

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KEMER BARAJLARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SONLU ELEMAN  
VE DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMLERİYLE BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Müh. Barış SEVİM**

**HAZİRAN 2010  
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


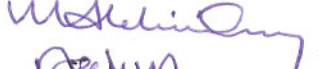
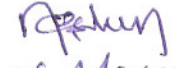


İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KEMER BARAJLARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ SONLU ELEMAN  
VE DENEYSEL MODAL ANALİZ YÖNTEMLERİYLE BELİRLENMESİ

İnş. Müh. Barış SEVİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor (İnşaat Mühendisliği)”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.05.2010  
Tezin Savunma Tarihi : 15.06.2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR   
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE   
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Nart COŞKUN   
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR   
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Zekai CELEP 

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

“Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen Hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan değerli Hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE'ye ve Yrd. Doç. Dr. Nart COŞKUN'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, tez çalışmamı inceleyerek tavsiyelerini benimle paylaşan Hocam Sayın Prof. Dr. Zekai CELEP'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmam sırasında, özellikle laboratuvar modelinin oluşturulması kısmında, gece-gündüz demeden, değerli zamanını ve emeğini benim için harcamaktan kaçınmayan Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR'a çok teşekkür ederim.

Akademik hayattaki güçlüklerle birlikte göğüs gerdiğimiz, acıları ve mutlulukları birlikte paylaştığımız, en zor zamanlarımda hep yanımda olan değerli arkadaşım ve dostum Arş. Gör. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatım boyunca bana destek olan Hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ'e, Dr. Hasan Basri BAŞAĞA'ya, Dr. Yasemin BAYRAM'a, Arş. Gör. Mehmet ÖZCAN'a, Arş. Gör. Temel TÜRKER'e ve Arş. Gör. Dr. Murat Emre KARTAL'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında manevi desteklerini benden esirgemeyen yakın dostlarım Arş. Gör. Mehmet ÇAPİK'e ve Dr. Abdurrahman ŞAHİN'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a, KTÜ Rektörlüğü'ne ve Yurt İçi Doktora Bursu Programı kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım süresince bana en büyük desteği veren aileme müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Ayrıca, öğrenim hayatım boyunca bana bilgi ve tecrübeleriyle yön gösteren ve destek olan hocalarıma, yakın arkadaşlarıma ve adını burada saymadığım herkese teşekkür eder; bu çalışmanın, yeni çalışmalara ışık tutmasını ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Barış SEVİM  
Trabzon 2010

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİN .....	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kemer Barajların Dinamik Davranışı ile İlgili Çalışmalar .....	3
1.2.1 Analitik Çalışmalar .....	4
1.2.2 Deneysel Çalışmalar.....	10
1.2.2.1. Laboratuvar Çalışmaları.....	11
1.2.2.2. Arazi Çalışmaları.....	13
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği .....	19
1.4. Kemer Barajların Sonlu Eleman Yöntemiyle Modellenmesi.....	20
1.4.1. Baraj Modeli.....	21
1.4.2. Rezervuar Modeli.....	21
1.4.3. Temel Modeli .....	23
1.5. Lagrange Yaklaşımı Kullanılarak Sıvı-Yapı Etkileşiminin Sonlu Eleman Yöntemine Dayalı Formülasyonu .....	23
1.5.1 Sıvı Davranışı ile İlgili Temel Bağlıntılar .....	24
1.5.2. Sıvı Sisteminin Sonlu Eleman Formülasyonu.....	29
1.5.3. Sıvı-Yapı Sisteminin Ortak Formülasyonu .....	32
1.5.3.1 Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....	33
1.5.3.2. Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz .....	33
1.6. Kemer Barajların Yapısal Performans Kriterleri .....	36
1.7. Deneysel Modal Analiz Yöntemi .....	37
1.7.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi .....	38

1.7.1.1.	Titreştiriciler.....	38
1.7.1.1.1	Sarsıcılar.....	38
1.7.1.1.2	Darbe Çekiçleri .....	39
1.7.1.2.	İvmeölçerler .....	40
1.7.1.3.	Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme.....	42
1.7.2.	Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Kurallar .....	46
1.7.3.	Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyon.....	49
1.7.3.1.	Çevresel Titreşim Yöntemi .....	49
1.7.3.1.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) Yöntemi .....	50
1.7.3.1.2.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi.....	52
1.7.3.2.	Zorlanmış Titreşim Yöntemi.....	55
1.8.	Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Modal Güvence Kriterine (MGK) Göre Değerlendirilmesi.....	56
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR .....	58
2.1.	Giriş.....	58
2.2.	Laboratuar Çalışmaları.....	58
2.2.1.	Tip-1 Kemer Barajının Geometrik Özellikleri ve Boyutlandırılması .....	58
2.2.2.	Tip-1 Kemer Barajının Laboratuar Modelinin İnşası.....	61
2.2.2.1.	Çelik Sac Kalıba Ait Detaylar .....	61
2.2.2.2.	Ahşap Kalıba Ait Detaylar .....	62
2.2.2.3.	Beton Dökümüne Ait Detaylar.....	64
2.2.2.4.	Beton Dökümünden Sonraki Detaylar .....	65
2.2.3.	Tip-1 Kemer Barajının Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	67
2.2.3.1.	Tek Eksenli Basınç Deneyleri.....	67
2.2.3.2.	Ultrasonik Hız Testleri .....	75
2.2.3.3.	Çevresel Titreşim Testleri ve Sonlu Eleman Analizi .....	77
2.2.4.	Tip-1 Kemer Barajının Sonlu Eleman Ağı Seçimi.....	80
2.2.5.	Rezervuar Yüksekliği Değişiminin Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi .....	82
2.2.5.1.	Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	83
2.2.5.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	119
2.2.5.2.1.	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) Yöntemine Göre Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....	125

2.2.5.2.2.	Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemine Göre Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....	138
2.2.5.3.	Zorlanmış Titreşim Yöntemiyle (ZTY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	150
2.2.5.4.	Tip-1 Kemer Barajının Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması .....	164
2.2.6.	Rezervuar Uzunluğu Değişiminin Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi .....	168
2.2.6.1.	Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	168
2.2.6.2.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	173
2.2.6.3.	Tip-1 Kemer Barajının Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması .....	180
2.3.	Arazi Çalışmaları.....	181
2.3.1.	Berke Barajı ve Geometrik Özellikleri.....	183
2.3.2.	Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Berke Barajı'nın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	185
2.3.3.	Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Berke Barajı'nın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi .....	191
2.3.4.	Berke Barajı'nın Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi.....	199
2.3.5.	Berke Barajı'nın Deprem Davranışının ve Yapısal Performansının Belirlenmesi.....	201
2.3.5.1.	Yerdeğiştirmeler.....	202
2.3.5.2.	Gerilmeler.....	204
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	208
4.	KAYNAKLAR.....	213

## ÖZGEÇMİŞ

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, kemer barajların dinamik davranışları sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, laboratuvar ortamında inşa edilen küçük ölçekli Tip-1 kemer baraj modeli ve mevcut bir baraj olan Berke Barajı üzerinde analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; kemer barajların dinamik davranışı, sonlu eleman ve deneysel modal analiz yöntemleri ile ilgili genel bilgiler ve bu yöntemlere ait formülasyonlar sunulmaktadır. İkinci bölümde; yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmektedir. İkinci bölümde yapılan çalışmalar iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; farklı rezervuar suyu yüksekliklerinin ve uzunluklarının Tip-1 kemer barajının dinamik karakteristikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı rezervuar yüksekliği ve uzunluğu için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman modelleri oluşturularak analitik dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Her bir durum için Tip-1 kemer barajı modeline çevresel ve zorlanmış titreşim testleri uygulanarak barajın dinamik karakteristikleri deneysel olarak elde edilmiş ve analitik sonuçlarla kıyaslanmıştır. İkinci kısımda; Berke Barajı'nın Lagrange yaklaşımına dayalı baraj-rezervuar-temel etkileşimini içeren üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturularak analitik dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Analitik dinamik karakteristiklerin doğruluğunu tespit etmek için Berke Barajı'na çevresel titreşim testleri uygulanmış ve barajın deneysel dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Berke Barajı'nın sonlu eleman modeli deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir. Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modeline deprem ivme kaydı uygulanarak, barajın her iki durum için lineer deprem davranışı araştırılmıştır. Ayrıca barajın lineer analiz sonuçlarına göre yapısal performansı değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde; tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir. Tez çalışmasında, kemer barajların dinamik davranışlarının belirlenmesinde, çevresel ve zorlanmış titreşim testlerinin önemi vurgulanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler :** Deneysel Modal Analiz, Deprem Davranışı, Dinamik Karakteristik, Lagrange Yaklaşımı, Kemer Baraj-Rezervuar-Temel Etkileşimi, Sonlu Eleman Yöntemi, Yapısal Performans.

## SUMMARY

### **Determination of Dynamic Behavior of Arch Dams using Finite Element and Experimental Modal Analysis Methods**

In this thesis, dynamic behaviors of arch dams are determined using finite element and experimental modal analyses methods. For this purpose, analytical and experimental studies are done on the laboratory model of Type-1 arch dam and Berke Arch Dam.

The thesis is considered three main sections. In the first section of the thesis; background of dynamic behavior of arch dams, finite element and experimental modal methods, and formulation of these methods are represented. In the second section of the thesis, analytical and experimental studies done on Type-1 arch dam and Berke Arch Dam, and findings from these studies are considered. The second section of the thesis is separated to two main parts. In the first part; different reservoir height and length effects on the dynamic characteristics of Type-1 arch dam are investigated. Finite element models of Type-1 arch dam are constituted for each case and the analytical dynamic characteristics are determined. Ambient and forced vibration tests are conducted to Type-1 arch dam and experimental dynamic characteristics are determined. In addition, analytical and experimental results are compared to each other. In the second part; 3D finite element model of Berke Arch Dam-reservoir-foundation system based on Lagrangian approach is constituted, modal analysis of the dam is performed and analytical dynamic characteristics are determined. To check the analytical results, ambient vibration tests are conducted to Berke Arch Dam and experimental dynamic characteristics are determined. Initial finite element model of Berke Arch Dam is updated according to experimental results. Linear time history analyses of both of initial and updated finite element model are performed. Structural performance of Berke Dam is evaluated according to linear analyses results. In the third section of the thesis; conclusions and some suggestions related to the thesis study are represented. Lastly, references and autobiography are represented. In the thesis, the importance of the ambient and forced vibration tests on the determination of dynamic behavior of arch dams is highlighted.

**Key Words :** Arch Dam-Reservoir-Foundation Interaction, Dynamic Characteristic, Earthquake Behavior, Experimental Modal Analysis, Finite Element Method, Lagrangian Approach, Structural Performance.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kemer barajlar için performans eğrisi (Ghanaat, 2002).....	37
Şekil 2. APS 400 tipi titreştirici.....	39
Şekil 3. B&K 8206 ve 8210 tipi darbe çekiçleri.....	40
Şekil 4. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması (URL-4, 2010) .....	41
Şekil 5. B&K 4507 B 005 ve 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler .....	42
Şekil 6. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi.....	44
Şekil 7. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne göre yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi .....	50
Şekil 8. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nin a) şematik gösterimi b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999).....	55
Şekil 9. Darbe çekici ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999).....	56
Şekil 10. Tip-1 kemer barajının geometrik özellikleri (Arch Dams, 1968) .....	59
Şekil 11. Tip-1 kemer barajının yerleştirildiği vadinin en kesiti (Arch Dams, 1968).....	59
Şekil 12. Tip-1 kemer barajının üç boyutlu modeli.....	60
Şekil 13. Tip-1 kemer barajının üç boyutlu baraj-rezervuar-temel modeli .....	60
Şekil 14. Çelik kalıba ait bazı fotoğraflar.....	62
Şekil 15. (270 x 130) cm <sup>2</sup> boyutlu yüzey için hazırlanan kalıp planı.....	63
Şekil 16. Ahşap kalıbın yapımına ait bazı fotoğraflar .....	63
Şekil 17. Beton dökümüne ait bazı fotoğraflar.....	64
Şekil 18. Ahşap kalıp söküldükten sonra modele ait bazı fotoğraflar .....	65
Şekil 19. Tip-1 kemer baraj modelinin bitmiş haline ait bazı fotoğraflar .....	66
Şekil 20. Numunelerin alınmasına ve hazırlanmasına ilişkin bazı fotoğraflar.....	68
Şekil 21. Küp numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden bazı fotoğraflar .....	69
Şekil 22. Silindir numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden bazı fotoğraflar .....	70
Şekil 23. 3 no'lu silindir numuneden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafiği .....	70
Şekil 24. Tip-1 kemer barajında yapılan ultrasonik hız testlerine ait bazı fotoğraflar .....	76
Şekil 25. Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri .....	77
Şekil 26. Tip-1 kemer barajının üç boyutlu baraj-rezervuar-temel sonlu eleman modeli...	78

