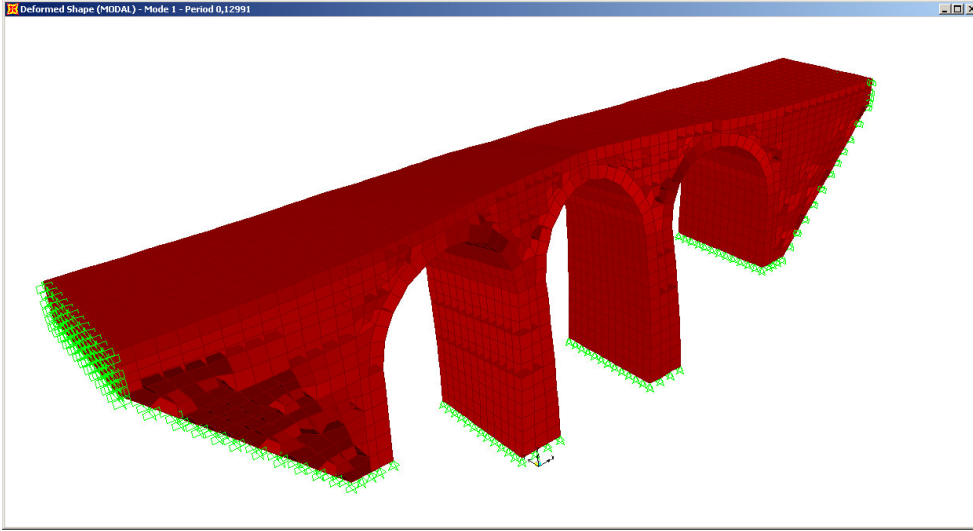
Mod	Analitik Frekans (Hz)	İyileştirilen Analitik Frekans (Hz)	Deneysel Frekans (Hz)
1	2,877	2,77	2,778
2	4,205	4,12	4,542
3	5,555	5,36	5,405
4	5,83	5,72	6,149
5	7,3699	7,11	7,035
6	9,283	8,96	-
7	9,500	9,17	-
8	11,055	10,77	-
9	12,61	11,59	11,57
10	12,78	12,01	-

Tablo 6.4 Su kemerinin sonlu elemanlar iyileştirmesinden sonra elde edilen malzeme parametreleri

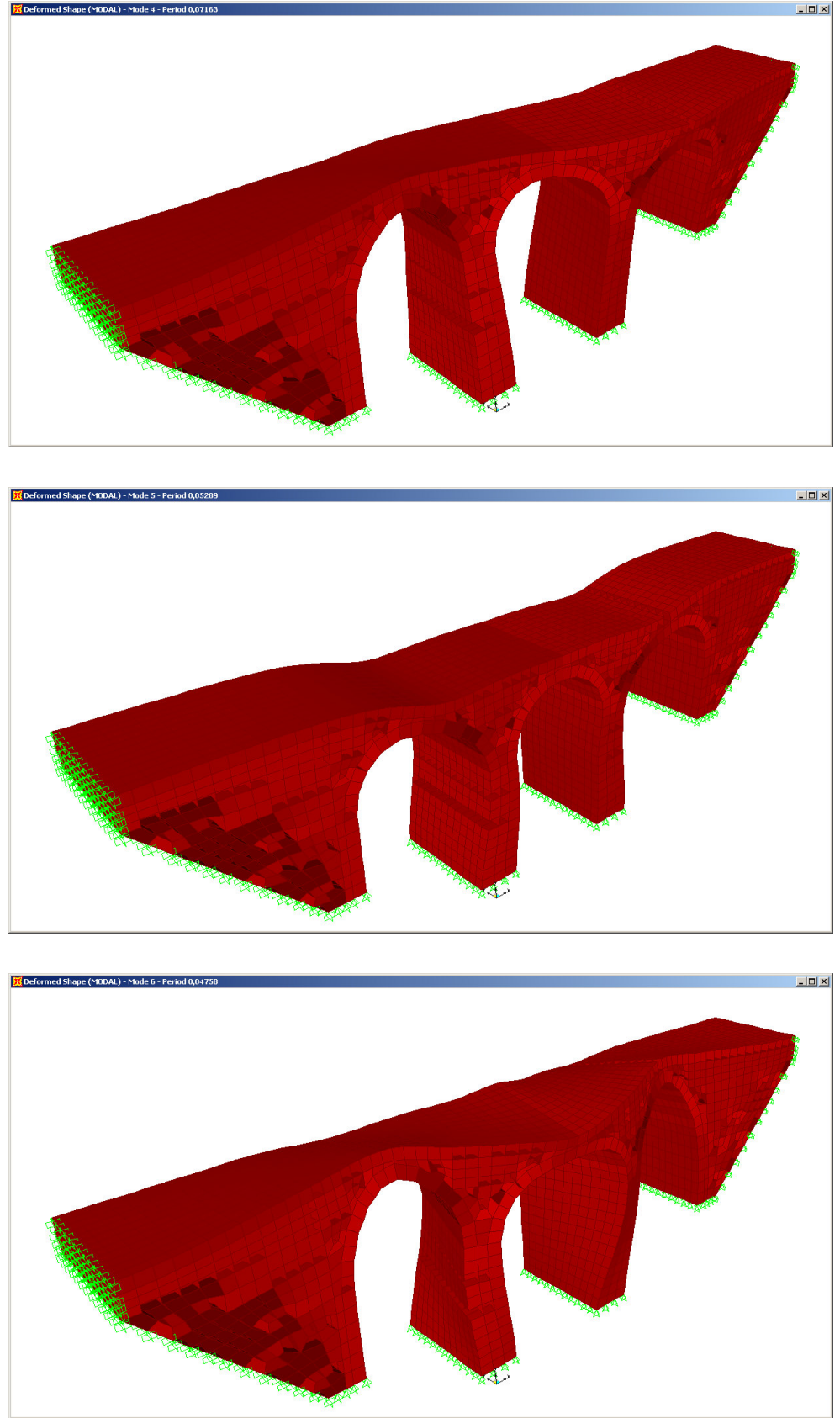
	Yığma Taş	Yığma Tuğla
Basınç Dayanımı (MPa)	11,75	3,68
Çekme Dayanımı (MPa)	1,17	0,37
Elastisite Modülü (MPa)	850	170
Kayma Modülü (MPa)	359	67,8
Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	2150	1750
Poisson oranı	0,17	0,17

6.4.2. Kemer köprü modal analiz ve sonlu elemanlar model iyileştirmesi

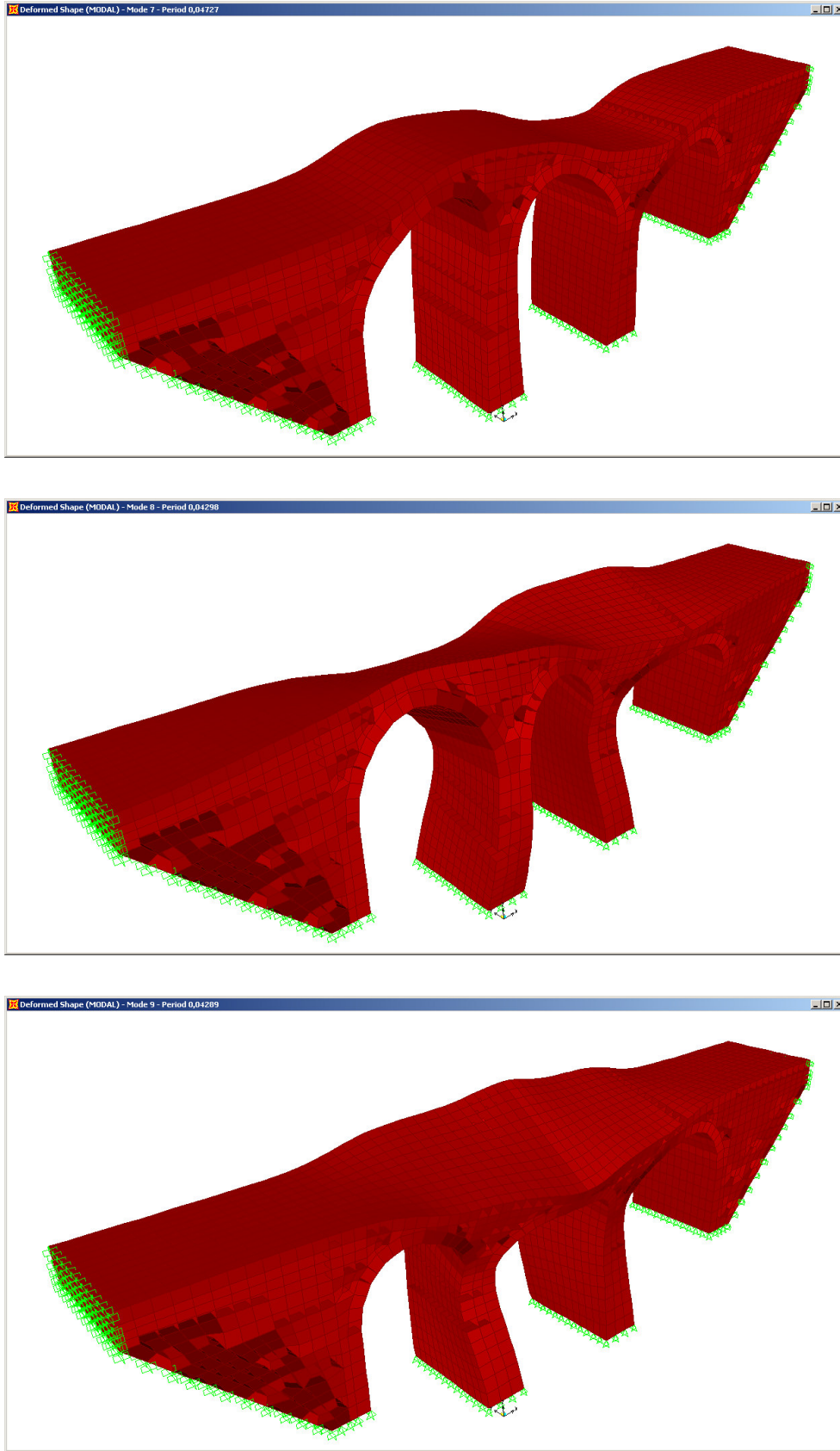
Tablo 6.2’deki malzeme parametreleri kullanılarak SAP 2000 programında yapılan modal analiz sonucu elde edilen ilk 10 moda ait mod şekilleri (Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17) verilmiştir.



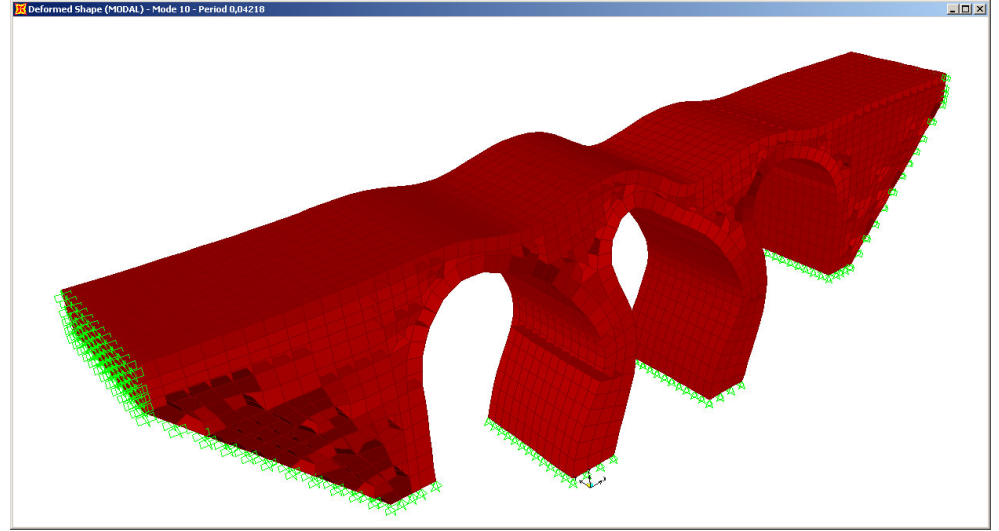
Şekil 6.14. Kemer köprü Mod 1, Mod 2 ve Mod 3 mod şekilleri



Şekil 6.15. Kemer köprü Mod 4, Mod 5 ve Mod 6 mod şekilleri



Şekil 6.16. Kemer köprü Mod 7, Mod 8 ve Mod 9 mod şekilleri



Şekil 6.17. Kemer köprü Mod 10 mod şekli

Tablo 6.5’de de görüldüğü üzere deneysel sonuçlar ve ampirik formüller kullanılarak elde edilen frekans değerlerinin birbirleri ile uyumsuz olduğu gözükmemektedir. Sonlu elemanlar iyileştirmesi yapılarak teorik ve deneysel frekanslar birbirine yakınlştırılmıştır ve Tablo 6.6’da verilen yapıya ait gerçek malzeme parametreleri elde edilmiştir. İyileştirilen frekanslar ile deneysel frekanslar arasındaki fark %5’den daha küçük bir değerdedir.