Şekil 27. Tip-1 kemer barajının farklı sonlu eleman ağı içeren modelleri .....	81
Şekil 28. Tip-1 kemer barajının $H_a0$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	85
Şekil 29. Tip-1 kemer barajının $H_a1$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	86
Şekil 30. Tip-1 kemer barajının $H_a2$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	87
Şekil 31. Tip-1 kemer barajının $H_a3$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	88
Şekil 32. Tip-1 kemer barajının $H_a4$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	89
Şekil 33. Tip-1 kemer barajının $H_a5$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	90
Şekil 34. Tip-1 kemer barajının $H_a6$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	91
Şekil 35. Tip-1 kemer barajının $H_a0$ durumu için elde edilen mod şekilleri.....	95
Şekil 36. Tip-1 kemer barajının $H_a1$ durumu için elde edilen mod şekilleri.....	99
Şekil 37. Tip-1 kemer barajının $H_a2$ durumu için elde edilen mod şekilleri.....	102
Şekil 38. Tip-1 kemer barajının $H_a3$ durumu için elde edilen mod şekilleri.....	106
Şekil 39. Tip-1 kemer barajının $H_a4$ durumu için elde edilen mod şekilleri.....	109
Şekil 40. Tip-1 kemer barajının $H_a5$ durumu için elde edilen mod şekilleri.....	113
Şekil 41. Tip-1 kemer barajının $H_a6$ durumu için elde edilen mod şekilleri.....	116
Şekil 42. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinden elde edilen ilk dokuz doğal frekansın değişimi ....	118
Şekil 43. Tip-1 kemer barajının çevresel titreşim testlerinde kullanılan ölçüm sistemi....	120
Şekil 44. Tip 1 kemer barajının çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı .....	121
Şekil 45. Tip-1 kemer barajında $H_c0$ durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi .....	121
Şekil 46. Tip-1 kemer barajında $H_c1$ durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi .....	122
Şekil 47. Tip-1 kemer barajında $H_c2$ durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi .....	122
Şekil 48. Tip-1 kemer barajında $H_c3$ durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi .....	123
Şekil 49. Tip-1 kemer barajında $H_c4$ durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi .....	123
Şekil 50. Tip-1 kemer barajında $H_c5$ durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi .....	124
Şekil 51. Tip-1 kemer barajında $H_c6$ durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi .....	124
Şekil 52. $H_c0$ durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri .....	125
Şekil 53. $H_c1$ durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri .....	126

Şekil 54. Hç2 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri .....	126
Şekil 55. Hç3 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri .....	127
Şekil 56. Hç4 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri .....	127
Şekil 57. Hç5 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri .....	128
Şekil 58. Hç6 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri .....	128
Şekil 59. Hç0 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	129
Şekil 60. Hç1 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	130
Şekil 61. Hç2 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	131
Şekil 62. Hç3 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	132
Şekil 63. Hç4 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	132
Şekil 64. Hç5 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	133
Şekil 65. Hç6 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	134
Şekil 66. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının GFOA yöntemine göre elde edilen ilk dört a) doğal frekansın b) sönüm oranının değişimi .....	136
Şekil 67. Hç0 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı .....	138
Şekil 68. Hç1 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı .....	138
Şekil 69. Hç2 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı .....	139
Şekil 70. Hç3 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı .....	139
Şekil 71. Hç4 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı .....	139
Şekil 72. Hç5 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı .....	140
Şekil 73. Hç6 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı .....	140
Şekil 74. Hç0 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	140
Şekil 75. Hç1 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	141
Şekil 76. Hç2 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	142
Şekil 77. Hç3 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	143
Şekil 78. Hç4 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	144
Şekil 79. Hç5 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	145
Şekil 80. Hç6 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri .....	145
Şekil 81. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının SAB yöntemine göre elde edilen ilk dört a) doğal frekansın b) sönüm oranının değişimi .....	147
Şekil 82. Tip-1 kemer barajının zorlanmış titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı .....	151

Şekil 83. Tip-1 kemer barajında $H_z0$ durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi .....	152
Şekil 84. Tip-1 kemer barajında $H_z1$ durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi .....	152
Şekil 85. Tip-1 kemer barajında $H_z2$ durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi .....	153
Şekil 86. Tip-1 kemer barajında $H_z3$ durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi .....	153
Şekil 87. Tip-1 kemer barajında $H_z4$ durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi .....	154
Şekil 88. Tip-1 kemer barajında $H_z5$ durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi .....	154
Şekil 89. Tip-1 kemer barajında $H_z6$ durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi .....	155
Şekil 90. $H_z0$ durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları.....	156
Şekil 91. $H_z1$ durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları.....	157
Şekil 92. $H_z2$ durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları.....	158
Şekil 93. $H_z3$ durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları.....	159
Şekil 94. $H_z4$ durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları.....	160
Şekil 95. $H_z5$ durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları.....	161
Şekil 96. $H_z6$ durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları.....	162
Şekil 97. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan zorlanmış titreşim testlerinden elde edilen ilk dört doğal frekansın değişimi..	164
Şekil 98. Tip-1 kemer barajının SEY, ÇTY ve ZTY'den elde edilen dinamik karakteristiklere ait akış şeması.....	164
Şekil 99. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının SEY, ÇTY-GFOA ve ZTY'e göre elde edilen a) 1. Frekansın, b) 2. Frekansın, c) 3. Frekansın ve d) 4. Frekansın değişimi .....	165
Şekil 100. $H_0$ durumu için SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği.....	166
Şekil 101. $H_6$ durumu için SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği.....	166
Şekil 102. Tip-1 kemer barajının $L_{a0}$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	169
Şekil 103. Tip-1 kemer barajının $L_{aH}$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli.....	170
Şekil 104. Tip-1 kemer barajının $L_{a2H}$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli... 170	
Şekil 105. Tip-1 kemer barajının $L_{a3H}$ durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli... 171	
Şekil 106. Tip-1 kemer barajının a) $L_{a0}$ , b) $L_{aH}$ , c) $L_{a2H}$ ve d) $L_{a3H}$ durumları için elde edilen mod şekilleri.....	172

Şekil 107. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekansın değişimi .....	173
Şekil 108. Tip-1 kemer barajında a) $L_{\zeta 0}$ , b) $L_{\zeta H}$ , c) $L_{\zeta 2H}$ ve d) $L_{\zeta 3H}$ durumları için gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri .....	175
Şekil 109. $L_{\zeta 0}$ durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri.....	176
Şekil 110. $L_{\zeta H}$ durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri.....	176
Şekil 111. $L_{\zeta 2H}$ durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri.....	177
Şekil 112. $L_{\zeta 3H}$ durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri.....	177
Şekil 113. Tip-1 kemer barajının a) $L_{\zeta 0}$ , b) $L_{\zeta H}$ , c) $L_{\zeta 2H}$ ve d) $L_{\zeta 3H}$ durumları için elde edilen mod şekilleri.....	178
Şekil 114. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının GFOA yöntemine göre elde edilen ilk üç a) doğal frekansın b) sönüm oranının değişimi.....	179
Şekil 115. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının SEY ve ÇTY-GFOA'ya göre elde edilen a) 1. Frekansın, b) 2. Frekansın, c) 3. Frekansın değişimi .....	180
Şekil 116. $L_0$ durumu için SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği .....	181
Şekil 117. $L_3H$ durumu için SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği .....	181
Şekil 118. Arazi çalışmaları kapsamında yapılan çalışmaları içeren akış şeması .....	182
Şekil 119. Berke Barajı'na ait bazı fotoğraflar .....	184
Şekil 120. Berke Barajı'nın geometrik özellikleri (DSİ, 2009).....	185
Şekil 121. Berke Barajı'nın üç boyutlu sonlu eleman modeli .....	187
Şekil 122. Berke Barajı'nın analitik mod şekilleri .....	190
Şekil 123. Berke Barajı'nın çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı .....	192
Şekil 124. Berke Barajı'nda gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar .....	193
Şekil 125. Berke Barajı'nın ÇTY'den elde edilen spektral yoğunluk matrisleri.....	197
Şekil 126. Berke Barajı'nın ÇTY'den elde edilen mod şekilleri.....	198
Şekil 127. Berke Barajı'nın analitik ve deneysel modlarına ait MGK grafiği .....	201
Şekil 128. 1998 Adana-Ceyhan depreminin C2T4998A/CYH-EW bileşeni .....	202
Şekil 129. Berke Barajı'nda sonuçların karşılaştırılması için seçilen kesit ve düğüm noktaları .....	202
Şekil 130. Berke Barajı'nın a) I-I ve b) III-III kesitinde elde edilen yatay yerdeğştirmeler .....	203
Şekil 131. 83 no'lu düğüm noktasında elde edilen yatay yerdeğştirmelerin zamanla değişimi .....	203

Şekil 132. Berke Barajı'nın a) II-II ve b) III-III kesitinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler .....	204
Şekil 133. Berke Barajı'nın 117 no'lu düğüm noktasında elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi .....	205
Şekil 134. Berke Barajı'nın a) başlangıç b) iyileştirilmiş sonlu eleman modelinden elde edilen maksimum asal gerilme konturları .....	206
Şekil 135. Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri için performans eğrisi .....	207

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. APS 400 tipi titreştiriciye ait genel özellikler (URL-1, 2010).....	39
Tablo 2. B&K 8206 ve 8210 tipi darbe çekiçlerine ait bazı özellikler (URL-2 ve 3, 2010).....	40
Tablo 3. B&K 4507 B 005 ve 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler (URL-5 ve 6, 2010).....	42
Tablo 4. ÇTY'e dayalı bazı dinamik karakteristik belirleme yöntemleri.....	50
Tablo 5. Tip-1 kemer barajının inşasında kullanılan malzeme karışımları.....	67
Tablo 6. Küp numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen bazı özellikler .....	69
Tablo 7. Silindir numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen bazı özellikler .....	70
Tablo 8. 3 no'lu numuneye ait gerilme-şekildeğiştirme grafiğinden elde edilen özellikler .....	71
Tablo 9. Tip-1 kemer barajının temel kısmı için tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen elastisite modülleri .....	74
Tablo 10. Ultrasonik ses hızına bağlı elastisite modülü değerleri (BS 1881, 1986).....	75
Tablo 11. Tip-1 kemer barajında ultrasonik hız testlerinden yapılan okumalar .....	76
Tablo 12. Tip-1 kemer barajının ultrasonik hız testlerinden belirlenen elastisite modülleri .....	77
Tablo 13. Tip-1 kemer barajının farklı elastisite modülleri için hesaplanan analitik ve deneysel doğal frekansları .....	79
Tablo 14. Tip-1 kemer barajının farklı sonlu eleman ağlarında kullanılan eleman sayısı ve analiz süreleri.....	82
Tablo 15. Tip-1 kemer barajının farklı sonlu eleman ağları için gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen doğal periyotlar .....	82
Tablo 16. Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar yüksekliği için oluşturulan sonlu eleman modellerine ait eleman tipleri ve sayıları.....	84
Tablo 17. Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri .....	84
Tablo 18. $H_a0$ durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri.....	92
Tablo 19. $H_a1$ durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri.....	96
Tablo 20. $H_a2$ durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri.....	96

Tablo 21. H <sub>a3</sub> durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri.....	103
Tablo 22. H <sub>a4</sub> durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri.....	103
Tablo 23. H <sub>a5</sub> durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri.....	110
Tablo 24. H <sub>a6</sub> durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri.....	110
Tablo 25. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinden elde edilen doğal frekanslar.....	118
Tablo 26. H <sub>ç0</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler.....	129
Tablo 27. H <sub>ç1</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler.....	130
Tablo 28. H <sub>ç2</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler.....	131
Tablo 29. H <sub>ç3</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler.....	132
Tablo 30. H <sub>ç4</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler.....	133
Tablo 31. H <sub>ç5</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler.....	134
Tablo 32. H <sub>ç6</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler.....	134
Tablo 33. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk dört doğal frekans ve sönüm oranı.....	137
Tablo 34. H <sub>ç0</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler....	141
Tablo 35. H <sub>ç1</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler....	142
Tablo 36. H <sub>ç2</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler....	143
Tablo 37. H <sub>ç3</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler....	143
Tablo 38. H <sub>ç4</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler....	144
Tablo 39. H <sub>ç5</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler....	145
Tablo 40. H <sub>ç6</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler....	146
Tablo 41. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk dört doğal frekans ve sönüm oranı.....	148
Tablo 42. GFOA ve SAB yöntemine göre elde edilen modların karşılaştırılması.....	149
Tablo 43. GFOA ve SAB yöntemine göre elde edilen 2. modun MGK değerleri.....	150
Tablo 44. Farklı rezervuar yükseklikleri için Tip-1 kemer barajına uygulanan zorlanmış titreşim testlerinden elde edilen doğal frekanslar.....	163



Tablo 45. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının SEY, ÇTY-GFOA ve ZTY'e göre elde edilen doğal frekanslar.....	167
Tablo 46. Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar uzunluğu için oluşturulan sonlu eleman modellerine ait eleman tipleri ve sayıları.....	169
Tablo 47. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinden elde edilen doğal frekanslar.....	173
Tablo 48. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının GFOA yöntemine göre elde edilen doğal frekans ve sönüm oranları.....	179
Tablo 49. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için SEY ve ÇTY-GFOA yöntemine göre elde edilen doğal frekanslar .....	180
Tablo 50. Berke Barajı'nın sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri (DSİ, 2009).....	186
Tablo 51. Berke Barajı'nın analitik doğal frekans, periyot ve mod şekilleri .....	186
Tablo 52. Berke Barajı'nın ÇTY'den elde edilen doğal frekansları .....	199
Tablo 53. Berke Barajı'nın ÇTY'den elde edilen sönüm oranları .....	199
Tablo 54. Berke Barajı'nın iyileştirilmiş malzeme özellikleri .....	200
Tablo 55. Berke Barajı'nın analitik ve deneysel doğal frekansları .....	200

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A_k$	Tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait k. artk değer matrisi
$A_*$	Durum matrisi
$a_0, a_n, b_n$	Fourier serisi katsayıları
$B_*$	Veri matrisi
$B_s^e$	Sv1 elemanın şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisi
$C$	Sistem sönüm matrisi
$C_s$	Sudaki ses hızı
$C_{11}$	Sıvının hacimsel elastisite modülü
$C_{22}, C_{33}, C_{44}$	Dönel yay rijitlik katsayıları
$C_*$	Sistem davranış matrisi
ÇTY	Çevresel Titreşim Yöntemi
$D_*$	Doğrudan iletim matrisi
$D_{sil}$	Silindir numune çapı
$E_t$	Temelin elastisite modülü
$E_b$	Barajın elastisite modülü
$E_d$	Dinamik elastisite modülü
$E_s$	Statik elastisite modülü
$E_*$	Değer operatörü
$\varepsilon_v$	Hacimsel şekildeğiştirme
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	x, y, z doğrultularındaki şekildeğiştirme bileşenleri
$e_s$	Sıvının şekildeğiştirme vektörü
$e_s^e$	$U_s^e$ 'ye karşılık gelen şekildeğiştirme vektörü
$F(t)$	Kuvvet vektörü
FDF	Frekans Davranış Fonksiyonu
f	Frekans
$f_{küp}$	Küp numune basınç dayanımı

$f_{sil}$	Silindir numune basınç dayanımı
GFOA	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma
GSY	Güç Spektral Yoğunluğu
$G_{xx}(j\omega)$	Etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
$G_{yy}(j\omega)$	Tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu
$g$	Yerçekimi ivmesi
H	Baraj yüksekliği
$H_s$	Rezervuar suyu yüksekliği
$H(j\omega)$	Frekans davranış fonksiyonu
$H_{ik}(i\omega)$	Transfer matrisi
$H_{sil}$	Silindir numune yüksekliği
$\bar{H}$	İnterpolasyon fonksiyonları matrisi
$\bar{h}_i$	İnterpolasyon fonksiyonu
$K$	Sistem rijitlik matrisi
$K_s$	Sıvı sistemin rijitlik matrisi
$K_s^e$	Sıvı elemanın rijitlik matrisi
$K_s^*$	Sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemin rijitlik matrisi
L	Rezervuar suyu uzunluğu
$M$	Sistem kütle matrisi
$M_s$	Sıvı sistemin kütle matrisi
$M_s^e$	Sıvı eleman kütle matrisi
m	Tekil kütle
n	Sıvı yüzeyi normal
P	Hidrodinamik basınç
$P_x, P_y, P_z$	Dönmeyle ilgili gerilmeler
$Q_i$	i. genelleştirilmiş kuvvet
$q_i$	i. genelleştirilmiş koordinat
$R$	Sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörü
$R_k$	Artık değer fonksiyonu

SAB	Stokastik Altalan Belirleme
SEY	Sonlu Eleman Yöntemi
$S_i$	Skaler tekil değerleri içeren diyagonal matris
$S_s^e$	Sıvı elemanın serbest yüzey rijitlik matrisi
$s_{ij}$	Skaler tekil değerler
T	Periyot
t	Zaman
$T_k$	Sıvı sistemin kinetik enerjisi
<b>U</b>	Zamana bağlı yerdeğiştirme vektörü
$U_n$	Sıvı-yapı ara yüzey normali yerdeğiştirmesi
$U_i$	Tekil vektörleri içeren bütün matris
$U_s$	Sıvı sistemin yerdeğiştirme vektörü
$U_s^e$	Sıvı elemanın yerdeğiştirme vektörü
$U_{ss}$	Sıvı serbest yüzey düşey yerdeğiştirme vektörü
$U_{sxi}^e, U_{syi}^e, U_{szi}^e$	q düğüm noktalı elemanın x, y ve z doğrultusundaki düğüm noktası yerdeğiştirmeleri
$U_{sx}, U_{sy}, U_{sz}$	x, y, z doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenleri
$u_{ij}$	Tekil vektör
$u_k$	Belirgin etki sinyal vektörü
$\dot{U}$	Zamana bağlı hız vektörü
$\dot{U}_s$	Sıvı sistemin hız vektörü
$\ddot{U}$	Zamana bağlı ivme vektörü
$X_i(w)$	Frekans ortamındaki tepki fonksiyonu
x, y, z	Kartezyen koordinatları
$x^e, y^e, z^e$	Sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki koordinatlar
$x_i^e, y_i^e, z_i^e$	q düğüm noktalı elemanın i. düğüm noktası koordinatları
$v_k, w_k$	Model ve ivmeölçer hatalarından dolayı işlenen gürültü sinyalleri
$w_s$	Suyun birim hacim ağırlığı
$w_x, w_y, w_z$	x, y, z eksenleri etrafındaki rijit cisim dönmeleri

$\mathbf{Y}_k(w)$	Frekans ortamındaki etki fonksiyonu
ZTY	Zorlanmış Titreşim Yöntemi
$\alpha$	Faz açısı
$\alpha_\beta$	Agrega faktörü
$\gamma_{bet}$	Betonun birim kütle yoğunluğu
$\delta_{bet}$	Betonun birim hacim ağırlığı
$\delta_{pq}$	Kronecker delta
$\mu$	Poisson oranı
$\Psi_a$	Analitik mod şekil vektörü
$\Psi_d$	Deneysel mod şekil vektörü
$\rho_s$	Sıvının birim kütle yoğunluğu
$\Psi$	Serbest titreşim genliğini
$\omega$	Açısal frekans
$\lambda$	Özdeğer
$\lambda_k$	Kutup fonksiyonu
*	Kompleks eşlenik
$\sigma_s$	Sıvının gerilme vektörü
$\pi_e$	Sıvı sistemin toplam şekildeğiştirme enerjisi
$\pi_s$	Sıvı sistemin yüzey potansiyel enerjisi
$\pi_t$	Sıvı sistemin toplam potansiyel enerjisi

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Su, insanlık için vazgeçilmez bir ihtiyaç maddesidir. İnsanlar, yaşamlarını sürdürebilmek için ihtiyaçları kadar suyu temin etmek zorundadırlar. Dünyadaki toplam su miktarı yaklaşık  $1.4 \times 10^9$  km<sup>3</sup> olup, temiz ve kullanılabilir su oranı bu miktarın %1'inden daha azdır (DSİ, 2009). Tabiatta bulunan su; direk olarak insan ihtiyacını karşılayamayacağı için, çeşitli işlemlerden geçirilerek kullanılabilir hale getirilmektedir. Bu amaçla çeşitli su yapıları inşa edilir ki bu yapıların en önemlisi barajlardır (Calayır, 1994; Bayraktar, 1995). Arkalarında büyük su kütlelerini tutan barajlar günümüzde genellikle enerji, sulama ve içme suyu temin etmek amacıyla inşa edilen mühendislik yapılarıdır. Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu'nu, yüksekliği temel kotundan en az 15 m veya depolama hacmi  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>'ten fazla olan su yapılarını "baraj" olarak tanımlamaktadır. Dünyadaki mevcut baraj sayısı yüz binlerle ifade edilmekte olup Ülkemizdeki mevcut baraj sayısı yedi yüz civarındadır. Barajlar, gövde tiplerine göre dolgu ve beton barajlar olarak ikiye ayrılabilir. Dolgu barajlar, toprak ve kaya dolgu barajlar olarak; beton barajlar ise ağırlık, kemer, payandalı ve silindire sıkıştırılmış beton barajlar olarak sınıflandırılabilirler.

Beton kemer barajlar, enerji elde etmek amacıyla yapılan tek veya çift eğriliğe sahip barajlardır. Tek eğrilikli barajlar planda, çift eğrilikli barajlar ise hem planda hem de düşey kesit boyunca eğriliğe sahiptir. Kemer barajlar, ağırlık barajlara kıyasla daha az beton kullanılarak inşa edilen narin kesitli yapılardır. Bu barajlar, üzerlerine gelen su basıncını kemer ve konsol davranışları sayesinde vadi yamaçlarına aktarırlar. Dolayısıyla vadi yamaçlarının bu basıncı taşıyabilecek sağlamlıkta olması gerekmektedir. Bu bakımdan kemer barajlar, kret uzunluğu baraj yüksekliğinin altı ile en çok on katını geçmeyen vadilere inşa edilebilmektedirler (Öziş, 1993).

Kemer barajlar, sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda deprem gibi dinamik bir etki esnasında sıvı ortamda hidrodinamik basınçlar, yapı ortamında hidrodinamik basınçlardan dolayı ilave yükler meydana gelir. Kemer barajların bu ilave yükleri taşıyamayıp hasar görmesi telafisi olmayan sonuçlara neden olabilir. Özellikle aktif deprem kuşağı içerisinde yer alan Ülkemizdeki barajlardan birinin veya bir

kaçının yıkılması halinde çok büyük can ve mal kayıpları oluşabilir. Bu tür sonuçlarla karşılaşmamak için, kemer barajların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Kemer barajların veya diğer mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki davranışı, dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Dinamik karakteristikler analitik veya deneysel yöntemlerle tespit edilmektedir. Analitik dinamik karakteristikler genellikle yapının projelendirme aşamasında belirlenmektedir. Eğer yapının herhangi bir projesi yoksa yapı üzerinde çeşitli incelemeler yapılarak uygun bir proje geliştirilir. Analitik yöntemde, yapının sonlu eleman modeli oluşturulmakta, uygun malzeme özellikleri ve sınır şartları belirlenmekte, serbest titreşim analizi yapılarak doğal frekanslar ve mod şekilleri elde edilmektedir. Fakat elde edilen dinamik karakteristiklerin yapıların mevcut gerçek durumlarını tam olarak yansıtmadığı birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır (Miglietta, 1995; Teleghani ve Papa, 1996; Sun ve Philip, 1997; Cooper vd., 2001; Morin vd., 2002; Reynolds vd., 2002; Sasaki vd., 2004; Law vd., 2006). Bu durumun başlıca sebepleri; yapının projelendirme aşamasında, inşa aşamasında ve kullanım aşamasında yapılan hatalardır. Projelendirme aşamasındaki yanlış kesit hesapları, tasarımda olmayan yükleme durumları, inşa aşamasındaki işçilik hataları, projenin tam uygulanmaması, yapının amaç dışı kullanımı (mevcut yapıya sonradan eklemeler yapılması, yapının taşıyıcı sistem elemanlarının geniş alan kazanmak amacıyla kesilmesi) gibi nedenlerden dolayı yapı başlangıçtaki davranışından bir hayli uzaklaşmış olmaktadır. Bunlara ek olarak yapının ömrü boyunca çeşitli sıcaklık, donma, çözünme gibi iklim ve çevre etkilerine maruz kalması yapı davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Dolayısıyla başlangıçtaki analitik dinamik karakteristiklerin, yapının deprem davranışının belirlenmesinde kullanılması, doğru olmayan analiz sonuçlarını beraberinde getirecektir. Sonuçta analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin doğruluğunu kontrol etmek için deneysel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Deneysel yöntemler doğrudan yapı üzerine uygulanmakta ve elde edilen dinamik karakteristikler yapının o anki mevcut durumunu yansıtmaktadır.

Günümüzde yapıların dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için Deneysel Modal Analiz Yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yapı üzerinde çeşitli noktalara hassas ivmeölçerler yerleştirilmekte ve ivmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesi yardımıyla toplanmaktadır. Toplanan sinyaller hem yapıdan hem de

çevreden gelen sinyalleri içerdiğinden filtreleme teknikleri kullanılarak ayrıştırılmakta ve yapıya ait sinyaller işlenerek çeşitli eğri uydurma denklemleri yardımıyla dinamik karakteristikler belirlenmektedir.