Tablo 6.5. Köprünün analitik ve deneysel frekansların karşılaştırılması

Mod	Analitik Frekans (Hz)	İyileştirilen Analitik Frekans	Deneysel Frekans
1	4,599	7,506	7,513
2	7,669	12,644	-
3	7,936	12,961	12,86
4	8,341	18,556	18,21
5	11,296	18,650	-
6	12,558	19,019	-
7	12,640	19,156	-
8	12,900	20,012	19,8
9	12,929	23,314	-
10	14,163	23,706	-

Tablo 6.6. Köprünün sonlu elemanlar iyileştirmesinden sonra elde edilen malzeme parametreleri

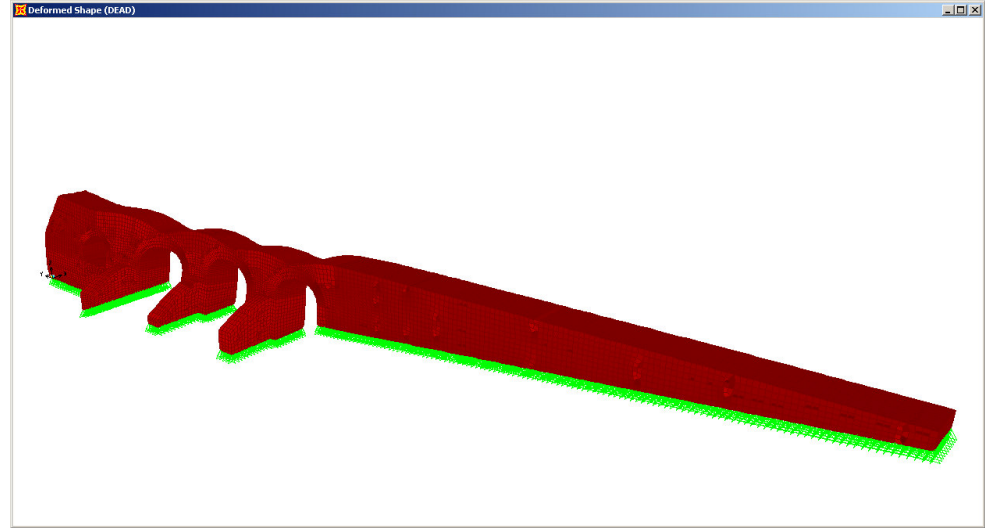
	Yığma Taş	Dolgu Malzemesi	Taş Kemer
Basınç Dayanımı (MPa)	14,36	11,5	10,05
Çekme Dayanımı (MPa)	1,43	1,15	1,01
Elastisite Modülü (MPa)	2950	1475	1600
Kayma Modülü (MPa)	1180	585	640
Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	1900	1700	1750
Poisson oranı	0,17	0,05	0,17

6.5. Yapıların Ölü Yük Altında Analizi

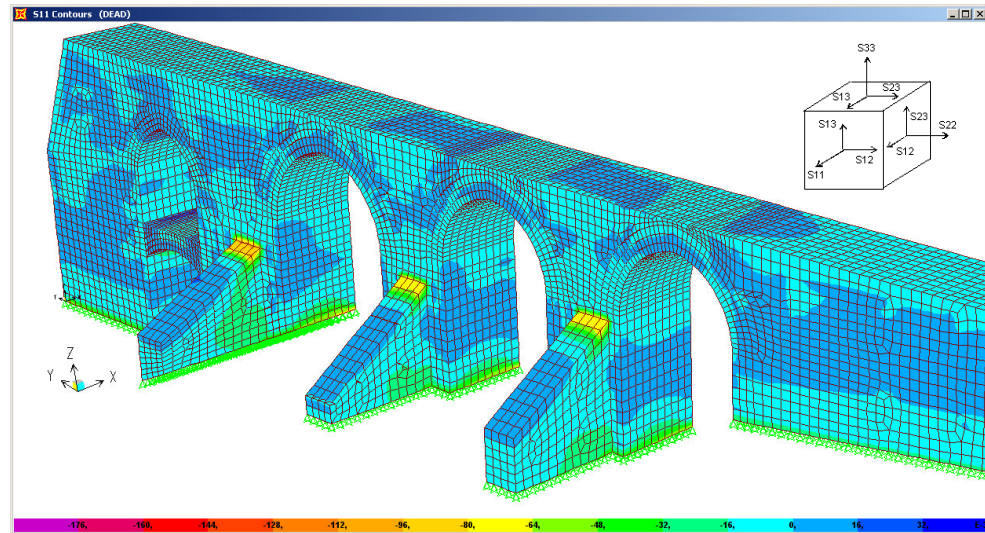
Yapıların güvenilirliği belirlemek için öncelikle ölü yükler altında doğrusal statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ölü yükler altında oluşan gerilmelerin yapılarda oluşmuş yada oluşabilecek çatlaklara ne derece etkisi olduğu saptamada önemli bilgiler verebilmektedir. Ölü yük analizlerinde sonlu elemanlar iyileştirmesi gerçekleştirildikten sonra elde edilen malzeme parametreleri kullanılmıştır. Analizler SAP 2000 bilgisayar programında gerçekleştirilmiştir.

6.5.1. Vezir Su Kemerini ölü yük analizi

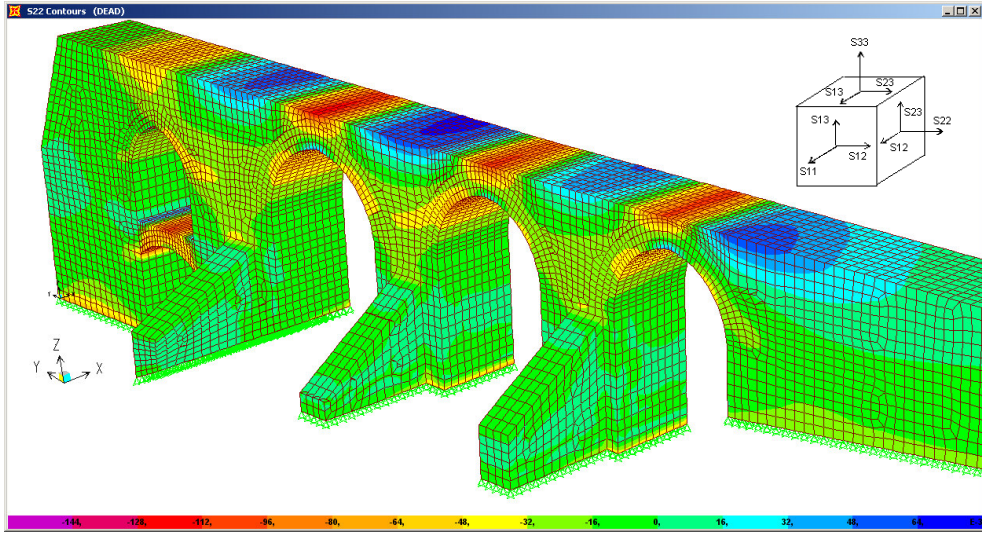
Taşıyıcı sistemde ölü yük analizi sonucunda su kemerinin mevcut haliyle oldukça güvenli olduğu anlaşılmaktadır. Ölü yükler etkisinde meydana gelen deformasyon Şekil 6.18’de sunulmuştur. Su kemerinin yaptığı en büyük düşey deplasman değeri 2,21 mm olarak elde edilmiştir. Su kemerinde meydana gelen S11 gerilmeleri Şekil 6.19’da verilmiştir. Oluşan en büyük basınç ve çekme S11 gerilmeleri sırasıyla -0,181 (basınç) ve 0,035 (çekme) MPa’dır. En büyük basınç ve çekme S22 gerilme değerleri sırasıyla -0,152 (basınç) ve 0,07 (çekme) MPa’dır (Şekil 6.20). En büyük S33 basınç gerilme değeri -0,557 (basınç) MPa’dır (Şekil 6.21). SMaks ve SMin değerleri 0,07 (çekme) ve -0,557 (basınç) olarak elde edilmiştir (Şekil 6.22 ve Şekil 6.23). Bu değerler Tablo 6.4’de sunulan su kemerine ait en büyük çekme ve basınç emniyet gerilemelerinden oldukça küçüktür. Sonuç olarak su kemeri ölü yükler altında oldukça yüksek bir emniyete sahiptir.



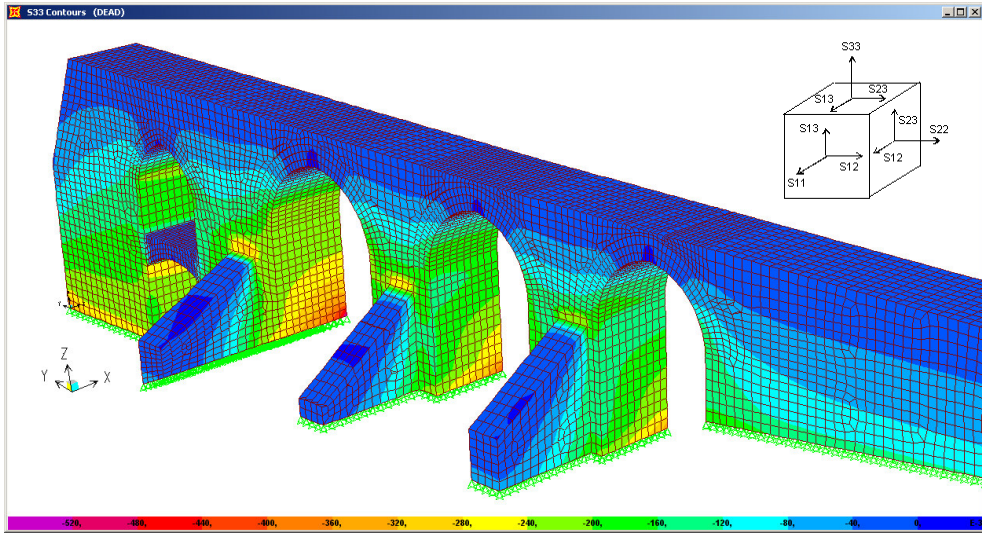
Şekil 6.18. Su kemerinin ölü yük altında yaptığı deformasyon



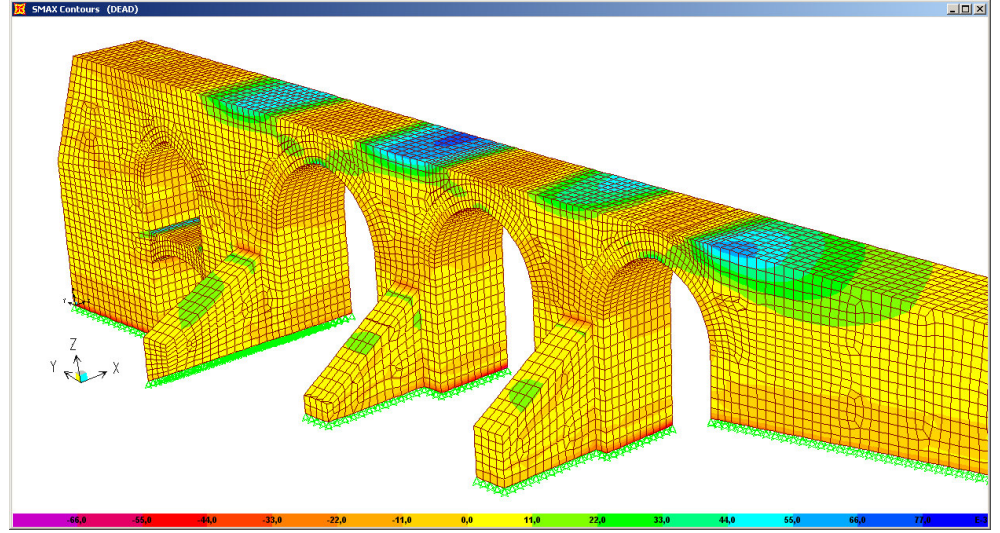
Şekil 6.19. Su kemeri ölü yük altında S11 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



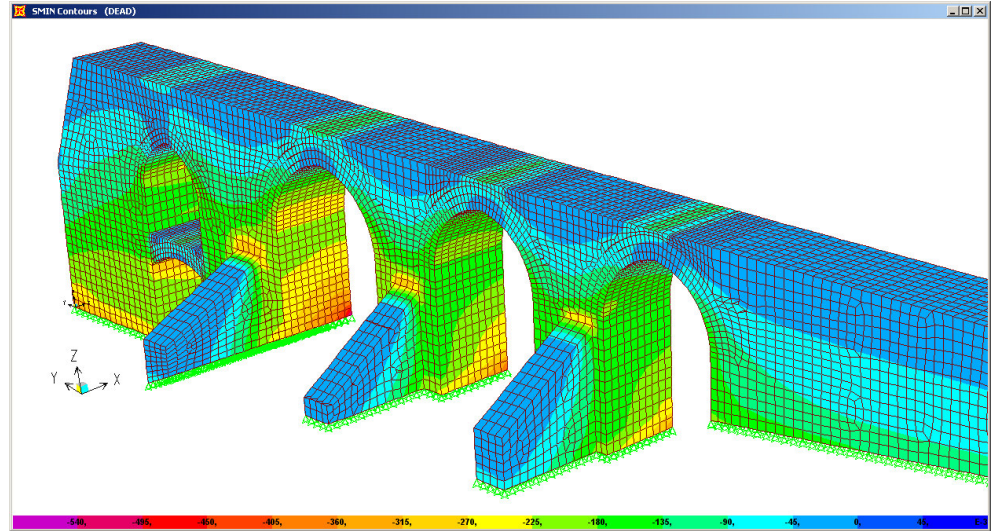
Şekil 6.20. Su kemeri ölü yük altında S22 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



Şekil 6.21. Su kemeri ölü yük altında S33 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



Şekil 6.22. Su kemeri ölü yük altında SMaks gerilmeleri (10^{-3} MPa)

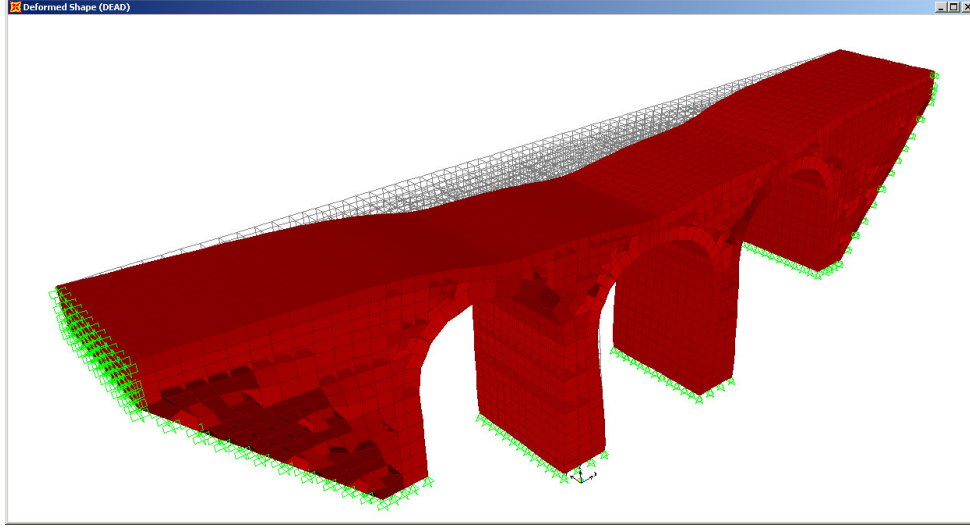


Şekil 6.23. Su kemeri ölü yük altında SMin gerilmeleri (10^{-3} MPa)