Deneysel Modal Analiz yöntemi iki alt yönteme ayrılmaktadır. Bu yöntemler:

- ✓ Çevresel Titreşim Yöntemi (ÇTY)
- ✓ Zorlanmış Titreşim Yöntemi (ZTY)

Çevresel Titreşim Yöntemi'nde, yapı çevresel veya doğal etkilerle (değeri ölçülmemiş) titreştirilmekte ve yapının titreşimlere göstermiş olduğu tepki davranışı ölçülmektedir. Çevresel veya doğal etki olarak, deprem, rüzgâr, patlatma, trafik, su dalgası veya değeri ölçülmemiş rastgele titreşimlerden faydalanılmaktadır. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde ise yapı, değeri bilinen (ölçülen) bir etkiyle titreştirilmekte ve yapının tepki davranışı ölçülmektedir. Bu yöntemde ölçülebilen etki, darbe çekici, sarsıcı gibi araçlardan sağlanmaktadır.

Deneysel yöntemlerle belirlenen dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilenlerle karşılaştırıldığında büyük oranda farklılıklar içermiyorsa (oran  $\leq$  % 5–10), analitik dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumunu yansıttığı kabul edilmekte ve deprem, rüzgâr vb. gibi yükleme koşulları altında ileri dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. Eğer bu oran farkı büyükse (oran  $>$  %5–10), analitik dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumu yansıtmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri istenen sınırlar içerisinde birbirine yaklaştırmak için, yapının sonlu eleman modelinde yapılan kabuller, malzeme özellikleri ve sınır şartları gözden geçirilerek yapının mevcut davranışını yansıtacak en uygun koşullar belirlenmektedir. Bu işleme Sonlu Eleman Model İyileştirmesi adı verilmektedir (Friswell ve Mottershead, 1995; Modak vd., 2002; El-Borgi vd., 2004; Jaishi ve Ren, 2005; Bayraktar vd., 2007a). Modeli iyileştirilen yapının dinamik analizleri gerçekleştirilerek dinamik davranışı belirlenmektedir.

## **1.2. Kemer Barajların Dinamik Davranışı ile İlgili Çalışmalar**

Bu kısımda, kemer barajların dinamik karakteristiklerinin ve dinamik davranışlarının belirlendiği analitik ve deneysel çalışmalara yer verilmektedir. Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesi ve sonlu eleman yönteminin geliştirilmesiyle birlikte kemer barajlarla ilgili yüzlerce analitik çalışma yapılmıştır. Bu nedenle, tezin literatür kısmında kemer barajların



dinamik davranışlarını farklı açılardan ele alan, genellikle son yıllarda yapılan analitik çalışmalara yer verilmektedir. Deneysel çalışmalar ise laboratuvar ve arazi çalışmaları olmak üzere iki kısma ayrılmıştır.

### 1.2.1. Analitik Çalışmalar

Kemer barajların, dinamik davranışlarının belirlenebilmesi için geçmişten günümüze birçok araştırmacı tarafından analitik çalışmalar yapılmıştır. (Elkhodary, 1984; Dowling, 1988; Debessay, 1989; Dominguez ve Maeso, 1993a; Dominguez ve Maeso, 1993b; Maeso ve Dominguez, 1993; Noruziaan, 1995; Tan, 1995; Hall, 1996; Tan ve Chopra, 1996; Lan ve Yang, 1997a; Malla ve Wieland, 1999; Szczeniaka vd., 1999; Valliappan vd., 1999; Li vd., 2000; Tzenkov, 2001; Akköse ve Dumanoglu, 2003; Goodman vd., 2003; Chen vd., 2003; Mironov ve Pahl, 2004; Alves, 2005; Sultanbekov, 2005).

Hall ve Chopra (1980, 1983), Fok ve Chopra (1985, 1986), Tan ve Chopra (1995, 1996), suyun sıkışabilirlik özelliğini kullanarak kemer baraj-rezervuar etkileşim sistemlerinin deprem davranışlarını incelemişlerdir.

Amerikan ordusu mühendisleri (USACE, 1994), kemer barajların tasarımı, dinamik analizleri ve inşası ile ilgili çalışmaları içeren bir rapor hazırlamışlardır.

Feng vd. (1996), üç boyutlu sınır eleman yöntemini kullanarak kemer barajların lineer olmayan dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Silva ve Julio (1997), kemer barajların mod şekillerini elde etmek için sayısal teknikler kullanmışlardır.

Kottenstette (1997), blok teorisi tekniklerini kullanarak kemer barajların stabilite analizlerini gerçekleştirmiştir.

Lan ve Yang (1997b), bir kemer barajın dinamik davranışını lineer olmayan malzeme özellikleri altında araştırmışlardır. Bu amaçla, NFC3D adını verdikleri lineer olmayan analiz yapabilme kapasitesine sahip bir sonlu eleman programı geliştirmişler ve kemer barajın dinamik analizlerini gerçekleştirerek, barajda meydana gelen gerilme durumlarını incelemişlerdir.

Chanson ve James (1998), dört tarihi kemer barajın rezervuarında biriken sediment malzemesinin barajların dinamik davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Hall (1998), kemer barajların deprem davranışını belirlemek için yayılı çatlak yöntemine dayalı uygun bir prosedür geliştirmiştir. Bu prosedür, yapının modellenmesini,

rezervuar-temel etkileşimini, hasar durumunu, düğüm noktalarının açılıp kapanmasını, kesme kırılmasını ve su basıncını kapsayacak şekilde güvenilir bir çözüm algoritması içermektedir.

Ohmachi ve Jalali (1999), yakın fay yer hareketi altındaki kemer barajların lineer dinamik davranışlarını araştırmışlardır. Uygulama olarak Amerika'daki Morrow Point Kemer Barajı'nı seçmişlerdir. 1967 yılında inşa edilen bu baraj çift eğrilikli olup, 144 m yüksekliğe ve 244 m kret uzunluğuna sahiptir. Baraj, kabuk elemanlarla modellenmiş ve 1994 Northridge Depremi ivme kayıtları kullanılarak analiz edilmiştir. Barajın memba ve mansap yüzündeki elemanlarda oluşan gerilmelerin değişimini incelemek için, ivme kayıtları barajla farklı açılar yapacak şekilde uygulanmıştır.

Camara (2000), kemer baraj-rezervuar-temel sistemlerinin sismik davranışını belirlemek için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde göre baraj sonlu elemanlarla, rezervuar ve temel sınır elemanlarla modellenmiştir. Uygulama amacıyla Pacoima Barajı seçilmiş ve barajın 1971 San Fernando depremine göre gerçekleştirilen dinamik analizinden barajda herhangi bir çatlak veya hasar oluşmadığı vurgulanmıştır.

Nasserzare vd. (2000), kemer baraj-rezervuar-temel sistemlerinin doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için özel bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemin geçerliliğini denemek için öncelikle daha küçük ölçekli yapılar analiz edilmiştir. Çalışmada elde edilen doğal frekans ve mod şekillerinin literatürle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Ahmadi vd. (2001), kemer baraj-rezervuar sistemlerinin sonlu eleman analizi için hem kesme hem de çekme davranışı içeren lineer olmayan eleman modeli geliştirmişlerdir. Elemanın, kesme davranışı içermeyen sistemlerde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Geliştirilen lineer olmayan eleman modelinin yüksek deprem riski taşıyan bölgelerde inşa edilecek kemer barajlar için rahatlıkla kullanılabilmesi vurgulanmıştır.

Chuhan vd. (2001), sonlu eleman yöntemiyle geliştirdikleri iki farklı kemer baraj modelinde çeşitli sedimantasyon parametreleri kullanarak yansıma katsayılarındaki değişimi araştırmışlardır. Yansıma katsayılarını kullanarak kemer baraj-rezervuar etkileşim analizlerini suyun sıkışabilirlik etkisini de dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir.

Azmi ve Paultre (2002), kemer barajların üç boyutlu davranışını bağlantı noktalarındaki lineer olmama durumunu dikkate alarak incelemişlerdir.

Calayır ve Karaton (2002), kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışını baraj-rezervuar etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir. Çalışmada, Karakaya Kemer Barajı'nın baraj-rezervuar-temel etkileşimi içeren üç boyutlu sonlu eleman modeli

oluşturulmuştur. Rezervuar davranışı Lagrange ve Euler yaklaşımlarıyla temsil edilerek lineer olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her iki yöntemden elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu vurgulanmıştır.

Lotfi ve Espandar (2002), kemer barajların lineer olmayan deprem davranışının belirlenmesinde bağlantı noktalarının açılmasının sistem üzerindeki etkilerini geniş bir şekilde incelemişlerdir. Bu amaçla, özel bir sonlu eleman programı geliştirilmiştir. Bu programa dayalı olarak ince bir kemer barajın dinamik davranışı araştırılmıştır. Kemer barajın farklı özelliklere sahip bağlantı noktaları içeren modellerinin lineer olmayan dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen maksimum çekme gerilmelerinin dağılımı incelendiğinde, bağlantı noktalarının tanımlanmasında kullanılan özelliklerin uygun olduğu vurgulanmıştır.

Curtis vd. (2003), Tacoma şehrindeki Cushman Kemer Barajı'nın baraj-rezervuar-temel etkileşimini dikkate alarak lineer olmayan dinamik davranışını ayırık eleman yöntemiyle belirlemeye çalışmışlardır.

Espander ve Lotfi (2003), kemer barajların dinamik analizlerini ortogonal olmayan yayılı çatlak modelini ve plastik modelleri kullanarak incelemişler ve iki yöntemden elde edilen sonuçları birbirleriyle karşılaştırmışlardır.

Akköse (2004), 1968'de İngiltere'de düzenlenen "Arch Dams (1968)" sempozyumunda önerilen çift eğrilikli Tip-5 kemer barajının malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan üç boyutlu davranışını Lagrange yaklaşımını kullanarak incelemiştir. Bu çalışmada, baraj betonunun lineer olmayan davranışı, eğri tanımlama ve Drucker-Prager modeli ile temsil edilmiştir.

Akköse vd. (2004), kemer barajların, baraj-rezervuar, baraj-temel ve baraj-rezervuar-temel etkileşimlerini içeren durumlar için sonlu eleman modelleri oluşturmuş, lineer ve lineer olmayan dinamik davranışlarını 1940 El Centro ivme kaydını kullanarak incelemişlerdir.

Calayır ve Karaton (2004), kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışını Drucker-Prager yaklaşımını kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada, sayısal uygulama için Türkiye'deki Karakaya Kemer Barajı'nı seçmişler ve barajın temel ve rezervuar etkileşimini içeren üç boyutlu sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Çalışmada, rezervuar davranışı Euler yaklaşımıyla dikkate alınmış ve 1952 Taft depreminin S69 ivme bileşeni kullanılarak barajın lineer ve lineer olmayan davranışları belirlenmiştir.

Ghanaat (2004), kemer barajların sismik performansını, yapının lineer dinamik analizinden elde edilen çekme gerilmelerine bağlı olarak incelemiştir. Kemer barajlar için performans eğrisi, talep-kapasite oranları ve betonun çekme dayanımını aşan gerilmelerden elde edilen toplam yığışım süre kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, hasar modları yaklaşımı kullanılarak kemer barajların güvenliği belirlenmeye çalışılmıştır. Hasar modları yaklaşımının, kemer barajların sismik performansını ve olası hasar seviyelerini belirlemede sistematik bir yöntem sağladığı vurgulanmıştır.

Karaton (2004), Tip-5 kemer barajının sismik hasar davranışını baraj-rezervuar etkileşimini dikkate alarak incelemiştir. Çalışmada, barajın boş ve dolu olması durumları için lineer ve lineer olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Dinamik etki olarak 1967 Koyna ve 1992 Erzincan depremi ivme kayıtları kullanılmıştır. Çalışmada, hasarların daha çok tabana, yamaçlara ve krete yakın bölgelerde olduğu vurgulanmıştır.

Lotfi ve Espandar (2004), kemer barajların lineer olmayan sismik davranışını incelemek için kullanılan mevcut yaklaşımlardan ayırık çatlak yöntemi ve ortogonal olmayan yayılı çatlak yöntemini birlikte kullanarak özel bir sonlu eleman programı geliştirmişlerdir. Bu programla bir kemer barajın lineer olmayan dinamik davranışı incelenmiş ve elde edilen sonuçlar diğer basitleştirilmiş yöntemlerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayırık çatlak ve ortogonal olmayan yayılı çatlak yöntemlerinin bir arada bulunduğu modelin analizinden elde edilen sonuçların, sadece ayırık çatlak yönteminin veya ortogonal olmayan yayılı çatlak yönteminin bulunduğu modelin analizinden elde edilen sonuçlardan daha gerçekçi olduğu vurgulanmıştır.