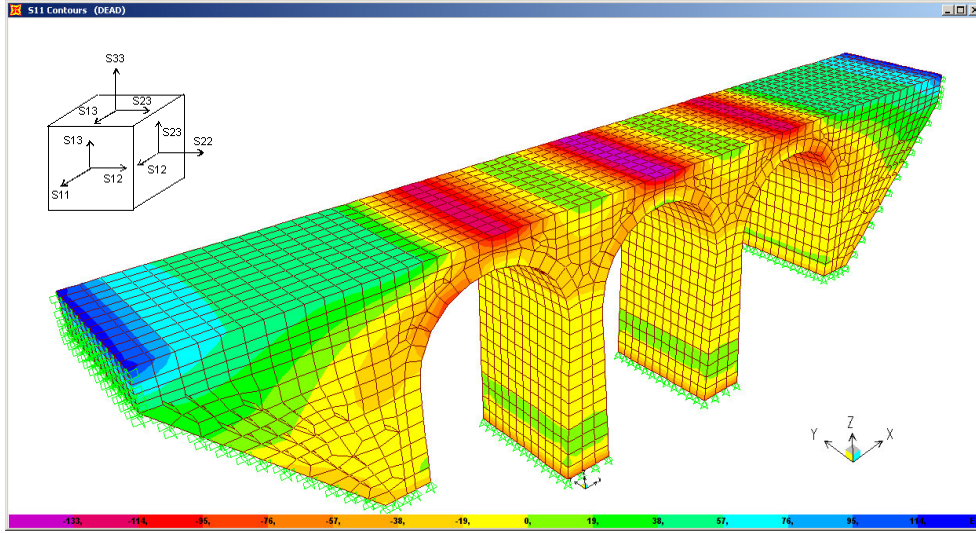
6.5.2. Kemer köprü ölü yük analizi

Kemer köprü'nün ölü yük analizi sonucu köprü'nün oldukça güvenli olduğu ortaya çıkmıştır. Ölü yükler altında kemer köprü'nün yaptığı deformasyon Şekil 6.24'de verilmiştir. En büyük düşey deplasman değeri 2,57 mm olarak elde edilmiştir. Köprü'nün ölü yükler altında en büyük basınç ve çekme S11 gerilme değerleri sırasıyla -0,142 (basınç) ve 0,114 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.25). En büyük basınç ve çekme S22 gerilme değerleri sırasıyla -0,07 (basınç) ve 0,02

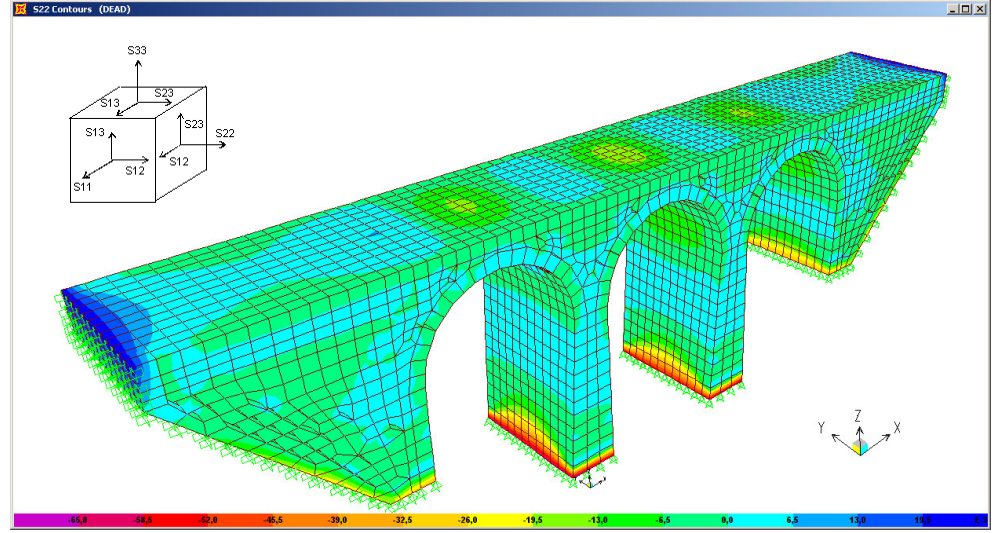
(çekme) MPa'dır (Şekil 6.26). En büyük basınç S33 gerilme değerleri sırasıyla -0,365 (basınç) MPa'dır (Şekil 6.27). Bu değerler Tablo 6.6'da sunulan köprüye ait en büyük çekme ve basınç emniyet gerilemelerinin altındadır. Sonuç olarak köprü ölü yükler altında oldukça yüksek emniyetli bir taşıyıcı sisteme sahiptir.



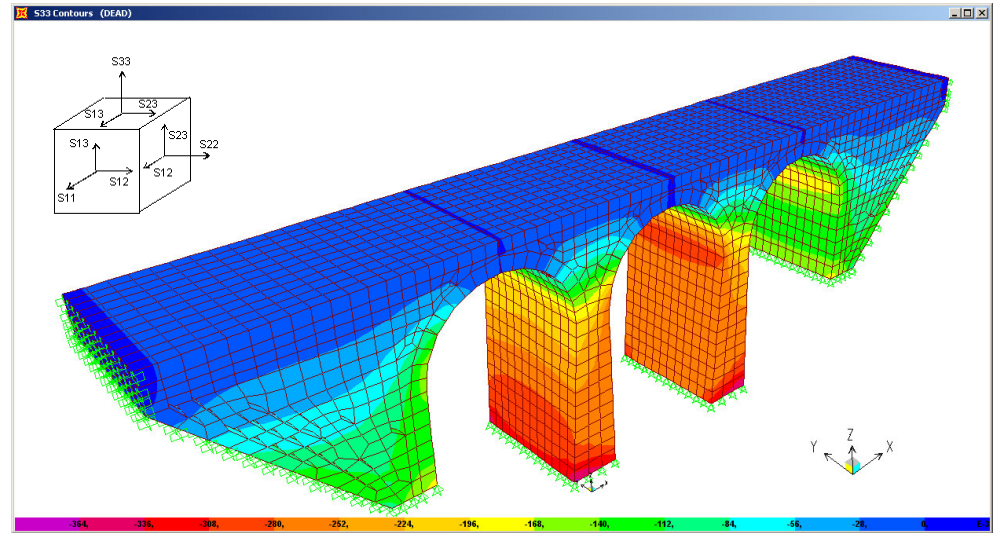
Şekil 6.24. Köprünün ölü yük altında yaptığı deformasyon



Şekil 6.25. Köprünün ölü yük altında S11 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



Şekil 6.26. Köprünün ölü yük altında S22 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



Şekil 6.27. Köprünün ölü yük altında S 33 gerilmeleri (10^{-3} MPa)

6.6. Yapıların Davranış Spektrumu Analizi

Davranış spektrumu analizleri, yapıların bulunduğu yerel zemin sınıfı ve deprem bölgesi ile mikrotremor ölçümler sonucu elde edilen deneysel zemin hakim periyotları ve OMA sonucu bulunan sönüm oranları göz önüne alınarak Türkiye Deprem Yönetmeliğinde (DBYBHY, 2007) tanımlanan uyum kriterlerine uygun olarak yapılmıştır. Spektrum eğrisi aşağıdaki denklem ile tanımlanmıştır.

$$A(T) = A_0 I S(T) \quad 6.27$$

$$S_{ae}(T) = A(T) g \quad 6.28$$

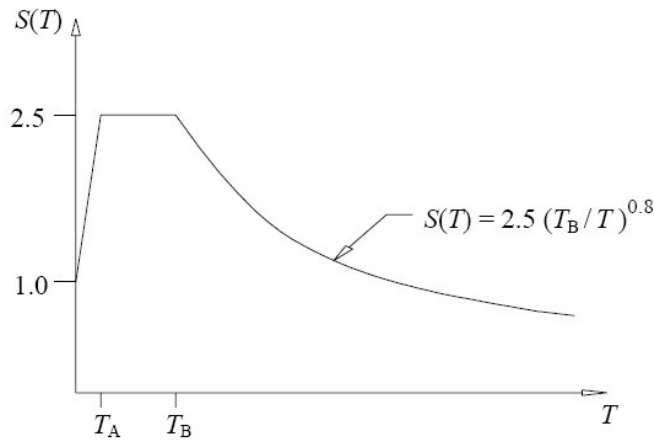
Burada $A(T)$ spektral ivme katsayısı, A_0 etkin yer ivme katsayısı, I bina önem katsayısı ve $S(T)$ spektrum katsayısıdır. $S(T)$ aşağıdaki denklemlerden elde edilir (Şekil 6.28).

$$S(T) = 1 + 1,5T / T_A \quad (0 \leq T \leq T_A) \quad 6.29$$

$$S(T) = 2,5 \quad (T_A \leq T \leq T_B) \quad 6.30$$

$$S(T) = 2,5(T_B / T)^{0,8} \quad (T_A \leq T \leq T_B) \quad 6.31$$

Burada T , yapının doğal titreşim periyodu, T_A ve T_B yerel zemin sınıfına bağlı zemin hakim periyotlarıdır.



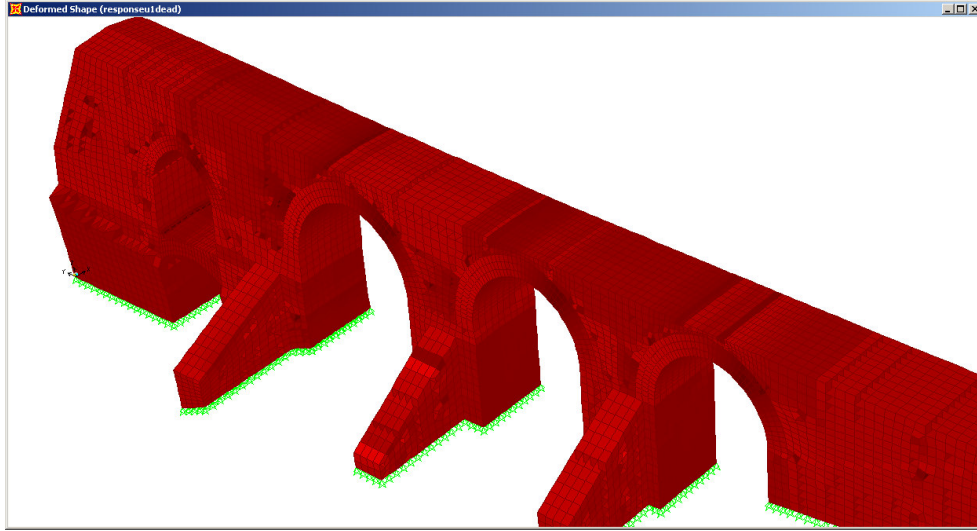
Şekil 6.28. Spektrum katsayısı (DBYBHY, 2007)

Yapılar için bina önem katsayısı $I = 1$ alınmıştır (DBYBHY, 2007), T_A ve T_B yerel zemin sınıfına bağlı zemin hakim periyot değerleri için mikrotremor testleri sonucunda elde edilen veriler kullanılmıştır. Yapıların modlarına ait sönüm oranları için OMA testleri sonucundan elde edilen veriler kullanılmıştır. Davranış spektrumu analizleri için tam karesel birleştirme (CQC, Complete Quadratic Combination) metodu kullanılmıştır.

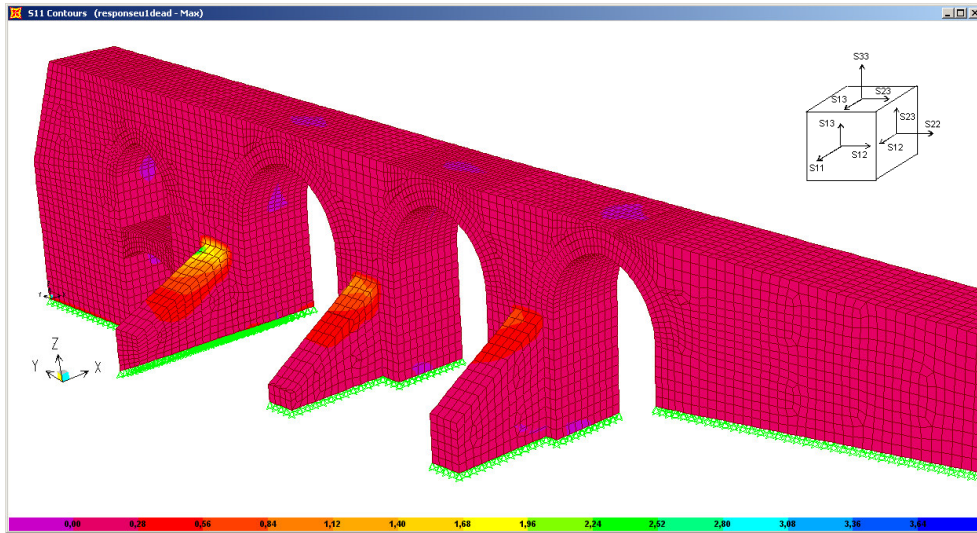
6.6.1. Vezir Su Kemerinin davranış spektrumu analizi

Bölüm 5.5'te Vezir Su Kemerinin bulunduğu bölgedeki hakim periyot 0.5 saniye ile 1.2 saniye aralığında olduğu mikrotremor ölçüm sonuçları ile tespit edilmişti. Z2 zemin sınıfı olan bölgede T_A ve T_B yerel zemin sınıfına bağlı zemin hakim periyotları 0,15 ve 0,60 saniyedir. Yönetmelik gereği T_A 0,15'den fazla olamaz T_B ise 0,60'dan az olamaz (DBYBHY, 2007). Sonuç olarak T_A ve T_B değerleri 0,15 ve 1,2 seçilmiştir. SAP2000 programında Şekil 6.28'deki ivme spektrumu T_A ve T_B değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Davranış spektrumu analizi X ve Y doğrultularında ayrı ayrı yapılmıştır.

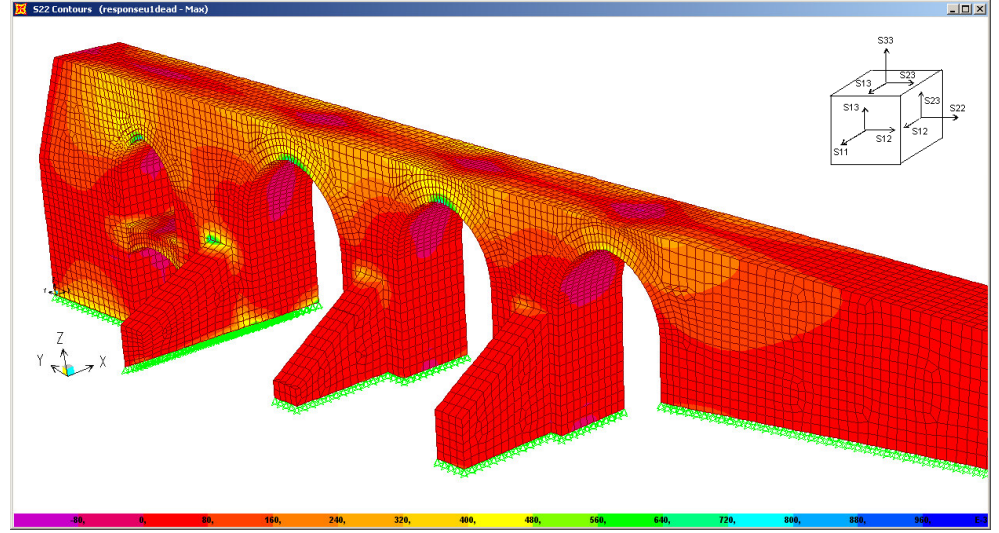
X yönündeki spektral etki sonucunda meydana gelen deformasyon Şekil 6.29'da sunulmuştur. Tablo 6.4'de sunulan su kemerine ait en büyük çekme ve basınç emniyet gerilmeleri dikkate alınarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir: Su kemerinde meydana gelen en büyük çekme S11 gerilme değeri 3,826 MPa'dır. Bu gerilmeler payandalarda meydana gelmektedir. Kemer bölgelerinde oluşan gerilmelerin çok düşük seviyede kaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.30). Bunun sebebi su kemerinin yıkık olmasıdır. En büyük basınç ve çekme S22 gerilme değerleri sırasıyla -0,138 (basınç) ve 0,986 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.31). En büyük basınç ve çekme S33 gerilme değerleri sırasıyla -0,30 (basınç) ve 2,95 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.32). Oluşan bu en büyük S33 çekme gerilmesi yine yapının payanda ve temel kısmında meydana gelmektedir. Sonuç olarak, X doğrultusunda oluşturulan spektral etki sonucu yapının temel ve payandalar kısımlarında çatlaklar meydana gelebilir ancak yapının göçmesi söz konusu değildir.