Noble ve Nuss (2004), Morrow Point Kemer Barajı'nın lineer olmayan dinamik davranışını araştırmışlardır. Rezervuar etkisi Westergaard yaklaşımıyla dikkate alınmış, temel modeli rijit ve esnek durumlar için incelenmiştir. Barajın dinamik karakteristikleri bu baraj için daha önceden yapılmış çalışmalardan (Duron ve Hall, 1988; Fenves vd., 1992; Tan ve Chopra, 1996) elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

Shahkarami vd. (2004), İran'ın en önemli barajlarından biri olan Karun III Kemer Barajı'nı sonlu eleman yöntemiyle baraj-rezervuar-temel etkileşimini dikkate alarak modellemişler ve analizini yapmışlardır. Sistemin sonlu eleman modeli ANSYS programıyla oluşturulmuş ve modelde toplam 37000 sonlu eleman kullanılmıştır. Baraj ve temele ait güvenlik faktörleri basınç ve çekme gerilmesi olarak tanımlanmıştır. Temel modelinde kullanılan elemanların basınç emniyet faktörü Hoek-Brown kırılma kriteriyle

tanımlanmıştır. Bu emniyet faktörlerini kullanarak baraj ve temelin kritik bölgeleri belirlenmiş ve bu bölgelerde incelemeler yapılmıştır.

Mirzabozorg ve Ghaemian (2005), kemer barajların üç boyutlu lineer olmayan dinamik davranışını yayılı çatlak yaklaşımını kullanarak incelemiştir.

Alves ve Hall (2006a), Pacoima Kemer Barajı'nın sismik davranışını üniform ve üniform olmayan yer hareketleri kullanarak incelemiştir. Çalışma sonucunda, üniform ve üniform olmayan kayıtlar için elde edilen davranışlardaki farklılıklar belirtilmiş ve üniform olmayan yer hareketinin önemi vurgulanmıştır.

Sheibany ve Ghaemian (2006), İran'daki Karaj Kemer Barajı'nın yapımı sırasında çevresel etkilerden dolayı oluşan sıcaklık değişimlerinin baraj davranışına etkisini sonlu eleman yöntemiyle incelemiştir.

Sevim vd. (2006), geometri değişiminin kemer barajların dinamik davranışı üzerindeki etkisini incelenmiştir. Çalışmada, 1968'de İngiltere'de düzenlenen "Kemer Barajlar" sempozyumunda sunulan iki tanesi tek eğrilikli, üç tanesi çift eğrilikli olan beş farklı geometriye sahip kemer barajın üç boyutlu sonlu eleman modelleri hazırlanmış ve dinamik analizleri SAP2000 programı ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde baraj sınırları ankastre kabul edilip, baraj-rezervuar etkileşimi, Westergaard tarafından geliştirilen kütle ekleme yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmıştır. Dinamik hareket olarak, 18 Mayıs 1940 El-Centro depreminin kuzey-güney bileşeni kullanılmıştır. Çalışmada, çift eğrilikli kemer barajların deprem yüklerine karşı daha dirençli oldukları, üzerlerine gelen yükleri yamaçlara daha kolay aktardıkları, dolayısıyla geometrik açıdan çift eğriliğe sahip barajların en uygun baraj tipi olduğu vurgulanmıştır.

Akköse vd. (2007), Lagrange yaklaşımına göre baraj-rezervuar etkileşimi içeren Tip-5 kemer barajının elasto-plastik deprem davranışını Wilson- $\theta$  yöntemine göre incelemiştir. Elasto-plastik malzeme modeli Drucker-Prager yaklaşımıyla temsil edilmiştir. Çalışmada Tip-5 kemer barajının boş ve dolu olması durumları için lineer ve elasto-plastik dinamik analizler gerçekleştirilerek, sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Du vd. (2007), kemer baraj-temel etkileşiminin lineer olmayan davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, Xiaowan Kemer Barajı sonlu eleman yöntemi ve yansıtmayan sınırlar kullanılarak modellenmiş ve zaman ortamında analiz edilmiştir.

Akköse vd. (2008), rezervuardaki su seviyesi değişiminin kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada beş farklı su seviyesi için Tip-5 kemer barajının üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve

1940 Imperial Valley depreminin Elcentro bileşeni kullanılarak dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde; su davranışı Lagrange yaklaşımıyla, lineer olmayan malzeme modeli Drucker-Prager yaklaşımıyla temsil edilmiştir. Çalışmada, su seviyesi arttıkça kemer barajda oluşan yerdeğiştirme ve gerilmelerin arttığı, dolayısıyla kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışlarının belirlenmesinde rezervuardaki su seviyesinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Bayraktar vd. (2008a), kemer barajların sismik performansını farklı depremlerin ivme kayıtlarını kullanarak incelemiştir. Çalışmada, Tip-5 kemer barajı baraj-rezervuar-temel etkileşimi içerecek şekilde üç boyutlu olarak ANSYS sonlu eleman programında modellenmiştir. Modelde temel kütsüz olarak, rezervuar davranışı ise Lagrange yaklaşımıyla temsil edilmiştir. Tip-5 kemer barajının lineer dinamik analizleri Imperial Valley (1940), Parkfield (1966) ve Mammoth Lakes (1980) deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve barajın sismik performansı, analizlerden elde edilen çekme gerilmesi değerlerine göre çizilen talep-kapasite oranı ve elastik olmayan yığışimli süre grafikleri ile belirlenmiştir. Bu çalışmaya ek olarak Bayraktar vd. tarafından, kemer barajların lineer ve lineer olmayan davranışları, baraj-temel-rezervuar etkileşimleri, yakın ve uzak fay etkisi gibi konularda gerçekleştirilmiş çalışmalar da mevcuttur (Bayraktar vd., 2007b; Bayraktar vd., 2007c; Bayraktar vd., 2007d; Bayraktar vd., 2008b; Bayraktar vd., 2009a; Bayraktar vd., 2009b; Bayraktar vd., 2009c).

Lemos vd. (2008), 127 m yüksekliğe sahip çift eğrilikli Cabril Kemer Barajı'nın dinamik davranışını bağlantı noktalarının etkisini dikkate alarak incelemiştir. Çalışmada Cabril Barajı'nın, baraj-rezervuar-temel etkileşimini içeren üç boyutlu sonlu eleman modeli, bağlantı noktalarının olması ve olmaması durumları için oluşturulmuştur. Çalışmada farklı su seviyelerine sahip rezervuar davranışı Westergaard yaklaşımıyla temsil edilmiştir.

Long vd. (2008), Çin'deki çift eğrilikli Dagangshan Kemer Barajı'nın lineer olmayan dinamik davranışını baraj-rezervuar-temel etkileşimine sahip iki farklı sonlu eleman modeli geliştirerek incelemiştir. Dagangshan Kemer Barajı 210 m yüksekliğe, 622 m kret uzunluğuna sahiptir. İlk sonlu eleman modelinde barajın gövde kısmı beton olarak tasarlanmıştır. İkinci sonlu eleman modelinde baraj gövdesi beton ve betonun hem memba hem de mansap yüzünü saran betonarme çeliği özelliklerine sahip ince membran elemanlarla tasarlanmıştır. Her iki durum için yapılan modal analizde, membran miktarı betona göre çok az olduğundan frekans değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Fakat

yapılan dinamik analizde, çelik hasırla kaplı barajda depremden dolayı meydana gelen yerdeğişmelerde ve gerilmelerde önemli ölçüde azalmalar olduğu vurgulanmıştır.

Zhong vd. (2009), Çin'de 296 m yüksekliğe sahip çift eğrilikli bir kemer barajın lineer olmayan deprem davranışını incelemiştir. Beton davranışı Mohr-Coulomb kriteriyle temsil edilmiştir. Çalışmada barajın yamaç sınır şartları rijit kabul edilmiş, su etkisi Westergaard yaklaşımına göre dikkate alınmıştır. Toplam 73728 katı eleman kullanılarak sistem modellenmiş ve pik değeri 0.408 g olan bir depremin üç yönlü bileşeni için analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, barajda ilk çatlakların kretin orta noktasında oluştuğu ve daha sonra yamaçlara ve orta bölgelere doğru dağıldığı vurgulanmıştır.

Wen vd. (2009), Çin'deki Dagangshan Kemer Barajı'nın lineer olmayan davranışını sonlu eleman yöntemini kullanarak oluşturdukları beton hasar modeli, bağlantı noktaları modeli ve iki farklı deprem modelini dikkate alarak incelemiştir. Deprem etki modelleri olarak kütsüz ve vizkoz-yay sınır modeli kullanılmıştır. Çalışmada, kütsüz temel modelinde dalga yayılım hızı sonsuz kabul edildiği için gelen deprem dalgası direk baraj-temel arayüzüne etkilediği ve temelin sadece esnekliğinden yararlandığı; buna karşın vizkoz-yay modelinde temel sınırları yay elemanlarla modellenerek temelin sönüm etkilerinin dikkate alındığı belirtilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, kütsüz modelde %5 sönüm oranı kullanılarak elde edilen yerdeğiştirme, bağlantı noktalarının açılma miktarı ve hasar seviyesinin; %5 sönüm oranı kullanılarak oluşturulan vizkoz-yay sınır modelinden elde edilenlerden daha büyük olduğu vurgulanmıştır. Sonuçların ancak yüksek sönüm oranına (%15-20) sahip kütsüz temel modeli için %5 sönüm oranına sahip vizkoz-yay sınır modeline yaklaştığı, dolayısıyla vizkoz-yay sınır modelinin kemer barajların lineer olmayan davranışlarının belirlenmesinde kullanılmasının daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Sevim vd. (2010a), rezervuar uzunluğu ve yüksekliğinin kemer barajların deprem davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, Tip-5 kemer barajının deprem davranışı Imperial Valley (1940) yer hareketi kaydı kullanılarak belirlenmiştir.

### **1.2.2. Deneysel Çalışmalar**

Bu kısımda küçültülmüş model ve gerçek kemer barajların dinamik davranışlarıyla ilgili literatürde yapılan deneysel çalışmalar sırasıyla laboratuvar ve arazi çalışmaları olarak verilmektedir.

### 1.2.2.1. Laboratuvar Çalışmaları

Zhou vd. (2000), kemer barajların sismik kırılma davranışlarını laboratuvar ortamında oluşturdukları modeller üzerinde araştırmışlardır. Bu amaçla Çin'de yapılması planlanan, 292 m yüksekliği ile Dünyanın en yüksek kemer barajı olacak Xiao Wan Barajı'nın sismik davranışını ve hasar durumlarını belirlemek için bu barajın 1:350 ölçeğine göre küçültülmüş 20 farklı modeli laboratuvar ortamında inşa etmişlerdir. Modellerde suyun etkisi, deneylerin fazlalığı ve zorluğu nedeniyle dikkate alınmamıştır. Laboratuvar modelinin yüksekliği 83.4 cm, kret uzunluğu 268.8 cm olarak yapılmıştır. 20 model A, B, C, D gibi dört farklı gruba sınıflandırılmıştır. Bu modellerin monolit olarak yapılan 9 tanesi A grubunda, bağlantı noktaları içeren 7 tanesi B grubunda, dolu savak içeren 2 tanesi C grubunda ve hem dolu savak hem de bağlantı noktası içeren 2 tanesi D grubunda yer almaktadır. Çalışmada öncelikle her bir modele zorlanmış titreşim testi uygulanarak modelin ilk üç doğal frekansı ve temel mod şekli belirlenmiştir. Daha sonra her bir model, 3x3m<sup>2</sup> ebatlarına sahip bir sarma tablası üzerine monte edilmiş ve temel mod esas alınarak titreştirilmiştir. Titreşimler, modellerde çatlaklar oluşuncaya kadar sürdürülmüştür. Çatlaklar genellikle barajın orta bölgesinde krete yakın yerlerde oluşmuştur. Çalışmada, her bir modelde oluşan hasar durumu ayrı ayrı değerlendirilmiş ve bağlantı noktalı modellerde oluşan hasarların fazlalığı nedeniyle, bu tür bir modellemenin kemer barajların lineer olmayan davranışlarının belirlenmesinde kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.

Oliveira ve Faria (2006), kemer barajların hasar seviyelerini tespit edebilmek için küçük ölçekli modeller kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu amaçla Portekiz'deki 110 m yüksekliğindeki Alto Lindoso Kemer Barajı'nın ve 96 m yüksekliğindeki Alqueva Kemer Barajı'nın 1:250 ölçekli modelleri laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Modellerde kullanılan beton malzemesinin sürekli hasar mekaniği modeli, çekme ve basınç gibi iki değişik hasar kriteri dikkate alınarak tanımlanmıştır. Modellerin birinde, baraj hasar görene kadar uygulanan yük sistematik bir şekilde artırılmıştır. Diğer baraj modelinde ise izin verilen maksimum yerdeğiştirme değerine kadar yükleme yapılmıştır. Barajların kret seviyesin biraz altında orta bölgelerde yüklemelere bağlı çatlaklar oluşmuştur. Deneysel olarak incelenen hasar senaryoları, bilgisayar ortamında oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerinde denenmiş ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla benzer olduğu görülmüştür.



Wang ve Li (2006), Çin'de yapılması planlanan 278 m yüksekliğe ve 612.5 m kret uzunluğuna sahip bir kemer barajın deprem davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla, barajın 1/300 ölçekli modeli rezervuar ve temel etkileşimi içerecek şekilde laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Barajla temel arasındaki etkileşimi temsil etmek ve temel ortamındaki dalga yayılımını modellemek için viskoz sıvı içeren sönümlü sınır kullanılmıştır. Oluşturulan modelde; baraj yüksekliği 92.6 cm, rezervuar uzunluğu 254.7 cm, temel uzunluğu ise yamaçlara doğru 320 cm, su yönünde 220 cm ve yüksekliği 133.3 cm olarak dikkate alınmıştır. Prototip modelin toplam kütlesi yaklaşık 19 ton olup model yedi tane bağlantı noktası içermektedir. Çalışmada öncelikle barajda su olmaması durumu için doğal frekanslar ve mod şekilleri deneysel ve analitik olarak belirlenmiştir. Barajın birinci frekansı deneysel ve analitik olarak sırasıyla 27.25 Hz ve 27.36 Hz elde edilmiştir. Dolayısıyla analitik modelde herhangi bir iyileştirme yapılmamıştır. Barajın modları simetrik ve antisimetrik olarak elde edilmiş ve sönüm oranı birinci mod için %4.5 olarak belirlenmiştir. Daha sonra barajın dinamik davranışını incelemek için farklı yapay deprem dalgaları sarma tablası kullanılarak üretilmiştir. Oluşan titreşimlerden dolayı barajın mansap yüzeyinde aşırı gerilmeler meydana gelmiştir. Baraj deprem yükünün artmasıyla lineer olmayan bir davranış sergilemeye başlamıştır. Sistemde meydana gelen hasar, barajın doğal frekansının düşmesine sebep olmuştur. Bununla birlikte barajda gözle görülür bir deformasyon oluşmamıştır.

Wang ve He, (2007), kemer barajlarda oluşan çatlakların doğal frekanslar üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, 80 m yüksekliğe, 209 m kret uzunluğuna sahip tek eğrilikli bir kemer baraj tasarlamışlardır. Tasarlanan bu barajın temel etkileşimini dikkate alan 1:100 ölçeğindeki üç boyutlu küçültülmüş modeli, laboratuvar ortamında inşa edilmiştir. Modelde, baraj gövdesi çimento hamurundan, zemin ise betondan yapılmıştır. Modelde sadece geometri ölçeklendirilmiş olup, malzeme üzerinde değişim yapılmamıştır. Çalışmada, baraj gövdesinde çeşitli oranlarda (0.25, 0.50, 0.75) lokal çatlaklar oluşturularak her bir durum için baraja zorlanmış titreşim testi uygulanmış ve doğal frekanslar elde edilmiştir. Zorlanmış titreşim testi için baraj gövdesine bir ivmeölçer yerleştirilerek darbe çekici yardımıyla frekans davranış fonksiyonları elde edilmiştir. Diğer taraftan, barajın sonlu eleman modeli oluşturularak istatistiksel sinir ağları yöntemine göre barajdaki çatlaklar modellenmiş ve her bir durum için frekanslar elde edilmiştir. Çalışmada hem zorlanmış titreşim yönteminde hem de sonlu eleman yönteminden elde edilen doğal frekanslar incelendiğinde; barajın hasarsız ve 0.25 oranında çatlak olması durumları için

frekansların birbirine yakın çıktığı, 0.5 ve 0.75 oranında çatlak olması durumları için ise frekanslarda gözle görülür bir azalma olduğu tespit edilmiştir.

Wang ve Li (2007), Çin'de yapımı devam eden 292 m yüksekliğindeki Xiao Wan Kemer Barajı'nın sismik davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, kemer baraj laboratuvar ortamında ölçeklendirilmiş olarak rezervuar ve temel etkileşimi içerecek şekilde inşa edilmiştir. Modelde baraj gövdesi briket kullanılarak, temel ise özel bir kauçuk malzeme kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada 5x5 m<sup>2</sup> ebatlarında bir sarsma tablası üzerine yerleştirilen baraj titreştirilmiş ve barajın frekans davranış fonksiyonları gövdesine yerleştirilen hassas ivmeölçerler kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada düşük ve yüksek su seviyeleri ile deprem hareketlerini içeren 18 farklı durum incelenmiştir. Çalışma sonunda oluşan titreşim hareketleri nedeniyle sistemde on bir adet lokal çatlak meydana gelmiş ve sistemin doğal frekansı %14 oranında azalmıştır. Fakat suyun hidrostatik basıncı karşısında baraj dayanımını yitirmemiştir.

#### **1.2.2.2. Arazi Çalışmaları**

Ziyad (1988), Morrow Point Kemer Barajı'nın dinamik davranışını ve suyun sıkışabilirlik etkisini, zorlanmış titreşim ve sonlu eleman yöntemleriyle incelemiştir. Baraj kretine iki tane sarsıcı yerleştirilmiş ve zorlanmış titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında barajdaki su seviyesi kretin 3-4 m aşağısındadır. Titreşim testlerinden barajın frekans davranış fonksiyonları elde edilmiştir. Deneysel sonuçları kıyaslamak için barajın analitik modeli oluşturulmuştur. Bilgisayar hafızasının yetersiz olması ve analizlerin çok uzun sürmesi sebebiyle barajın üç boyutlu modeli oluşturulamamış ve baraj geometrisi iki boyutlu olarak tanımlanmaya çalışılmıştır. Analitik çalışmadan elde edilen doğal frekansların zorlanmış titreşim yönteminden elde edilenlerden farklı çıkması üzerine barajın sonlu eleman modeli, malzeme özellikleri ve sınır şartları üzerinde değişimler yapılarak iyileştirilmiştir.

Ghanaat vd. (1992), Çin'deki Dongjiang Kemer Barajı'nın dinamik davranışını baraj-rezervuar-temel etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir. Bu amaçla, ilk olarak baraj ve baraj gölü çevresinde patlayıcı maddeler patlatılarak titreşim oluşturulmuş ve üç eksenli sismograflarla titreşim kayıtları alınmıştır. Daha sonra, yine patlayıcı maddeler kullanılarak baraj gölünde şok dalgalar oluşturmak suretiyle sistem titreştirilmiştir. Patlatmalara dayalı sistem titreşiminden elde edilen karakteristiklerin mevcut analitik

yöntemlerle yapılan analizlerden elde edilen karakteristiklerle birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ayrıca, sismik kırılma ve yansıma tekniklerine dayalı yaklaşımlar kullanılarak baraj gölündeki malzemenin yansıma katsayısı belirlenmeye çalışılmıştır.

Chouinard vd. (1995), Hindistan'daki 169 m yüksekliğindeki Idduki Kemer Barajı'nın dinamik karakteristiklerini ve sismik davranışını belirleyebilmek için baraja çevresel titreşim testleri uygulamışlardır. Bu amaçla, barajda mevsimsel ölçümler yapılmış ve asal bileşen analizi yaklaşımı kullanılarak istatistiksel bir prosedür oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu yaklaşımla kemer barajın dinamik davranışını belirleyebilmek için yapılan analiz sayısı azaltılmış ve gerekli iyileştirmeler yapılarak baraj davranışını daha iyi bir biçimde yansıtacak model ortaya konulmuştur.

Darbre (1995), kemer barajların dinamik karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan ivmeölçerlerin baraj üzerinde hangi noktalara yerleştirilmesi gerektiği yönünde bir çalışma yapmıştır. Çalışmada deneysel ölçümlerin gerekliliğinden bahsedilmiş ve mod şekillerinin doğru olarak elde edilmesi için baraj gövdesi ve temel üzerinde yeterli miktarda ivmeölçer kullanılması gerektiği vurgulanmıştır.

Minemura vd. (1998), Japonya'da sert iklim koşullarında yapılan bir kemer barajın güvenliğini belirlemek için akustik emisyon izleme testi yapmışlardır (Akustik emisyon; deformasyonlar, ötelenmeler ve çatlaklar yüzünden malzemede meydana gelen ani değişikliklerin oluşturduğu elastik dalgalardır). Testler yoğun kar altında ve çok düşük sıcaklıklarda yapılmıştır. Çalışmada 12 ivmeölçer baraj kretine, 4 ivmeölçer ise baraj gövdesi içine yerleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonunda, sert iklim koşullarında yapılan bir barajın güvenliği için akustik emisyon izleme testinin çok kullanışlı olduğu vurgulanmıştır.

Darbre vd. (2000), 250 m yüksekliğe ve 520 m kret uzunluğuna sahip Mauvoisin Kemer Barajı'nın dinamik davranışını rezervuarda farklı su seviyeleri bulunması durumları için araştırmıştır. Bu amaçla, Mauvoisin Kemer Barajı'nda yedi farklı su seviyesi için çevresel titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında barajdaki su yüksekliği 124-238 m arası değişmiştir. Ölçümlerde 5 V/g hassasiyetindeki ivmeölçerler baraj kretine ve gövde içerisindeki galerilere yerleştirilmiştir. Çalışmada ilk on beş doğal frekans 0-10 Hz arası elde edilmiş ve ilk iki mod sırasıyla antisimetrik ve simetrik olarak belirlenmiştir. Doğal frekanslarda 124-180 m arası biraz azalmalar gözlemlenirken, 180-238 m arası frekans değerlerinde büyük artışlar olmuştur. Çalışmada ayrıca, baraj etrafında 1994 ve 1996 yılları arasında meydana gelen üç depremden alınan ivme kayıtları kullanılarak

barajın doğal frekansları belirlenmiştir. Depremler sırasında barajdaki su seviyesi sırasıyla 234, 138 ve 183 m olarak tespit edilmiştir. Deneysel çalışmaların yanısıra, SAP90 programı kullanılarak barajın analitik modeli oluşturulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Analitik çözümden elde edilen doğal frekanslar deneysel ölçümlerden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Barajdaki su seviyesi farkı deneysel ve analitik çalışmalarda tam olarak temsil edilemediği için ve sıcaklık etkisinin dikkate alınmamasından dolayı sonuçlar arasında biraz farklılıklar oluşmuştur. Sonuçta, daha hassas modellemeler ve ölçümler gerçekleştirilerek barajların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Ghanaat vd. (2000a), Çin'deki Longyangxia Kemer Barajı'nda baraj-rezervuar-temel etkileşimini de dikkate alarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada ilk olarak baraj ve baraj gölü patlayıcı madde kullanılarak titreştirilmiştir ve sistemin davranışı ivmeölçerler, basınç sensörleri ve üç eksenli sismograflar kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Daha sonra rezervuar sınırları için ortalama yansıma katsayısı, akustik yansıma içeriğine sahip yeni bir yöntem geliştirilerek ölçülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar uygulanan yöntemin iyi bir seçenek olduğunu ve akustik yansıma tekniğinin bütün rezervuara ait genel yansıma katsayısını ölçmek için pratik bir prosedür içerdiğini göstermektedir. Ayrıca baraj tabanından elde edilen ivme kayıtları kullanılarak sistemin analitik çözümü yapılmıştır. Analitik ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ghanaat vd. (2000b), bu deneysel çalışmaya ek olarak, kemer barajların davranışını bilgisayar ortamında yaptıkları sonlu eleman modeline çeşitli ivmeölçerler yerleştirerek incelemişler ve benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Eğer analizlerde üniform olmayan deprem kayıtları kullanılacaksa daha kapsamlı bir çalışma yapmanın faydalı olacağını vurgulamışlardır.

Cantieni (2001), kemer barajların dinamik davranışlarını belirleyebilmek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, 170 m kret uzunluğuna ve 46 m yüksekliğe sahip Norsjö Kemer Barajı'nın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Baraja öncelikle çevresel titreşim testi uygulanmış ve barajın temel doğal frekansı 3.2 Hz olarak bulunmuştur. Doğal frekansın küçük çıkmasından dolayı EMPA tipi titreştiricilerle barajın dinamik karakteristiklerinin daha net belirlenebileceği düşünülmüş ve baraja zorlanmış titreşim testi uygulanmıştır. Titreştirici maksimum 32 kN gücünde olup yatayda 1000 kg'lık hareketli bir kütleye sahiptir. Barajda 270 noktadan 10 V/g hassasiyetine sahip üç eksenli ivmeölçerlerle kayıt alınmıştır. Ölçümlerden toplanan sinyaller LSCE algoritması

kullanılarak işlenmiş ve barajın ilk 12 doğal frekansı, mod şekli ve sönüm oranı belirlenmiştir. Doğal frekanslar 3-13.5 Hz arası, mod şekilleri ise, simetrik, antisimetrik ve düşey eğilme modları olarak elde edilmiştir. Barajın dinamik karakteristiklerini analitik olarak belirlemek için sonlu eleman modeli özel MARC programında oluşturularak analiz edilmiştir. Analizler sonucunda analitik dinamik karakteristiklerin deneysel olarak elde edilenlerden biraz farklı çıktığı belirtilmiştir. Barajın sonlu eleman modeli deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir.