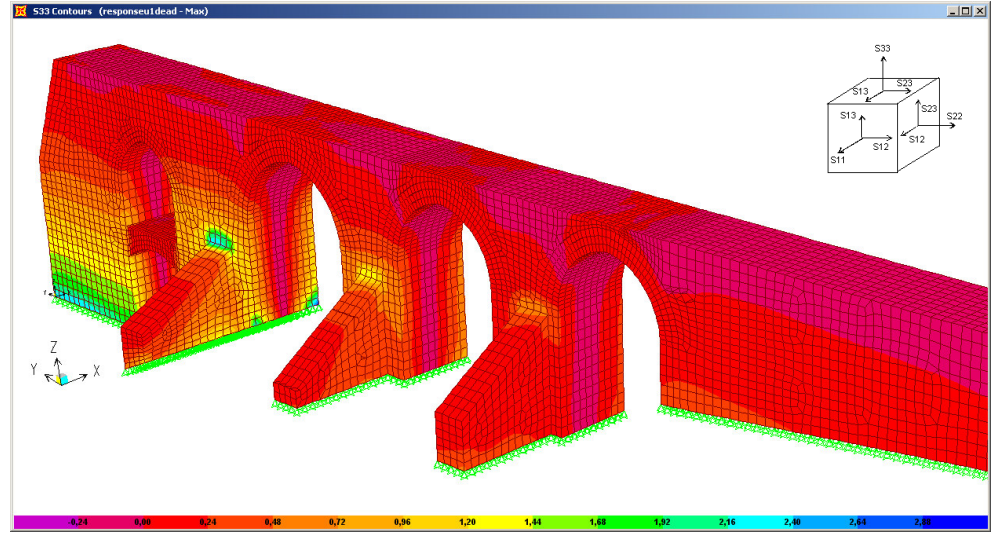
Şekil 6.29. Su kemeri X yönündeki spektral etki sonucu oluşan deformasyon



Şekil 6.30. Su kemeri X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S11 gerilmeleri (MPa)



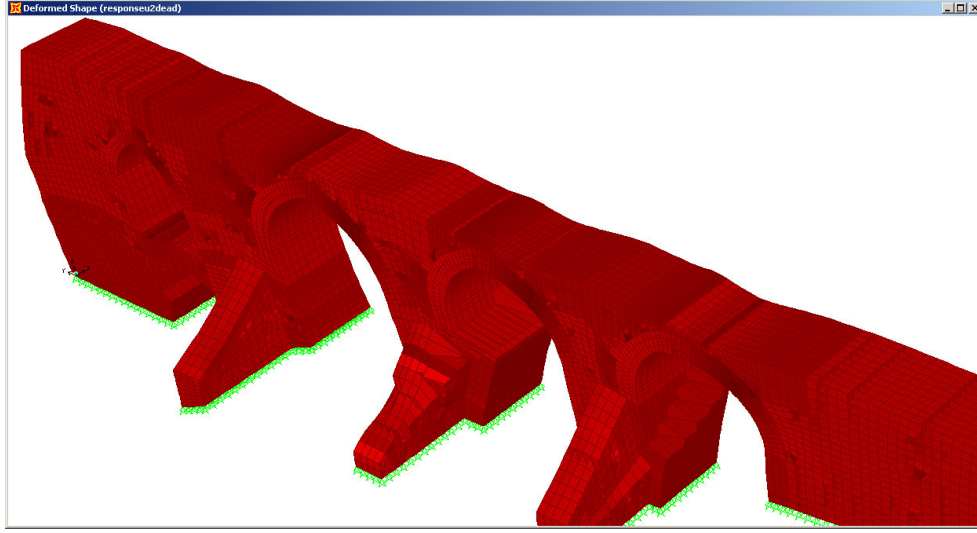
Şekil 6.31. Su kemeri X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S22 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



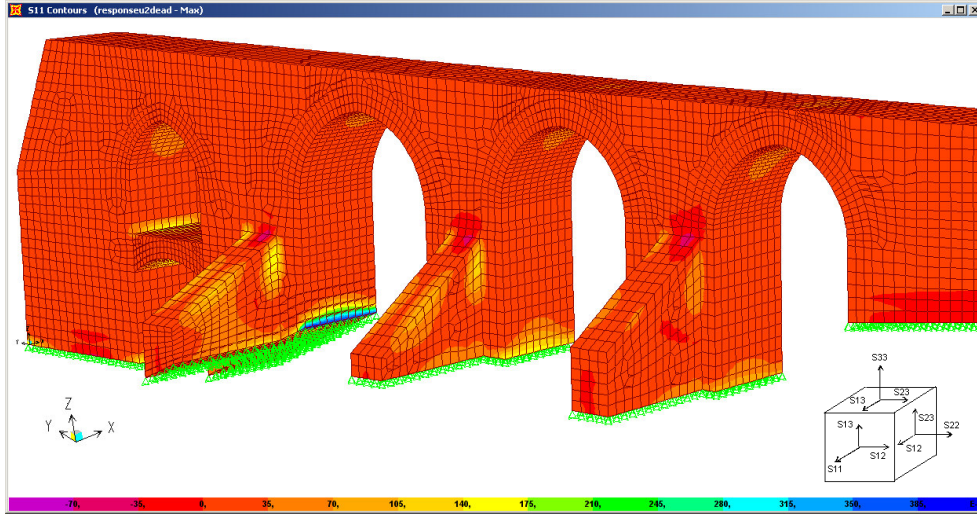
Şekil 6.32. Su kemeri X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S33 gerilmeleri (MPa)

Y yönündeki spektral etki sonucunda meydana gelen deformasyon Şekil 6.33'de sunulmuştur. Tablo 6.4'de sunulan su kemerine ait en büyük çekme ve basınç emniyet gerilmeleri dikkate alınarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir: Su kemerinde meydana gelen en büyük basınç ve çekme S11 gerilme değerleri sırasıyla -0,80 (basınç) ve 0,398 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.34). En büyük çekme S22 gerilme değeri 1,48 MPa'dır (Şekil 6.35). Bu çekme gerilmesi emniyet çekme gerilmesinden büyüktür. Üst üste bulunan kemerlerden altta olanın duvar ile kesiştiği bölgede oluşan bu çekme gerilmesi yapıda da bir çatlağa sebep olabilir

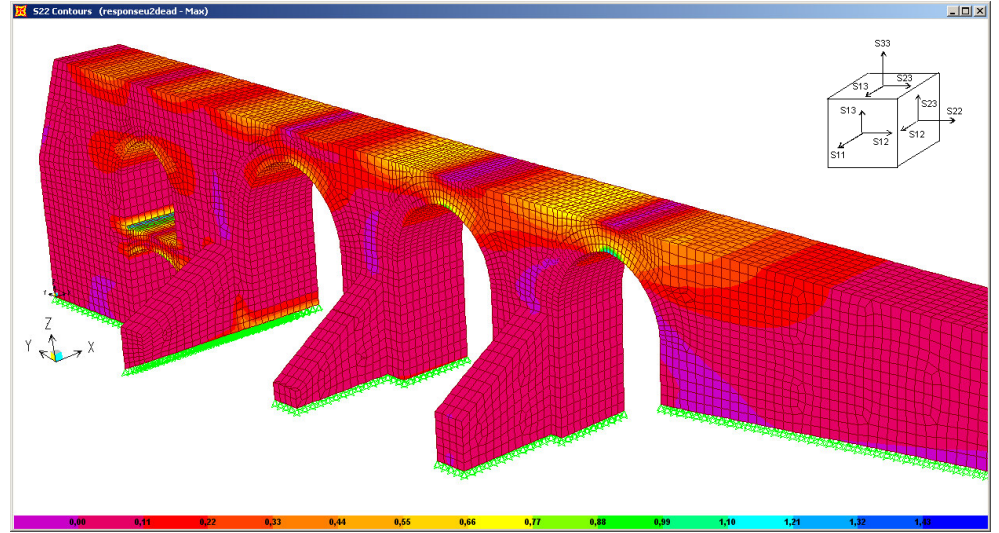
ve o bölgede gerçekten bir çatlak saptanmıştır (Şekil 6.36). En büyük basınç ve çekme S33 gerilme değerleri sırasıyla -0,40 (basınç) ve 1,92 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.37). Oluşan bu en büyük S33 çekme gerilmesi emniyet değerinden yüksektir ancak yapının temel kısmında meydana gelmektedir. Sonuç olarak, Y doğrultusunda oluşturan spektral etki yapının temel ve payandalar kısımlarında çatlaklar meydana getirebilir ancak yapının göçmesi söz konusu değildir.



Şekil 6.33. Su kemeri Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan deformasyon



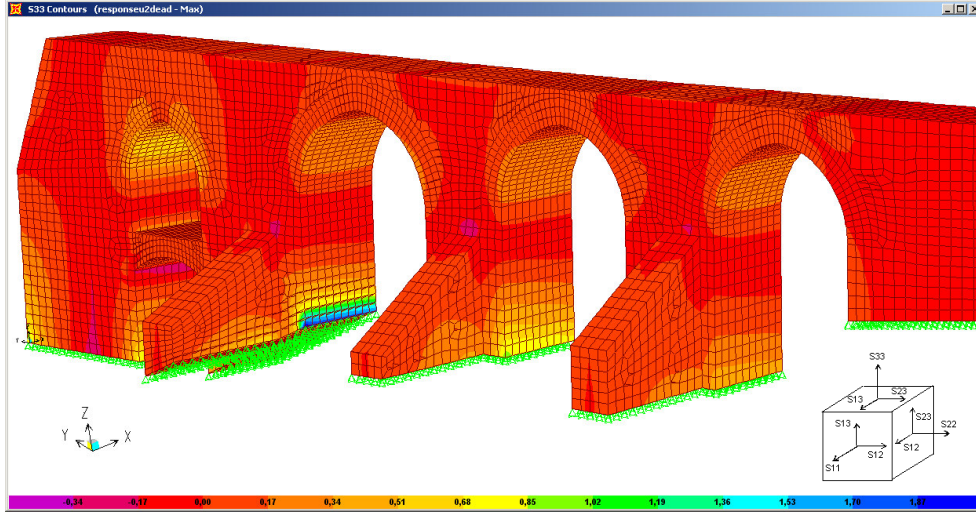
Şekil 6.34. Su kemeri Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S11 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



Şekil 6.35. Su kemeri Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S22 gerilmeleri (MPa)



Şekil 6.36. Su kemeri duvar-kemer birleşim yerindeki mevcut çatlak



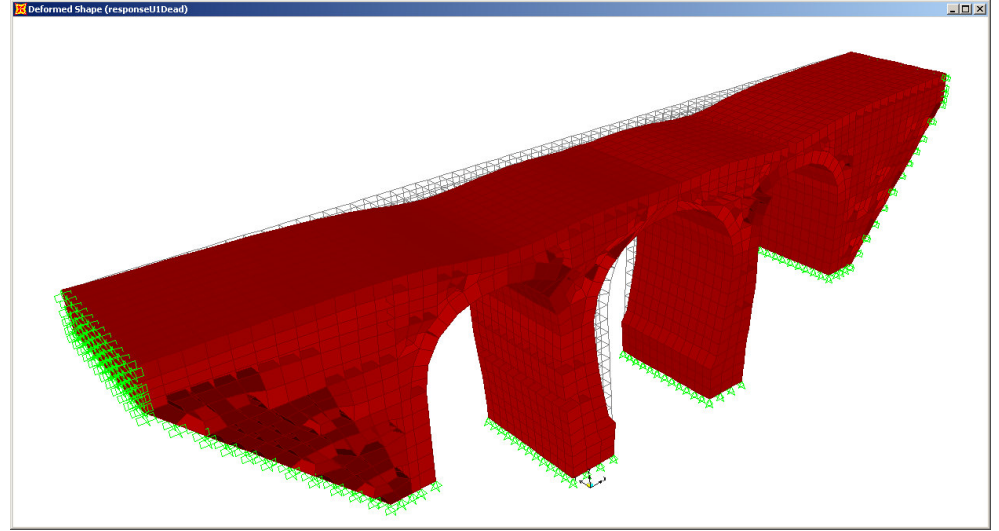
Şekil 6.37. Su kemeri Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S33 gerilmeleri (MPa)

Sonuç olarak su kemeri her iki yönde yapılan davranış spektrum analize göre güvenlidir.

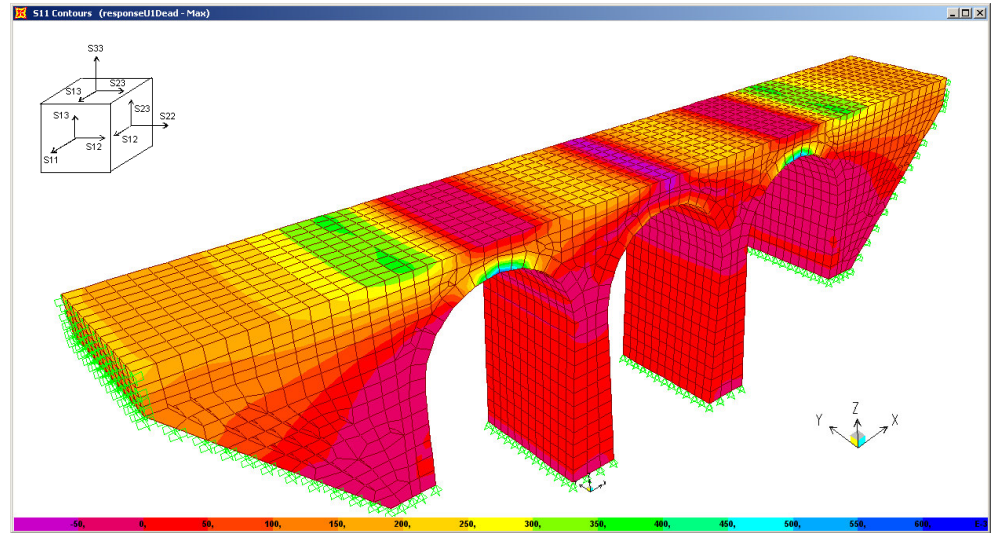
6.6.2. Zeytinler Köprüsü davranış spektrumu analizi

Bölüm 5.5'te Zeytinler bölgesine ait hakim periyot 0.28 ile 0.45 saniye aralığında olduğu mikrotremor ölçüm sonuçları ile tespit edilmişti. Z2 zemin sınıfı olan bölgede T_A ve T_B yerel zemin sınıfına bağlı zemin hakim periyotları 0,15 ve 0,40 saniyedir. Yönetmelik gereği T_A 0.15'den fazla olamaz T_B ise 0,40'dan az olamaz (DBYBHY, 2007). Sonuç olarak T_A ve T_B değerleri 0,15 ve 0,45 seçilmiştir. SAP2000 programında Şekil 6.28'deki ivme spektrumu T_A ve T_B değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Davranış spektrumu analizi X ve Y doğrultularında ayrı ayrı yapılmıştır.