Proulx vd. (2001), kemer baraj-rezervuar-temel sistemlerinin dinamik davranışını belirleyebilmek için, deneysel ölçümler yapmış ve bu ölçümlerin sonuçlarına göre analitik modelleri iyileştirmişlerdir. Bu amaçla, İsviçre’de Emossen Kemer Barajı üzerinde farklı su seviyelerinin barajın dinamik davranışına etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu baraj 1974 yılında inşa edildiğinde 180 m yüksekliği ve 550 m kret uzunluğu ile Dünyadaki on beşinci büyük kemer barajdı. Rezervuardaki farklı su seviyeleri için baraj üzerinde zorlanmış titreşim yöntemi kullanılarak bir yıl içerisinde dört farklı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde HP3852a tipi veri toplama ünitesi ve iki adet eksantrik kütle titreştirici kullanılmıştır. Barajın kretine ve gövdesine yerleştirilen ivmeölçerlerden, memba-mansap doğrultusundaki ivme kayıtları ve frekans davranış fonksiyonları elde edilmiştir. İvme kayıtları ve frekans davranış fonksiyonları kullanılarak barajın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, artan su seviyesi ile barajın dinamik davranışının değiştiği belirlenmiştir. Artan su seviyesine bağlı olarak ilave kütle etkilerinin artmasına rağmen frekansların arttığı görülmüştür. Su seviyesinin belli bir değeri aşması durumunda ise frekansların azaldığı görülmüştür. Farklı su seviyeleri için bulunan frekans değerleri kullanılarak, barajın analitik modeli iyileştirilmiş ve barajın gerçek davranışını temsil eden model elde edilmiştir. Bu çalışmada, mevcut barajların dinamik davranışının doğru bir şekilde belirlenebilmesi için analitik çalışmaların deneysel modal analiz yöntemleriyle desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir.

Darbre ve Proulx (2002), 250 m yüksekliğindeki Mauvoisin Kemer Barajı’nın doğal frekanslarını ve mod şekillerini baraja çevresel titreşim testleri uygulayarak belirlemeye çalışmışlardır. Bu amaçla baraj kretine otomatik bir veri toplama sistemi kurarak altı ay boyunca günde iki defa ölçüm almışlardır. Ölçümler sırasında su seviyesi baraj tabanından itibaren 120-250 m arası değişmiştir. Altı ay boyunca barajdaki su seviyesi değişken olduğundan su yüksekliğinin barajın doğal frekansları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan incelemelerde barajın doğal frekanslarının 120-180 m arası arttığı, 180-250 m

arasında ise büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Çalışmada barajın ilk iki ve altıncı mod şekli güzel bir şekilde elde edilirken üç, dört ve beşinci modların tam olarak elde edilemediği belirtilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar barajda daha önceden gerçekleştirilen çevresel ve zorlanmış titreşim testlerinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Ayrıca, ölçümlerin gerçekleştirilmesi ve verilerin işlenmesi gibi konulardaki fiziki zorluklardan bahsedilmiştir.

Duron vd. (2003), California'daki Florance Lake Kemer Barajı'nın dinamik karakteristiklerini baraj rezervuarının boş ve dolu olması durumunda analitik ve deneysel olarak belirlemişlerdir. Florance Lake Kemer Barajı, 46 m yüksekliğe sahip olup, 58 kemerden oluşmaktadır. Barajın kret uzunluğu yaklaşık 962 m'dir. Çalışmada öncelikle, barajın en uzun 9 kemeri seçilerek EACD-3D sonlu eleman programında, baraj-rezervuar-temel etkileşimini içerecek şekilde modellenmiştir. Daha sonra baraj üzerinde seçilen kemer parçalarına ivmeölçerler yerleştirilerek çevresel titreşim yöntemiyle 37 noktadan sinyaller toplanmıştır. Toplanan sinyaller işlenerek barajın dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, rezervuarın boş ve dolu olması durumunda elde edilen analitik ve deneysel verilerin birbiriyle uyumlu olduğu vurgulanmıştır.

Mivehchi vd. (2003), İran'daki iki büyük kemer barajın dinamik karakteristiklerini deneysel ve analitik olarak araştırmışlardır. Çalışmada uygulama için sırasıyla 138 m ve 128 m yüksekliğe sahip Shahid-Rajae ve Saveh Kemer Barajları seçilmiştir. Ölçümler sırasında Shahid-Rajae ve Saveh Barajları'ndaki su seviyesi sırasıyla kretten 18 m ve 47.5 m aşağıdadır. Titreşim testlerinden sağlıklı veriler toplanabilmesi için ölçümler gece, gündüz, rüzgarın değişik yönlerden esmesi koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her iki barajın ilk beş modu simetrik ve antisimetrik olarak elde edilmiş ve sönüm oranları yaklaşık %1 civarında belirlenmiştir. İlk beş doğal frekans ise Shahid Rajae Barajı'nda 1.46-3.58 Hz arası, Saveh Barajı'nda 3.91-7.61 Hz arası elde edilmiştir. Her iki baraj için baraj-rezervuar-temel etkileşimini içeren üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturularak analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve analitik sonuçlar arasında farklılıklar olduğu belirtilmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalar için, deneysel ölçümlerin daha hassas gerçekleştirilmesi, sonlu eleman modellerin daha kesin kabullere dayalı hazırlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Baptista vd. (2004) ve Mendes vd. (2004), farklı yapıların dinamik karakteristiklerini belirlemek için gerçekleştirdikleri çalışmalar kapsamında, Portekiz'deki Cabril Kemer Barajı'na çevresel titreşim testleri uygulamışlardır. Çevresel titreşim testlerinden elde

edilen veriler ARTEMIS yazılımında işlenmiş, dinamik karakteristikler Frekans Ortamında Ayırıştırma ve Stokastik Altalan Belirleme yöntemleriyle belirlenmiştir. Barajın sonlu eleman modeli oluşturularak dinamik karakteristikler analitik olarak belirlenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. İlk dört doğal frekans 0-5 Hz arasında olup, rezervuardaki su seviyesinin artmasıyla birlikte frekans değerlerinde azalma olduğu belirtilmiştir.

Alves ve Hall (2006b), 113 m yüksekliğe sahip Pacoima Kemer Barajı'nın dinamik karakteristiklerini deprem kayıtlarını, zorlanmış titreşim testlerini ve sonlu eleman yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Çalışmada öncelikle 1994 Northridge depreminden ve 2001 yılında meydana gelen 4.3 büyüklüğündeki bir depremden alınan ivme kayıtları MODE-ID adı verilen bir program ile işlenmiştir. Northridge depremi verilerine göre barajın ilk iki doğal frekansı 4.8 Hz ve 5.2 Hz olarak, mod şekilleri ise simetrik ve antisimetrik olarak elde edilmiştir. 2001 yılı kayıtlarına göre ise barajın ilk iki doğal frekansı 4.73 Hz ve 5.06 Hz olarak; mod şekilleri ise sırasıyla simetrik ve antisimetrik olarak elde edilmiştir. Modlar için elde edilen sönüm oranları ise sırasıyla %6.2 ve %6.8'dir. 2001 yılında meydana gelen deprem baraja 6 km mesafede olup barajda maksimum 0.16 g'lik bir ivme oluşturmuştur. Kayıtlar baraj üzerinde çeşitli noktalara yerleştirilen 17 ivmeölçerden alınmıştır. MODE-ID programından elde edilen sonuçlar, baraja 1980 yılında uygulanmış zorlanmış titreşim testi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Zorlanmış titreşim testlerinden elde edilen frekans ve sönüm oranı değerlerinin MODE-ID programından elde edilenlerden yüksek çıkması sebebiyle 2002 yılında baraja tekrar zorlanmış titreşim testleri uygulanmıştır. Titreşitirici olarak eksantrik kütle sarsıcı kullanılmıştır. Bu testlerden elde edilen doğal frekans ve sönüm oranları ilk testlere göre azalmasına karşın MODE-ID programından elde edilenlerden biraz yüksek çıkmıştır. Dinamik karakteristikler arasındaki uyumsuzluk depremler ve zorlanmış titreşim testleri sırasında rezervuarda bulunan su seviyesi farkına bağlanmıştır. 1980 ve 2002 yıllarında gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi sonuçlarının farklı çıkmasının sebebi ise yine rezervuardaki farklı su seviyelerine veya 2001 yılında meydana gelen depremin, barajın rijitliğini azaltmış olabileceğine bağlanmıştır. Bu çalışmada son olarak, Pacoima Kemer Barajı'nın dinamik davranışı sonlu eleman yöntemiyle belirlenmiştir. Barajın üç boyutlu modeli rezervuar suyunun sıkışmaz, temelin ise kütesiz olması kabulüne göre oluşturulmuştur. Modelde su yüksekliği 2001 ve 2002 yılındaki yükseklik dikkate alınarak 38 m seçilmiştir. Su uzunluğu 206 m alınmış, temel sağ ve sol yamaçta 152 m, memba-

mansap doğrultusunda 73 m kadar uzutulmuştur. Barajın analitik frekanslarının deneysel frekanslarla örtüşmesi için beton birim hacim ağırlığı  $22.3 \text{ kN/m}^3$  ve Poisson oranı beton ve temel için sırasıyla 0.2 ve 0.25 seçilmiş, betonun ve temelin elastisite modülü değişken olarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerde elastisite modülleri beton ve temel için sırasıyla 28.1 ve 13.9 GPa olarak alınmıştır. Benzer şekilde MODE-ID programından elde edilen frekanslar da zorlanmış titreşim testi sonuçlarına göre iyileştirilmiştir. Bu durumda elastisite modülleri beton ve temel için sırasıyla 21.9 ve 10.9 GPa olarak hesaplanmıştır. Eğer temel rijit olarak kabul edilseydi betonun elastisite modülü 16.6 GPa olarak bulunacaktı. Dolayısıyla çalışmada esnek temel modelinin daha anlamlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Uygun olan sonlu eleman modeli belirlendikten sonra barajın dinamik analizleri 2001 yılı deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Yapılan literatür araştırmasının ilk kısmında kemer barajların dinamik davranışlarını belirlemeye yönelik pek çok analitik çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmaların en önemli amacı, kemer baraj davranışını en iyi şekilde temsil edecek analitik modeli ve analiz yöntemini geliştirmektir. Bu bakımdan birçok çalışmada, kemer baraj davranışı farklı açılardan ele alınmış, fakat analitik çalışmalar pek çok kabule dayandığı için araştırmacılar bu çalışmaların deneysel olarak desteklenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Literatür araştırmasının ikinci kısmı incelendiğinde, kemer barajların dinamik davranışlarını belirlemeye yönelik çevresel ve zorlanmış titreşim testlerini içeren yeterince deneysel çalışma yapılmadığı, mevcut çalışmaların ise fiziksel zorluklar nedeniyle çok kapsamlı olmadığı anlaşılmaktadır.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında, kemer barajların dinamik davranışlarının analitik ve deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, hem laboratuvar ortamında küçük ölçekli bir kemer baraj modeli hem de arazi ortamında gerçek bir kemer baraj için analitik ve deneysel çalışmalar yapılarak, barajların dinamik davranışları araştırılmaktadır. Laboratuvar uygulaması için, İngiltere’de 1968 yılında gerçekleştirilen “Arch Dams” sempozyumunda sunulan beş farklı tip barajdan Tip-1 kemer barajı (Arch Dams, 1968); arazi çalışmaları kapsamında, Ülkemizdeki mevcut en büyük kemer baraj olan Berke Barajı seçilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan tez üç bölümden oluşmaktadır.



Birinci bölümde, genel bilgiler üzerinde durulmakta, konuyla ilgili yapılmış çalışmalara yer verilmekte ve konunun önemi vurgulanmaktadır. Bu bölümde, tez çalışmasının analitik kısmını oluşturan; kemer barajların sonlu eleman yöntemiyle modellenmesi, Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı-yapı etkileşimi formülasyonu, dinamik analizde kullanılan Newmark yöntemi ve kemer barajların deprem davranışı için performans kriterleri ve tez çalışmasının deneysel kısmını oluşturan; deneysel modal analiz, deneysel ölçüm sistemleri ve yöntemleri, deneysel yöntemlere ait formülasyon gibi konulara yer verilmektedir. Bu bölümde son olarak, analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasının yapıldığı modal güvence kriterinden bahsedilmektedir.

İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölüm, laboratuvar ve arazi çalışmaları olarak iki kısma ayrılmaktadır. Birinci kısımda uygulama için seçilen Tip-1 kemer barajının küçük ölçekli modelinin boyutlandırılması, laboratuvar ortamında inşası ve malzeme özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan bahsedilmektedir. Bu kısımda, laboratuvar modelinin farklı rezervuar yüksekliklerine ve uzunluklarına ait durumları için oluşturulan sonlu eleman modellerine ve uygulanan çevresel ve zorlanmış titreşim testlerine yer verilmektedir. Tip-1 kemer barajının analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri birbiriyle karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır. Arazi çalışmalarının yer aldığı ikinci kısımda, uygulama için seçilen Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinin oluşturulmasından ve barajda gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden bahsedilmekte, barajın analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri belirlenmektedir. Berke Barajı'nın sonlu eleman modeli deneysel sonuçlara göre iyileştirilmektedir. Bu kısımda son olarak Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri için gerçekleştirilen deprem analizlerine yer verilmekte ve analizlerden elde edilen bulgular sunulmaktadır.