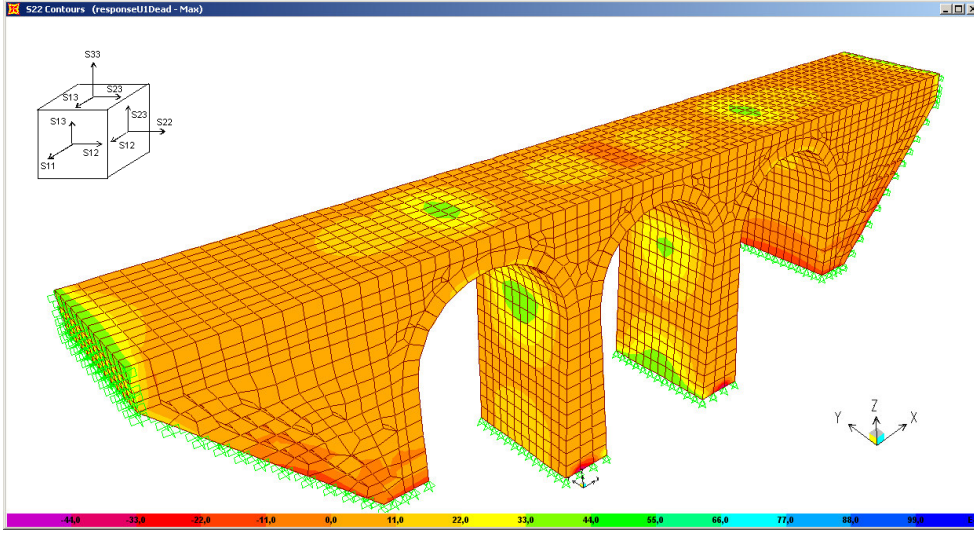
Köprüde X yönündeki spektral etki sonucunda meydana gelen deformasyon Şekil 6.38'de sunulmuştur. Yapıda maksimum 1,57 mm deplasman meydana gelmiştir. Tablo 6.6'da sunulan köprüye ait en büyük çekme ve basınç emniyet gerilmeleri dikkate alınarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir: Su kemerinde meydana gelen en büyük basınç ve çekme S11 gerilme değerleri sırasıyla -0,052 (basınç) ve 0,62 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.39). En büyük çekme ve basınç S22 gerilme değerleri sırasıyla -0,048 (basınç) ve 0,103 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.40). En büyük basınç ve çekme S33 gerilme değerleri sırasıyla -0,250 (basınç) ve 0,22 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.41). Köprüde X yönünde spektral etki sonucu oluşan gerilmeler düşük seviyededir ve yapının göçmesi söz konusu değildir.



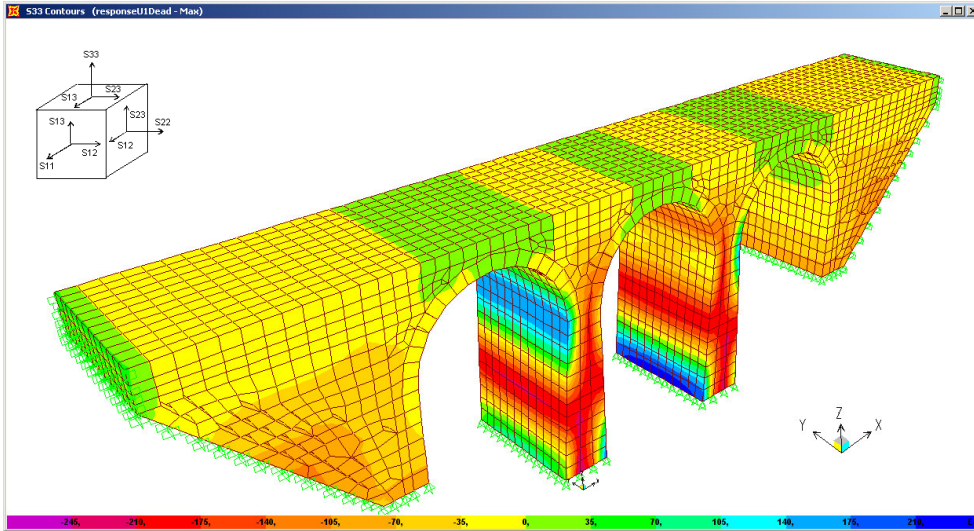
Şekil 6.38. Köprü X yönündeki spektral etki sonucu oluşan deformasyon



Şekil 6.39. Köprü X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S11 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



Şekil 6.40. Köprü X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S22 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



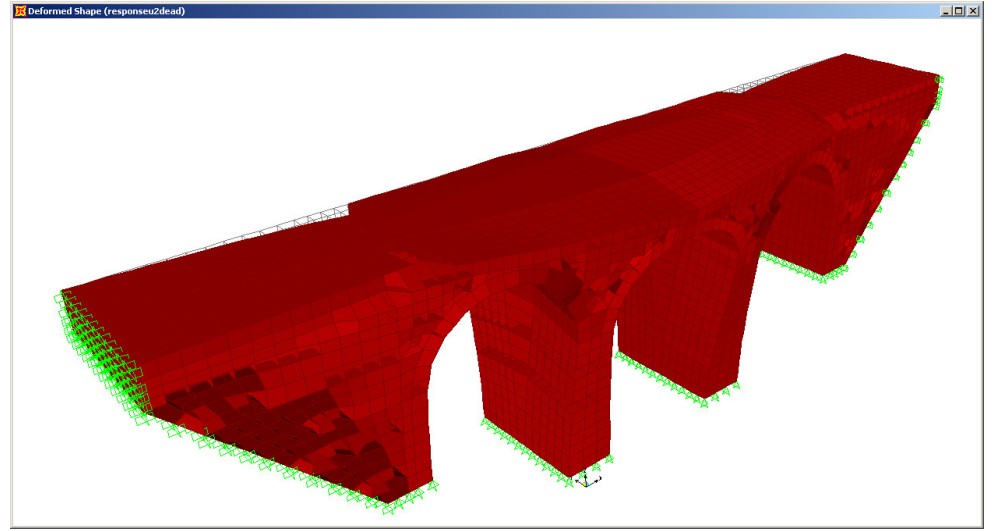
Şekil 6.41. Köprü X yönündeki spektral etki sonucu oluşan S33 gerilmeleri (10^{-3} MPa)

Y yönündeki spektral etki sonucu deformasyon Şekil 6.42’de verilmiştir. Y doğrultusunda oluşturulan spektral etki sonucu yapı maksimum 6,32 mm deplasman yapmıştır. Tablo 6.6’da sunulan köprüye ait en büyük çekme ve basınç emniyet gerilmeleri dikkate alınarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir. Su kemerinde meydana gelen en büyük basınç ve çekme S11 gerilme değerleri sırasıyla -0,15 (basınç) ve 1,36 (çekme) MPa’dır (Şekil 6.43). Orta kemerinin açıklık bölgesinde oluşan S11 çekme gerilmesi 1,347 MPa’dır ve bu değer taş kemerin 1,01 MPa olan maksimum çekme gerilmesinden büyüktür. Bu durum kemerde bir çatlağa yol açabilir. En büyük çekme ve basınç S22 gerilme değerleri sırasıyla -0,042 (basınç) ve 0,135 (çekme) MPa’dır (Şekil 6.44). En büyük basınç

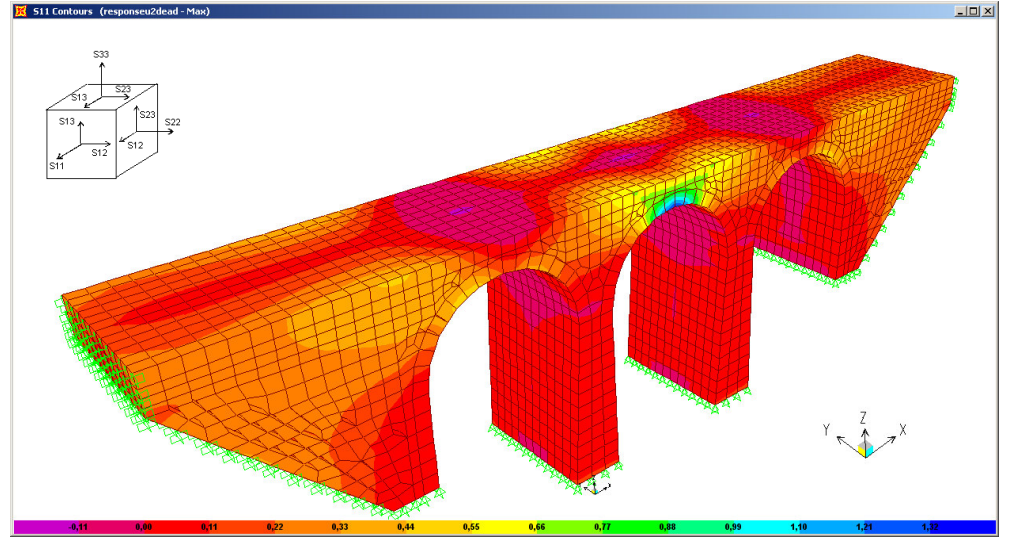
ve çekme S33 gerilme değerleri sırasıyla -0,251 (basınç) ve 0,85 (çekme) MPa'dır (Şekil 6.45).

Köprüde Y yönünde spektral etki sonucu orta kemerin açıklık bölgesinde çatlaklara sebep olabilir ancak yapının göçmesi söz konusu değildir.

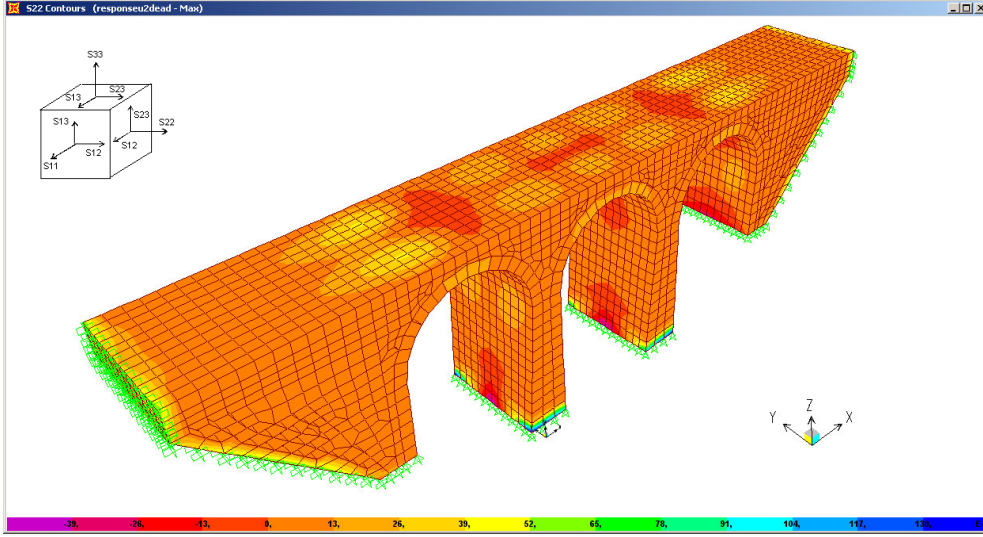
Sonuç olarak köprü her iki yönde yapılan davranış spektrum analize göre güvenlidir.



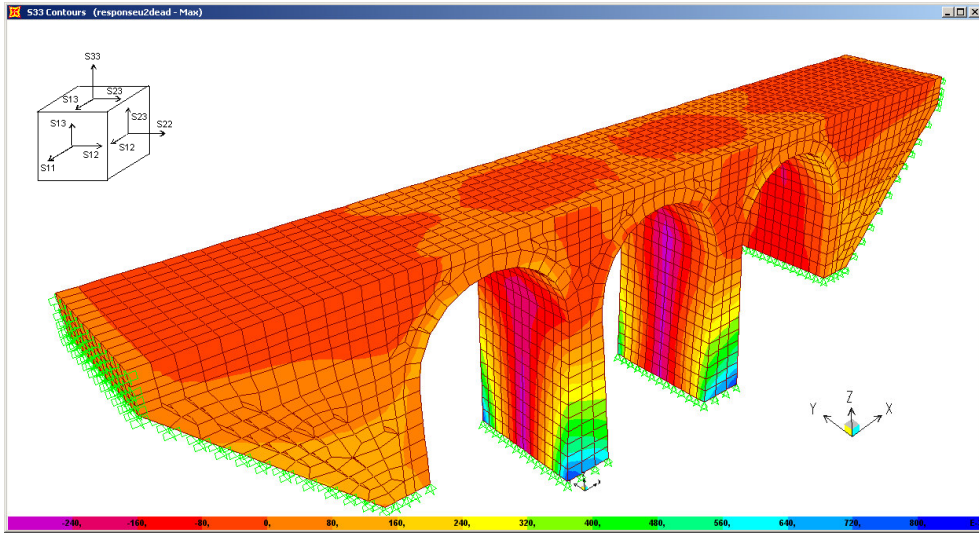
Şekil 6.42. Köprü Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan deformasyon



Şekil 6.43. Köprü Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S11 gerilmeleri (MPa)



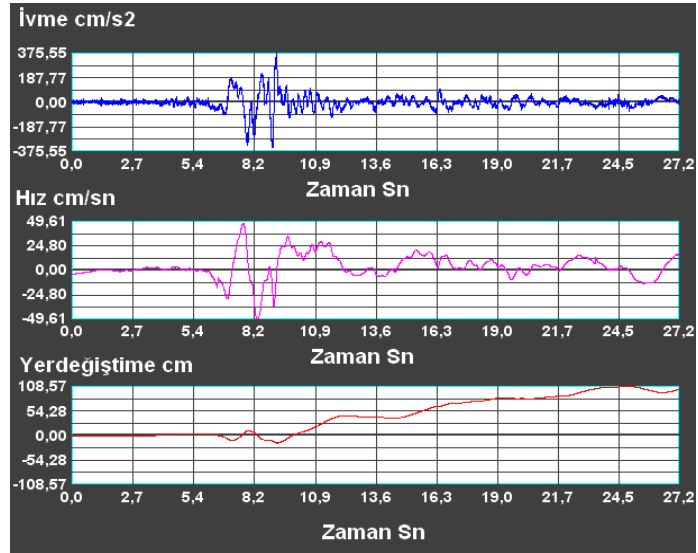
Şekil 6.44. Köprü Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S22 gerilmeleri (10^{-3} MPa)



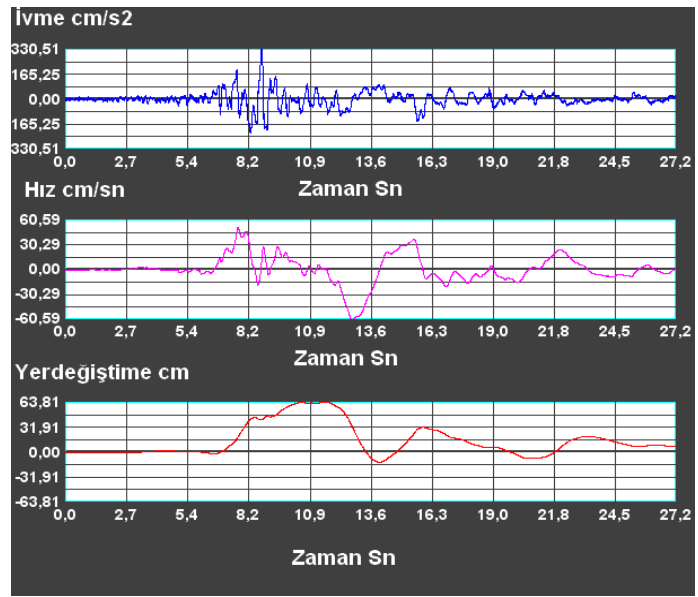
Şekil 6.45. Köprü Y yönündeki spektral etki sonucu oluşan S33 gerilmeleri (10^{-3} MPa)

6.7.Yapıların Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analizi

Yapıların deprem etkisi altındaki davranışını belirlemek için yapı zaman tanım alanında 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Düzce ivme kaydı (Şekil 6.46 ve Şekil 6.47) kullanılarak çözümlenmiştir.



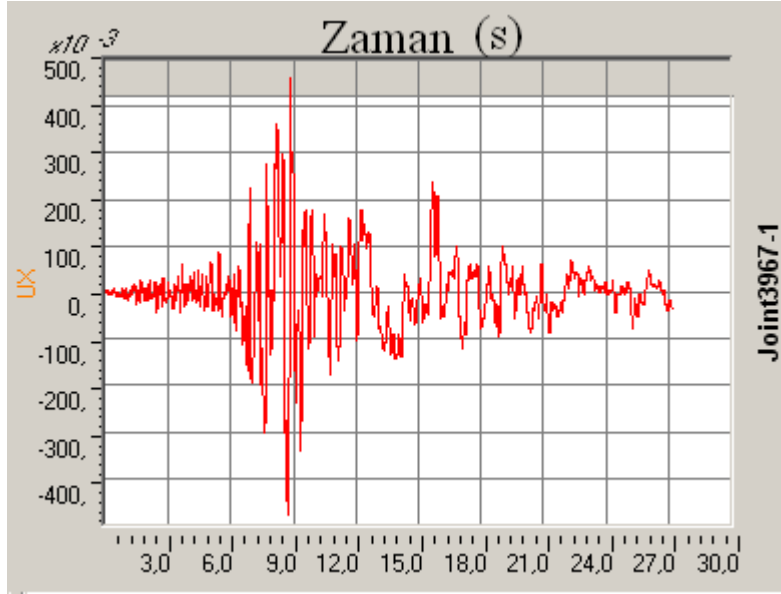
Şekil 6.46 .17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Düzce Doğu-Batı bileşeni kaydı



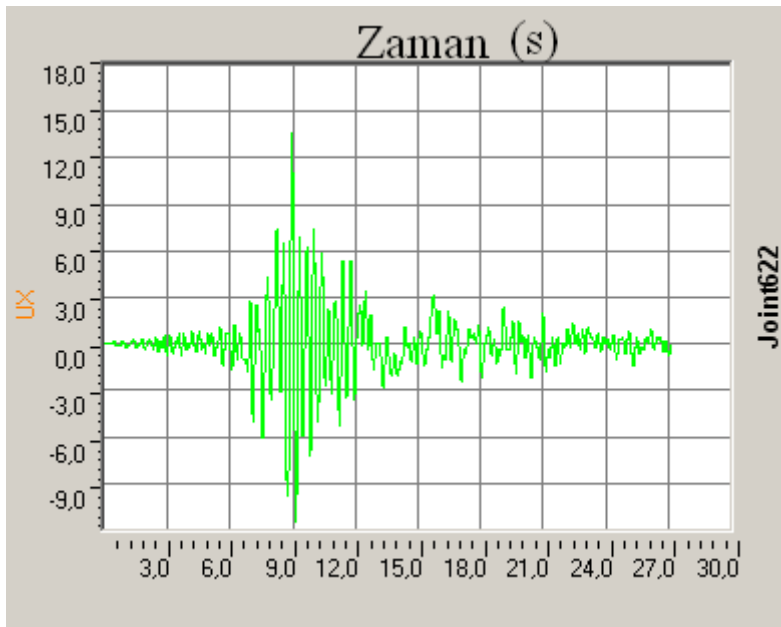
Şekil 6.47. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Düzce Kuzey-Güney bileşeni kaydı

Su kemeri ikinci kemerinin kilit taşları bölgesinde oluşan X yönü deplasman-zaman grafiği Şekil 6.48’de verilmiştir. Şekil 6.49’da ikinci kemerin çatlak olan bölgesine ait X yönü deplasman-zaman grafiği sunulmuştur. Çatlak bölgesinde 13 mm’lik deplasman analiz sonucu ortaya çıkmıştır bu da kemerde mevcut çatlakların deprem nedeniyle meydana gelmiş olabileceğini göstermektedir. Kemerlerin kilit taşlarının bulunduğu bölgedeki S11 gerilme

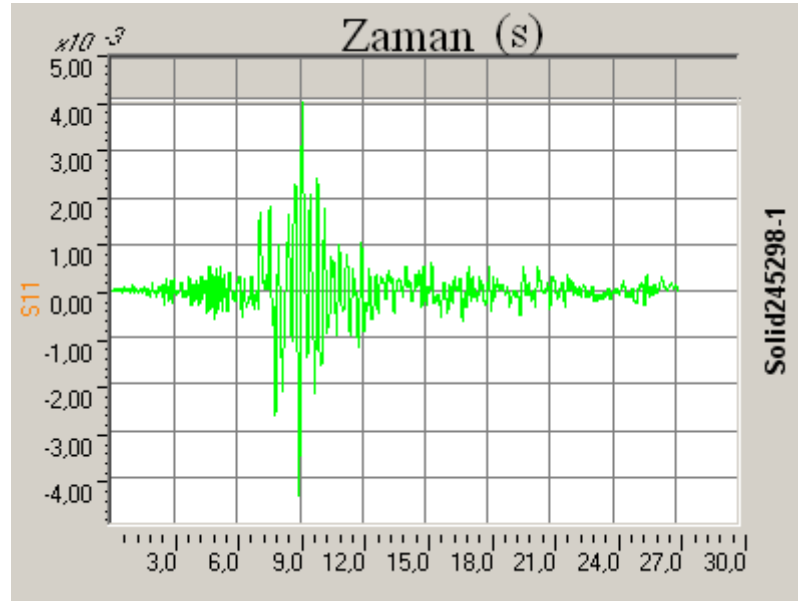
değişimi Şekil 6.50’de, S22 gerilme değişimi Şekil 6.51’de ve S33 gerilme değişimi Şekil 6.52’de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere oluşan gerilmeler oldukça düşük seviyededir. Olası bir depremde yapının yıkılmayacağı ve büyük bir hasar almayacağı tahmin edilmektedir.



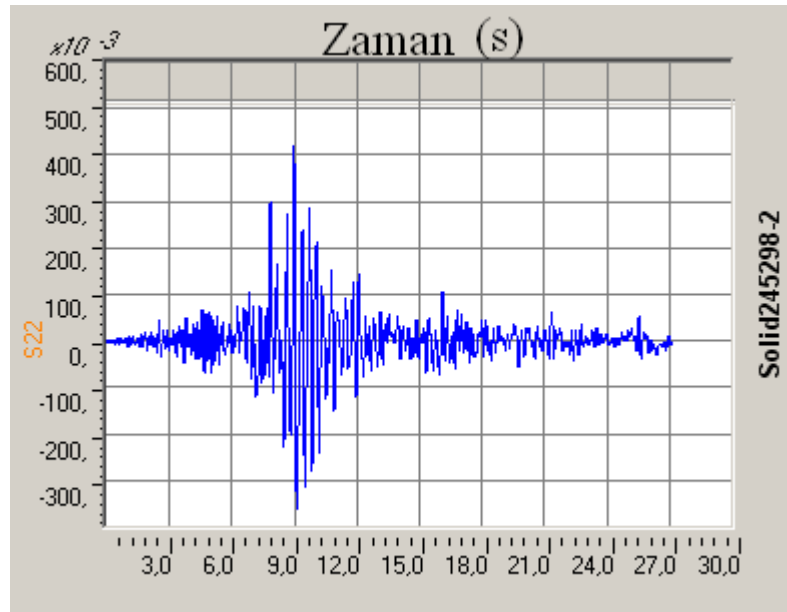
Şekil 6.48. Su kemeri 2. kemerin kilit taşında zamana karşılık gelen X yönü deplasmanı (mm)



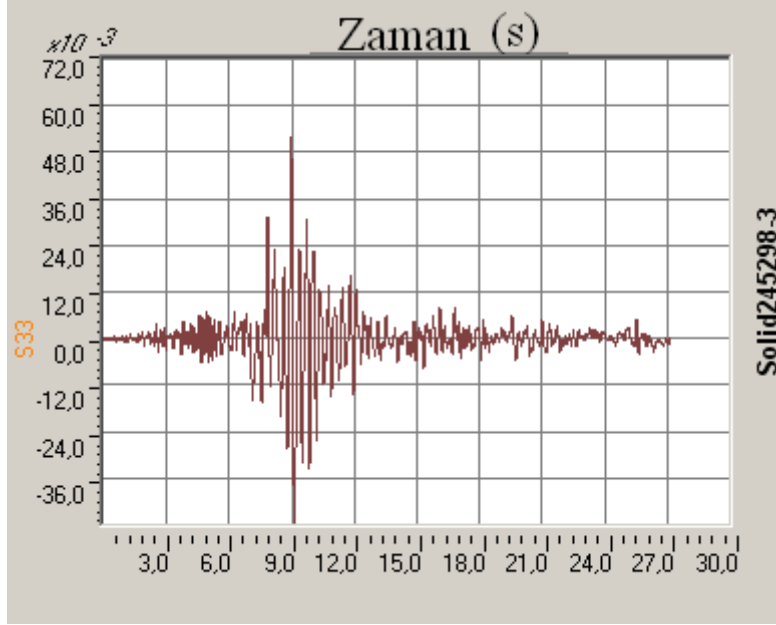
Şekil 6.49. Su kemeri 2. kemerin çatlak bölgesinde zamana karşılık gelen X yönü deplasmanı (mm)



Şekil 6.50. Su kemeri 2. kemerin kilit taşında zamana karşılık gelen S11 gerilmesi (MPa)

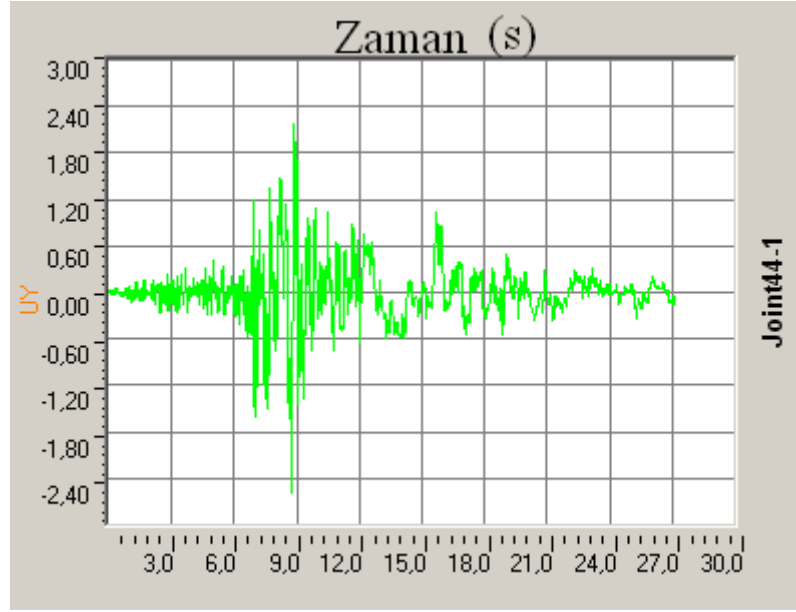


Şekil 6.51. Su kemeri 2. kemerin kilit taşında zamana karşılık gelen S22 gerilmesi (MPa)

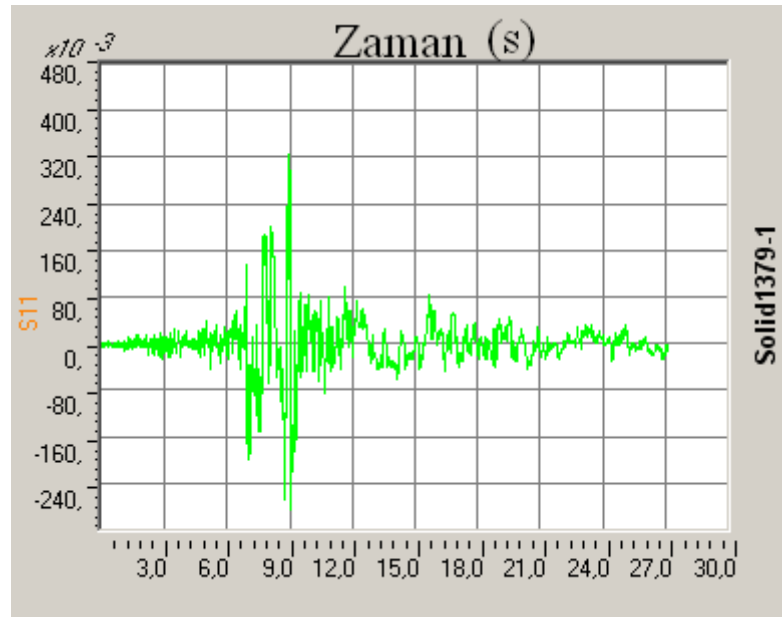


Şekil 6.52. Su kemeri 2. kemerin kilit taşında zamana karşılık gelen S33 gerilmesi (MPa)

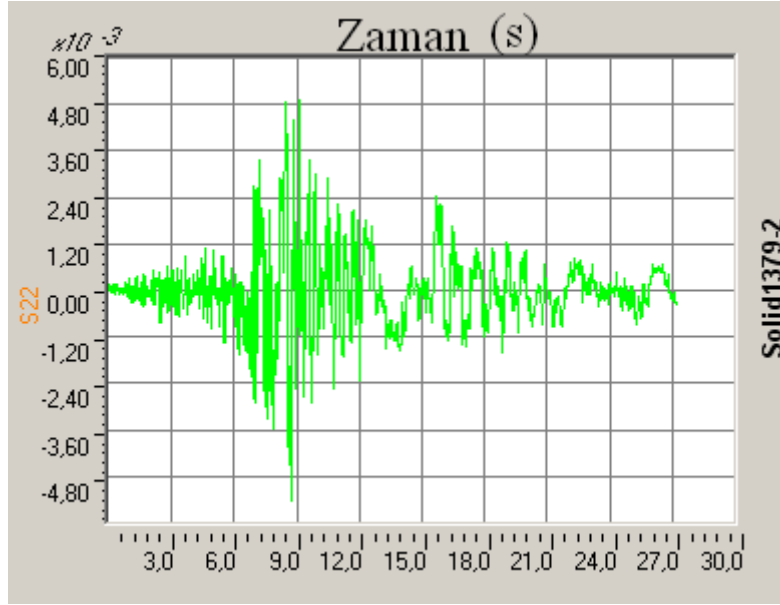
Köprünün orta kemerinde oluşan Y yönü deplasman-zaman grafiği Şekil 6.53’de verilmiştir. Bu bölgede en büyük deplasman değeri 2,41 mm olmuştur. Kemerlerin kilit taşlarının bulunduğu bölgedeki S11 gerilme değişimi Şekil 6.54’de, S22 gerilme değişimi Şekil 6.55’de ve S33 gerilme değişimi Şekil 6.56’da verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere oluşan gerilmeler oldukça düşük sevededir. Olası bir depremde yapının yıkılmadan ayakta kalabileceği beklenmektedir.



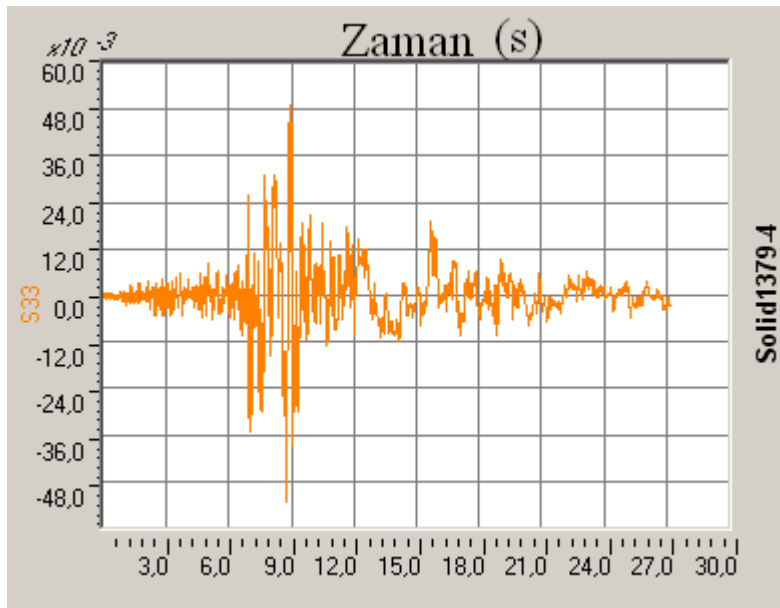
Şekil 6.53. Köprü orta kemer kilit taşları zamana karşılık gelen Y yönü deplasmanı (mm)



Şekil 6.54. Köprü orta kemer kilit taşında zamana karşılık gelen S11 gerilmesi (MPa)



Şekil 6.55. Köprü orta kemer kilit taşında zamana karşılık gelen S22 gerilmesi (MPa)



Şekil 6.56. Köprü orta kemer kilit taşında zamana karşılık gelen S33 gerilmesi (MPa)

Zaman tanım analizi sonucu her iki yapıda da oluşan gerilmeler düşük seviyede kalmıştır yapılar olası bir depreme karşı güvenlidir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mevcut tarihi yapıların incelenmesinde ve analizinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada tarihi yığma yapıların yapısal özelliklerinin ve davranışlarının belirlenmesi amacıyla bir dizi deneysel ve analitik yöntemler İzmir'deki mevcut iki adet tarihi yapı üzerinde uygulanmıştır. Bu kapsamda öncelikle tarihsel ve görsel incelemeler yapılmış, yapıların inşa dönemleri, taşıyıcı sistem geometrik, fiziksel özellikleri, eleman tür ve boyutları belirlenmiştir. Ardından yapıların bulunduğu bölgenin zemin parametreleri elde edilmiş ve mikrotremor ölçümleri ile zemin hakim periyotları bulunmuştur.

Taşıyıcı sistemleri oluşturan taş, tuğla ve harç birimlerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli tahribatlı ve tahribatsız testler uygulanmıştır. Böylece elde edilen sonuçlardan, literatürde ve yönetmeliklerde verilen çeşitli bağıntılar kullanılarak taşıyıcı sisteme ait malzeme parametrelerine ulaşılmıştır. Bu veriler dikkate alınarak statik ve dinamik analizlere esas olan matematik model bilgisayar ortamında idealize edilmiştir. Bununla birlikte ele alınan yapıların Operasyonel Modal Analizleri (OMA) gerçekleştirilerek dinamik parametreler ortaya çıkarılmıştır. Deneysel ve analitik yöntemlerle elde edilen dinamik değerler karşılaştırılarak model iyileştirmesi yapılmış ve yapıların mevcut durumlarını gerçekçi olarak temsil eden matematik modele ulaşılmıştır.

Aynı zamanda tarihi eserlerde darbe-eko deneyleri gerçekleştirilerek yığma taşıyıcı sistemlerin içyapısal özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece olası statik ve dinamik etkiler altında yapıların sergileyecekleri spesifik davranışlar değerlendirilmiştir. Nihayetinde yapıların statik, dinamik, spektrum ve zaman tanım alanındaki analizleri gerçekleştirilerek, taşıyıcı sistemlerde oluşabilecek deformasyonlar ve gerilmeler teorik olarak elde edilmiştir.

Yukarıda genel olarak özetlenen çalışmada elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır.

Daha çok beton elemanlarda uygulanan darbe-eko yönteminin, tarihi yığma sistemlerin içyapılarının belirlenmesinde başarıyla kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Özellikle uzun zamanda birçok etki altında kalarak çeşitli hasarlara uğrayan tarihi yapılarıdaki çatlakların ve boşlukların açığa çıkarılması yapısal açıdan önemlidir. Yapılarda gerçekleştirilen darbe-eko testi ile Vezir Su

Kemerî'nde mevcut olan çatlakların boyutları, Zeytinler Köprüsü'nde ise duvar ve iç dolgu kalınlıkları belirlenebilmiştir.

Yığma yapıların analizinde kullanılan önemli parametrelerden biri de elastisite modülü'dür. Bu çalışmada ele alınan tarihi yapıları oluşturan malzemelerin elastisite modülleri tahribatlı mekanik testlerden ve çeşitli ampirik bağıntılardan elde edilmiştir. Bununla birlikte Operasyonel Modal Analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek yapısal davranışla uyumlu elastisite modülü değerine ulaşılmıştır. Vezir Su Kemerî yapısal davranışa uyumludur. Buna karşılık Zeytinler Köprüsü'nde ise birbirinden farklı elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Ardından sonlu elemanlar iyileştirmesi yapılarak malzeme testlerinden elde edilen sonuçlar düzeltilmiştir. Su kemerine ait yığma taş ve tuğla kemerler için elastisite modülleri sırasıyla 850 MPa ve 170 MPa olarak belirlenmiştir. Kemer köprüye ait yığma taş, taş kemer ve dolgu taşları için elastisite modülleri sırasıyla 2950 MPa, 1600 MPa ve 1475 MPa olarak belirlenmiştir. Literatürde bu tür yığma yapıların elastisite modülleri, sonuçları önemli oranda etkileyecek geniş aralık değerinde verilmektedir. Dolayısıyla incelenen her bir tarihi yığma yapı, kendine özgü malzeme parametrelerine sahip olduğundan özel olarak ele alınmalıdır.

Tarihi yapılarda tahribatlı test yapılması her zaman mümkün değildir. Bu çalışmada gerçekleştirilen tahribatlı ve tahribatsız test sonuçları değerlendirildiğinde, tahribatsız testlerin (Schmidt, yoğunluk porozite, ultrases testleri) tahribatlı testlerle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu konuda mühendislerin tecrübesi ve bilgi birikimleri önemli rol almaktadır.

Vezir Su Kemerî'ne ait analiz sonuçlarında beklenen çatlaklar mevcut yapıda da bulunmaktadır. Bu, oluşturulan modelin mevcut yapıyı gerçekçi olarak temsil ettiğini gösteren önemli bir bulgudur.

Uzun yıllardır birçok etkiye karşı koyup ayakta kalarak günümüze ulaşan tarihi yapılar bu anlamda sağlam olduklarını ispatlamışlardır. Burada ele alınan ve birinci derece deprem bölgesinde yer alan tarihi yapıların, teorik analizleri sonucunda olası şiddetli bir depreme karşı ayakta kalabilecekleri değerlendirilmiştir. Bununla birlikte yapılardaki hasarların tespit edilip onarılması önemli bir gerekliliktir.

Tez çalışması sonucunda mevcut tarihi yığma yapıların analizleri ile ilgili aşağıdaki öneriler sıralanmıştır:

Yığma sistemi oluşturan birimler üzerinde yapılan tahribatsız testlerin sonuçları ile tahribatlı testlerin sonuçları arasında bir uyum mevcuttur. Ancak tahribatsız test sonuçları literatürde mevcut olan bağıntılarla kullanıldığında elde edilen sonuçlar tahribatlı test sonuçlarından farklıdır. Bu fark yerel olarak gerçekleştirilecek çalışmalar sonucunda elde edilebilecek düzeltme katsayıları ile giderilebilir. Yığma yapıların yöresel malzemeler ile inşa edildiği düşünülecek olursa her yöreye ait malzemeler için bir düzeltme katsayısı oluşturulabilir.

Tarihi yığma yapılardan alınacak numuneler sınırlı sayıda ve belirli boyuttadır. Tarihi yığma yapıları oluşturan bileşeler (taş, tuğla ve harç) üzerinde yapılacak testler için daha özel bir standart geliştirilmelidir.

Duvarlar, kemerler, kubbeler ve tonozlar gibi yığma taşıyıcı sistemler üzerinde dinamik analizler yapılarak elde edilen deneysel malzeme parametreleri ile, bu yapıları oluşturan birimler üzerine yapılan tahribatlı test sonuçlarının yer aldığı ve deneysel malzeme parametrelerini elde edecek ampirik bağıntılar geliştirilebilir.

Operasyonel Modal Analizde yapıyı titreştiren çevresel etkilerin farklılığı, test sonuçlarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle OMA uygulamasında bu husus dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akman M.S.**, 1997, “Building Materials in Early ages of Mankind”, Int. Conf. on Studies of Ancient Structures”, Faculty of Architecture of Yıldız Technical Univ., 177-186pp., Istanbul.
- Akman, S.**, 2003, Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi, TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri, 426(2003/4).
- Aköz, F. ve Yüzer, N.**, 2005, Tarihi Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Uygulanan Yöntemler, İMO e-kütüphane, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/11142.pdf> (Erişim tarihi: haziran 2010).
- Aksu, A.E., Piper, D.J.W., Konuk, T.**, 1987, Late Quaternary tectonic and sedimentary history of outer İzmir and Çandarlı bays, western Turkey, Marine Geology, 76, 89-104pp.
- Aktepe, M.M.**, 2003, İzmir Yazıları: Camiler, Hanlar, Medreseler, Sebiller; Hazırlayan: Fikret Yılmaz, İzmir B.B. Kültür Yayınları, İzmir.
- Ambraseys, N.N., Jackson, J.A.**, 1998, Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region. Geophys. J. Inter., 133, 390–406pp.
- ASTM C1196**, 1997, Standard Test Method for In Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements.
- ASTM, D2845-69**, 1969, Standard Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, 1969.
- ASTM, C597**, 1997, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- Ata, N., Mihara, S. and Ohtsu, M.**, 2007, Imaging of ungrouted tendon ducts in prestressed concrete by improved SIBIE. NDT&E International, 40(3) 258-264 pp.
- AutoCAD**, 2004, Autodesk, USA, AutoCAD2004.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bayraktar, A., Altunışık A.C., Türker, T. ve Sevim B.,** 2007a, Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-1 27 29 Eylül Ankara.
- Bayraktar, A., Altunışık A.C., Türker, T. ve Sevim B.,** 2007b, Analitik Model İyileştirmenin Yığma Binaların Deprem Davranışına Etkisinin Belirlenmesi, international earthquake symposium 22-26 October, Kocaeli Turkey.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B.,** 2007c, Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, Bildiriler Kitabı, 27-29 Eylül, inşaat Mühendisleri Odası, Ankara, 415-428s.
- Bayraktar, A., Altunışık A.C., Türker, T., Sevim B., T., Akköse, M. and Çoşkun, N.,** 2008, Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36 (6), 516- 524pp.
- Bayraktar, A., Altunışık A.C., Türker, T., Sevim B. and Yıldırım, F.,** 2009, Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Nondestructive Evaluation, 28 (1), 37-47pp.
- Bayraktar, A., Altunışık A.C., Birinci, F., Sevim, B. and Türker, T.,** 2010, Finite-Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities.
- Bayraktar, A., Altunışık A.C., Sevim, B., Türker and T.,** 2010, Seismic Response of a Historical Masonry Minaret using a Finite Element Model Updated with Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control.
- Berto L, Sabetta A, Scotta R and Vitaliani R,** 2002, An Orthotropic Damage Model For Masonry Structures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 55, 127-157 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bendat, J.S. and Piersol A.G.**, 1986, Random Data Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons.
- Binda, L., Saisi, A. and Tiraboschi, C.**, 2000, Investigation Procedures for the Diagnosis of Historic Masonries, Construction and Building Materials, 14, 199-233pp.
- Brencich, A. and Sabia, D.**, 2008, Experimental Identification of a Multi-Span Masonry Bridge: The Tanaro Bridge, Construction and Building Materials, 22 (10), 2087-2099pp.
- BS 1881**, 1986, Part 203: Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.
- Cantieni R.**, 2004, Experimental Methods Used In System Identification Of Civil Engineering Structures, 2. Workshop: Problemi di vibrazioni nelle strutture civili e nelle costruzioni meccaniche Perugia, 10-11 Giugno 2004
- Carino, N.J.**, 1991, Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenges, Concrete Technology Past Present and Future Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium SP-144-30 628-638pp
- Cintec** 2010, <http://www.cintec.co.uk/en/site/contacts.htm> (Erişim tarihi: Haziran 2010).
- Chen, W.F. and Han, D.J.**, 1987, "Plasticity for Structural Engineers", New York, N. Y. Springer-Verlag,
- Chen W. F.**, 1982, "Plasticity in Reinforced Concrete", New York, N. Y. McGraw-Hill Company.
- Croci G.**, 1998, The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage (Computational Mechanics Publications, Boston).
- Davey N.**, 1961, Gypsum Plaster- Limes and Cements-Stucco- Mortar and Concrete. A History of Building Materials. London: Phoenix House. 82-128pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- DBYBHY**, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan bakanlığı, 26511, Ankara.
- Dinçol A.M.**, 1982, “Hititlerden Önceki Anadolu”, Anadolu Uygarlıkları Ansiklopedisi, Görsel Yayın, 1, 12-16s.
- Emre Ö., Özalp S., Doğan A., Özaksoy V., Yıldırım C. ve Göktaş F.** 2005, İzmir Yakın Çevresinin Diri Fayları ve Deprem Potansiyelleri, Jeoloji Etütleri Dairesi, Mta Rapor, 10754.
- Eskişar, T.**, 2008, İzmir Körfezi Kuzey Kıyılarının Zemin Özelliklerinin ve Geoteknik Sorunlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Ege Üniv. Fen Bil. Ens.
- Eurocode 6**, 1996, European Committee for Standardization, Brussels.
- Ewins, D.J.**, 1984, Modal Testing: Theory and Practice, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Fernandes, F.**, 2006, Focus: old clay brick masonry material, ancient and historical constructions, structural analysis, destructive and non-destructive testing, GPR tomography. Ph.D thesis, University of Minho Guimares, Portugal.
- Frunzio, G. and Monaco, M.** 1998., An approach to the structural model for masonry arch bridges. Pont Saint Martin as a case study, Proceedings of the Second International Arch Bridge Conference, Venice, Italy.
- Frunzio, G., Gesualdo, A. and Monaco, M.** 1998., Structural modelling of a stone masonry arch bridge, Proceedings of the 8th Canadian Masonry Symposium, Jasper, Alberta, Canada.
- George, A.R.**, 2005, "The Tower of Babel: Archaeology, History and Cuneiform Texts" Archiv für Orientforschung 51 (2005/2006).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Giambanco G. and Di Gatia L.**, 1997, Cohesive Interface Model For The Structural Mechanics Of Block Masonry. Mechanics Re.Era'oh Comnamicaltens, 24(5)503-512pp.
- Giambanco G., Rizzo S. and Spallino R.**, 2001., Numerical Analysis of Masonry Structures via Interface Models, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 190, 6493-6511pp.
- Giordano A., Mele E. and Luca A.**, 2002, Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study, Engineering Structures, 24/2002 1057-1069pp.
- Güdücü, G.**, 2004, Archaeometrical Investigation of Mud Pastes on Hittite Buildings in fiapinuva- Çorum, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Güven, S.** 1990, Vitruvius, A., Mimarlık Üzerine On Kitap, Kitap 2, ss.25-45, Kitap 7, ss.143-154, Morgan, M.H. tercümesinden Türkçe'ye tercüme: Güven S., Şevki Vanlı Mimarlık Vakfı Yayını.
- Hodder, I.**, 1995. Çatal Höyük Arkeoatlas, Kasım, 336.
- Hodder I.**, 1996, "Çatalhöyük, 9000 Year Old Housing and Settlement in Central Anatolia," A Historical Perspective - Habitat II, Istanbul, 43-48pp.
- Houben, H. and Guillaud, H.**, 1994, Earth Construction. London: Intermediate Technology Publications.
- Hypermesh**, 2008, Altair-Hyperworks Finite Element Pre-Processor student trial version.
- Ivorra, S. and Pallares, F.J.**, 2006, Dynamic Investigations on a Masonry Bell Tower, Engineering Structures, 28, 660-667pp.
- İlerler M.**, 2009, Zemin etüd raporu, 122 ada 119 no'lu parsel, Zeytinler Köyü Urla, İzmir.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Juang, J.N.**, 1994, Applied System Identification, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, NJ.
- Kanai, K. and Tanaka, T.**, 1961, On microtremors VIII, Bull. Of the Earhquake ReseaRCH Inst., 39.
- Kitab-ı Mukaddes, Tevrat**, Eski Ahitler, Türkçe Baskı, a. Çıkış (Exodus), Bölüm 5 b. Tekvin, Yaradılış (Genesis), Bölüm 11 c. Tesniye, Kolaylaştırma (Deuteronomy), Bölüm 27.
- Koca, M.Y**, 1999, İzmir Yöresinde Andezitlerin Bozunma Ürünü Killerin Oluşum Şekilleri ve Mühendislik Özellikleri, Türkiye Jeoloji Bülteni, 42 2s.
- Koçak A.**,1999, Tarihi Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal olmayan Statik ve Dinamik Analizi: Küçük Aya Sofya Camisi , doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Koeri**, 2010, Ulusal Deprem İzleme Merkezi, Son depremler, 1974 İzmir Depremi Raporu, <http://www.koeri.boun.edu.tr> (Erişim tarihi: 11 Haziran 2010).
- Lionello A., Cavaggioni I., Modena C. and Casarin F.**, 2005, Experimental and numerical analysis of the structural behaviour of St Stefano's bell-tower in Venice, Structral Analysis of Historical Structures, Modeneo Lourenço & Roca, 2005 Taylor & Francis Group, London.
- Lourenço P.B.**, 1994, Analysis Of Masonry Structures With Interface Elements: Theory and Applications Report 03-021-22-0-01, Delft Univercity of Technology, Delft,The Netherland.
- Lourenço P.B.**, 1995, The Elastoplastic Implementation Of Homogenisation Techniques with An Extension To Masonry Structures Report 03-21-1-31-02, Delft Univercity of Technology, Delft,The Netherlands.
- Lourenço P.B.**, 1996, Computational Strategies for Masonry Structures PhD thesis Delft University Press, Netherlands.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lourenço P.B.**, 2001, Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Istanbul.
- Lourenço P.B.**, 2004, Assessment, diagnosis and strengthening of Outeiro Church, Portugal, Construction and Building Materials 19(2005) 634–645pp.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü**, 2010, İzmir jeoloji haritaları, http://www.mta.gov.tr/mta_web/500bin/izmira.asp (Erişim tarihi: Mart 2010).
- Malinowski R. and Garfinkel Y.**, 1991, “Prehistory of Concrete”, ACI Concrete International, March, 62–68pp.
- Mendes, P., Baptista, M.A., Agostinho, L., Lagomarsino, S. and Costav, J.P.**, 2005, Structural and Dynamic Analysis of N. Sra. do Carmo Church, Lagos Portugal, Proceedings EUROODYN2005, 311-318pp.
- Moropoulou, A., Bakolas, A. Bisbikou and K.**, 2000, Investigation of the Technology of Historic Mortars, Journal of Cultural Heritage.
- Nakahara, K. and Kitahara, M.**, 2002, Inversion of defects by linearized inverse scattering methods with measured waveforms. Proceedings International Symposium on Inverse Problems in Engineering Mechanics (ISIP2000), Berlin, Springer, 9-18pp.
- Nakamura, Y.**, 1989, A method for dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of RTRI, 30(1), Railway Technical Institute.
- National Instruments**, 2009, Modal Analysis in NI LabVIEW <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8276> (Erişim tarihi: Ağustos 2009).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ocakoğlu, N., Demirbağ, E. and Kuşçu, İ.**, 2005, Neotectonic structures in İzmir Gulf and surrounding regions (western Turkey): Evidences of strike-slip faulting with compression in the Aegean extensional regime. *Marine Geology*, 219, 155–171pp.
- Ohtsu, M. and Watanabe, T.**, 2002 Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection, *NDT&E International*, 35(3), 189-196pp.
- OMA**, 2006, Operational Modal Analysis, Release 4.0, Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- Omori, F.**, 1908, On microtremors, *Res. Imp. Earthquake Inv. Comm.* 2, 1-6pp.
- Öziş Ü., Özdemir Y., ve Kosava, A.**, 1999, İzmir'in Tarihi Su Getirme Sistemleri, 4-5 Haziran İzmir Su Kongresi, 45-56s.
- Öziş Ü.**, 2002, "Dörtbin yıl boyunca Türkiye'de su yapıları". *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 47(419).
- Peeters, B., and De Roeck, G.**, 1999, "Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering," *Proceedings of the 2nd International Conference on Identification in Engineering Systems*, Swansea, UK.
- Peeters, B.**, 2000, System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, PhD Thesis, K.U, Leuven, Belgium.
- Postacıoğlu, B.**, 1981, "Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri-İç Yapı ve Mekanik Özellikler" Cilt 1, İTÜ Matbaası, İstanbul.
- POLIMI**, 2004, Annex Flatjack, Work package 11: Guidelines and recommendations "On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings".
- Proceq, DIGI-Schmidt**, 2007, Model ND/LD, Zurich.
- Sansalone M.**, 1997, Impact-echo: The complete story. *ACI Structural Journal*, 94(6), 777-786pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sansalone, M.J. and Streett, W.B.**, 1997, Impact-echo, NY Bullbrier Pres Ithaca.
- SAP2000**, 2009, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Schmidt, E.**, 1951, Investigations with the new concrete test hammer for estimating the quality of concrete, (Versuche mit den neuen Beton Prüfhammer zur Qualitätsbetimmung des Beton), Schweiz. Archivangew. Wiss.Tech. (Solothurn), 17(5), 139p.
- Schnapp,A.**, 2001, Arkeolojinin Keşfi", Cogito 28:41-64,Yapı Kredi Yayınları.
- Sevin, V.**, 1999, Anadolu Arkeolojisi, Geliştirilmiş 2. Baskı, DER Yayınları, İstanbul.
- Sickels, L. B.**, 1981. Organics vs. Synthetics: Their Use as Additives in Mortars, Mortars, Cements and Grouts Used in the Conservation of Historic Buildings, Proceedings of Symposium in Rome: 25- 52pp.
- Sofraïne R.A., Popa G., Nappi A. and Facchin G.**, 2001, Dynamic Response of Church Steeples, Proceedings of the Second International Conference Studies in Ancient Structures edited By Görün Arun, Nadide Seçkin, (Yildiz Technical University, Faculty of Architecture, Istanbul).
- Stone, E.C.**, 1997, "Ziggurat". The Oxford Encyclopedia of Archaeology in the Near East (ed. E.M. Meyers, New York & Oxford 1997), 5, 390-391pp.
- Straub H.**, 1964, History of Civil Engineering, MIT Press, Cambridge MA.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., ve Kuşçu, İ.**, 1992, Türkiye Diri Fay Haritası, 1:2,000,000 ölçekli,Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Rao, S.**, 2004, The Finite Element Method in Engineering, Elsevier
- Teomete, E**, 2004, "Finite Element Modeling of Historical Masonry Structures; Case Study: Urla Kamanlı Mosque" MSc. Thesis, İYTE, İzmir.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Thorpe, M.**, 2002, Roma Mimarlığı, Homer Kitapevi ve Yayıncılık Ltd. Şti., İstanbul.
- Toksöz, M.N. and Lacoss, R.T.**, 1968, Microseisms: mode structure and sources, Science, 23 february 159 (3817).
- TS 699**, 1987,Doğal Yapı Taşlarının Test Edilmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Topal T.**, 2001, Nokta yükleme deneyi ile ilgili uygulamada karşılaşılan problemler, Jeoloji Mühendisliği dergisi 24 (1)
- Tuğla ve Kiremit Sanayicileri Derneği**, 2010, makaleler, http://asddizayn.com/tukder/foto_galeri/1392010174427İ.pdf (Erişim tarihi: 3 Mayıs 2010).
- Tunçoku S.S.**, 2001, Characterization of Masonry Mortars Used in Some Anatolian Monuments in Konya, Beysehir and Aksehir, PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara .
- Türkteki, M.**, 2010, Önasya'da Yapılan ilk Arkeolojik Kazılar, Türk eskiçağ Bilimleri Enstitüsü <http://www.turkinst.org/tr> (Erişim tarihi: 3 Temmuz 2010).
- Ulusay, R., Gökçeoğlu, C. ve Binal, A.**, 2001, “Kaya Mekaniği Laboratuar Deneyleri”, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 58, Ankara.
- Uzsoy, Ş.Z.**, 2001, Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliği, DEU yayınları
- Van Overschee, P., and De Moor, B.**, 1996, Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Wikipedi**, 2010, Choghazanbil, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Ziggurat> (Erişim tarihi 3 Haziran 2010).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Weber, G.**, 1889, Die Wasserleitungen von Smyrna 1 und 11. Berlin, "Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts". Bd. 14, S. Tafeln, 167-188pp.
- Wowturkey**, 2010, 525 bin Türkiye fotoğrafı, Kızılçullu su kemerleri <http://wowturkey.com/forum/viewtopic.php?t=36687> (Erişim tarihi: Haziran 2010).
- Yeşildere Sahası Heyelan Önleme ve İyileştirme Projesi**, 2001, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
- Yu, D.J., and Ren and W.X.**, 2005, “EMD-Based Stochastic Subspace Identification of Structures from Operational Vibration Measurements,” Engineering Structures 27: 1741–1751pp.
- Zienkiewicz O.C. and Taylor R.L**, 1991, The Finite Element Method, Basic Formulation and Linear Problems, MacGraw Hill, 1, London.
- Zeinkiewicz, O.C., and Taylor Taylor, R. L.**, 1991, Finite Element Method, 2, McGraw-Hill, London.
- 21.Arkeometri Sonuçları Toplantısı**, 2006, T.C. Kültür Ve Turizm Bakanlığı Yayınları Yayın No: 3052, Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü, 113, 30 Mayıs- 3 Haziran Antalya.

ÖZGEÇMİŞ

Emre Ercan, 1977 yılında İzmir’de doğdu. İlköğretimini Mustafa Reşit Paşa İlkokulu’nda tamamladı. Ortaöğretime başladığı Bornova Anadolu Lisesi’nden 1996 yılında mezun oldu.

1996 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2001 yılında tamamladı. 2000 yılında kendi şirketini kurarak taahhüt işlerine başladı. 2001-2004 yılları arasında İzmir Seferihisar’da toplam 400 konutlu iki kooperatifte şantiye şefliği görevi yaptı. 2001 yılında Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitime başladı. 2004 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak doktora eğitime başladı aynı yıl Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi kadrosuna girdi. Halen Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde çalışmaktadır.