Üçüncü bölümde tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

#### **1.4. Kemer Barajların Sonlu Eleman Yöntemiyle Modellenmesi**

Kemer barajlar, narin bir kesite sahip olduklarından dinamik davranışlarının hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, üç boyutlu sonlu eleman modeline ihtiyaç vardır. Bunun yanı sıra kemer barajlar, depremler esnasında hem rezervuardaki suyla hem de yerleştirdikleri vadinin zeminiyle etkileşim içerisinde olurlar. Dolayısıyla

kemer barajlar için gerçekçi bir sonlu eleman modeli, baraj-rezervuar-temel etkileşimini içermelidir.

#### 1.4.1. Baraj Modeli

Bir kemer baraj, üç boyutlu katı veya kabuk elemanlarla modellenmektedir. Bununla birlikte, 8-düğüm noktalı katı elemanlarla modellenen bir kemer barajın sonlu eleman ağı; geometrisi ve yerdeğiştirmeleri kuadratik fonksiyonları içeren kabuk elemanlarla modellenen bir kemer barajın sonlu eleman ağına göre daha daha sıkı olmalıdır (USACE, 2003). Baraj modeli için sonlu eleman ağına seçimi sonuçların doğruluğı için çok önemli olmaktadır. Genellikle barajın geometrisi, kret ve taban genişliğı, eğrilik yarıçapı ve açısı, eleman tipi ve düğüm noktası sayısı, analiz tipi (lineer veya lineer olmayan), dinamik karakteristikler, gerilme ve yerdeğiştirme gibi fiziksel ve yapısal özelliklere bakılarak optimum bir sonlu eleman ağı seçilmektedir. Bunun için çeşitli eleman tiplerine ve boyutlara sahip farklı sonlu eleman ağları oluşturularak analiz edilebilmekte ve sonuçlara göre değerlendirme yapılabilmektedir (USACE, 1994). Barajın lineer davranışı belirlenecekse sonlu eleman modeli yekpare olarak oluşturulabilmektedir; eğer lineer olmayan davranış belirlenecekse sonlu eleman modelinde bağlantı noktaları dikkate alınmalıdır (Karaton, 2004; Lemos, 2008).

#### 1.4.2. Rezervuar Modeli

Dinamik bir etki sırasında rezervuarda bulunan su barajın davranışını önemli ölçüde etkilemektedir Çünkü hidrostatik fazlası hidrodinamik basınçlar oluşmakta ve baraj gövdesinde ilave yükler meydana gelmektedir. Bu sebeple rezervuar ile baraj arasında oluşan etkileşimin doğru modellenmesi gerekmektedir. Literatürde barajla rezervuar arasındaki etkileşim genellikle üç yaklaşımla temsil edilmektedir:

- ✓ Westergaard (1933) Yaklaşımı,
- ✓ Euler Yaklaşımı (Dungar, 1978),
- ✓ Lagrange Yaklaşımı (Wilson ve Khalvati, 1983).

Westergaard (1933) yaklaşımında, barajın rijit ve düşey memba yüzeyli, rezervuarın sonsuz uzunlukta, suyun lineer sıkışabilir olduğı ve yüzey dalgalarının oluşmadığı kabul

edilmektedir. Bu yaklaşımda, barajda oluşan hidrodinamik basınç, barajla birlikte titreşen ek bir kütle olarak dikkate alınmaktadır. Bu sebepten Westergaard yaklaşımına eklenmiş kütle yaklaşımı da denmektedir. Bunun için, hidrodinamik basınçlar tekil kütlere dönüştürülerek memba yüzeyindeki düğüm noktalarına eklenmektedirler. Düğüm noktalarına etkiyen tekil kütleler;

$$m(z_s) = \frac{7}{8} \frac{w_s}{g} \sqrt{H_s z_s} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $m$  tekil kütle,  $w_s$  suyun birim hacim ağırlığını,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $H_s$  su yüksekliğini ve  $z_s$  su yüzeyinden itibaren derinliği göstermektedir. Eğriliğe sahip yüzeylerde, deprem doğrultusu ile baraj memba yüzeyi normali arasındaki açı dikkate alınarak tekil kütleler hesaplanmaktadır (Priscu vd., 1985).

Euler yaklaşımında (Dungar, 1978), baraj modelinin düğüm noktalarındaki bilinmeyenler yerdeğiştirmeler cinsinden, su modelinin düğüm noktalarındaki bilinmeyenler basınçlar cinsinden ifade edilmektedir. Bu nedenle, baraj-rezervuar arasındaki etkileşimi temsil etmek için özel arayüzey denklemleri kullanmak gerekmektedir. Bu arayüzey denklemleri, büyük bant genişliklerine sahip simetrik olmayan sonlu eleman denklemleri ortaya çıkarmaktadır.

Lagrange yaklaşımında (Wilson ve Khalvati, 1983), hem baraj hem de su modelinin düğüm noktalarındaki serbestlikler yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edilmektedir. Dolayısıyla, baraj ve rezervuar arasındaki etkileşimi temsil etmek için özel arayüzey denklemlerine gerek yoktur. Çünkü arayüzeydeki düğüm noktalarında uygunluk ve denge denklemleri doğrudan sağlanmaktadır. Ayrıca bu yaklaşımda, oluşturulan denklemler hem simetrik hem de daha küçük bant genişliğine sahiptir.

Euler ve Lagrange yaklaşımlarına göre oluşturulan sonlu eleman modelinde, rezervuar memba yönünde baraj yüksekliğinin en az üç katı kadar uzatılmalıdır. Çünkü bu mesafede dinamik etkiden dolayı rezervuarda oluşacak hareketlenmenin baraj gövdesinde meydana getireceği hidrodinamik basınç ihmal edilebilecek kadar azdır (USACE, 2003).

### 1.4.3. Temel Modeli

Temel modeli doğal frekanslarda azalmalara sebep olacağından barajın deprem davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Temel-baraj etkileşimi, baraj sınırlarında esneklik ve fazladan bir sönüm mekanizması sağlamaktadır. Sönüm mekanizması içerisinde sönüm ve atalet etkileri yer almaktadır. Sönüm mekanizmasının işleyebilmesi için temel sınırlarının viskoz, geçirgen veya yansıtmayan elemanlarla modellenmesi gerekmektedir. Bu işlem bilgisayara dayalı modellemede zorluk çıkardığından pek tercih edilmemektedir. Bu uygulamanın dezavantajlarını ortadan kaldırmak için temel-baraj etkileşimini içeren sonlu eleman modelinde temel kütsüz olarak dikkate alınmaktadır. Kütsüz temel modeli sistem üzerinde sadece esneklik sağlamakta, sönüm ve atalet etkileri ihmal edilmektedir. Bu durumda, dinamik analizlerden elde edilecek yerdeğıştirmelerin, gerilmelerin ve doğal frekansların çok fazla etkilenmemesi için temel modelini baraj sınırlarından itibaren her yöne doğru belli bir mesafe uzatmak yeterli olmaktadır. Bunun için literatürdeki kıstas temel ve barajın elastisite modülleri ( $E_t$  ve  $E_b$ ) oranıdır (USACE, 2003). Eğer,  $E_t / E_b \geq 1$  ise temel, hem memba ve mansap hem de yamaçlara doğru en az baraj yüksekliği kadar uzatılmalıdır. Eğer bu oran 0.5-0.25 ise daha esnek bir temel söz konusu olacağından temel her yönde baraj yüksekliğinin en az iki katı kadar uzatılmalıdır.

Kütsüz temel modelinde, deprem hareketinin üç bileşeni temel sınırlarına uygulanmaktadır. Fakat deprem dalgası kütsüz temelde herhangi bir enerji kaybına uğramayacağından doğrudan baraj gövdesine ulaşmaktadır. Bu durumda uygulanacak deprem kaydı ölçeklendirilerek etkisi azaltılabilmektedir (USACE, 2003).

### 1.5. Lagrange Yaklaşımı Kullanılarak Sıvı-Yapı Etkileşiminin Sonlu Eleman Yöntemine Dayalı Formülasyonu

Yapıların dinamik davranışını belirlemek için genellikle zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmektedir. Kemer barajlar arkalarındaki büyük su kütsesiyle etkileşim halinde bulduklarından uygulanacak dinamik analiz yöntemi suyun davranışını da kapsayacak şekilde olmalıdır. Tez kapsamında, kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin sonlu eleman modelleri Lagrange yaklaşımı kullanılarak oluşturulmuştur (Akköse, 2004). Bu kısımda, Lagrange yaklaşımına göre lineer elastik, sıkışabilir, dönmesi kısıtlanmış, viskoz olmayan ve küçük yerdeğıştirmeler yapabilen bir sıvı elemana ait

esaslar, sıvı davranışı ile ilgili temel bağıntılar, sıvı sisteminin ve sıvı-yapı sisteminin ortak formülasyonu verilmektedir.

### 1.5.1. Sıvı Davranışı ile İlgili Temel Bağıntılar

Bir sıvı elemanın üç boyutlu dalga hareketi,

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{C_s^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Zienkiewicz, 1964). Burada; P hidrodinamik basıncı (hidrostatik basınç fazlası), t zamanı, x, y, z kartezyen koordinatları göstermektedir.  $C_s$  sudaki ses hızı (veya sudaki basınç dalgalarının hızı) olup,

$$C_s = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho_s}} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $C_{11}$ , sıvının hacimsel elastisite modülünü,  $\rho_s$  ise sıvının kütle yoğunluğu göstermektedir.

Dinamik etkilere maruz sıvı sistemlerde hidrostatik basınçların yanı sıra oluşan hidrodinamik basınçlar, denklem (2)'nin uygun sınırı şartları altında çözülmesiyle elde edilmektedir. Bu sınır şartları genel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Akköse, 2004):

1) Sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgalarının oluştuğu kabul edilirse bu yüzeyler için sınır şartı,

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; z düşey eksen ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir. Sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgalarının oluşmadığı kabul edilirse bu sınır şartı aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$P = 0 \quad (5)$$

2) Sıvı serbest yüzeyi dışındaki yüzeyler (sıvı-yapı temas yüzeyleri) herhangi bir ivmeye maruz ise bu yüzeyler için sınır şartı,

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho_s a_n \quad (6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $n$  sıvı yüzeyi normalini,  $a_n$  ise bu normal doğrultusundaki ivmeyi göstermektedir. Eğer bu yüzeyler herhangi bir ivmeye maruz değilse bu yüzeylerde aşağıdaki sınır şartı geçerlidir:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

Lagrange yaklaşımına göre dönmesi kısıtlanmış ve viskoz olmayan lineer elastik bir sıvının küçük yerdeğişiklikler yapması durumunda basınç ile hacimsel şekil değiştirme arasında,

$$P = C_{11} \varepsilon_v \quad (8)$$

bağıntısı tanımlanmıştır (Wilson ve Khalvati, 1983; Calayır, 1994; Akköse, 2004). Burada;  $P$  ortalama gerilmeye eşit basıncı,  $C_{11}$  sıvının hacimsel elastisite modülünü,  $\varepsilon_v$  ise hacimsel şekil değiştirmeyi göstermektedir. Hacimsel şekil değiştirme  $\varepsilon_v$ , kartezyen koordinatlardaki şekil değiştirme bileşenleri ile,

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  sırasıyla  $x$ ,  $y$ ,  $z$  doğrultularındaki şekil değiştirme bileşenlerini göstermektedir. Benzer şekilde, hacimsel şekil değiştirme  $\varepsilon_v$ , kartezyen koordinatlardaki yer değiştirme bileşenleri ile.

$$\varepsilon_v = \frac{\partial U_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial U_{sy}}{\partial y} + \frac{\partial U_{sz}}{\partial z} \quad (10)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada;  $U_{sx}$ ,  $U_{sy}$ ,  $U_{sz}$  sırasıyla x, y, z doğrultularındaki yerdeğiştirme bileşenlerini göstermektedir.

Sıvının dönmeye karşı rijitliğini elde etmek için ceza yöntemi (Bathe, 1996; Zienkiewicz ve Taylor, 2000) kullanılmaktadır. Sıvının üç boyutlu durumda her kartezyen eksen etrafındaki dönme rijitliklerini belirleyen dönme denklemleri,

$$\left. \begin{aligned} w_x &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_{sy}}{\partial z} - \frac{\partial U_{sz}}{\partial y} \right) \\ w_y &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_{sz}}{\partial x} - \frac{\partial U_{sx}}{\partial z} \right) \\ w_z &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_{sx}}{\partial y} - \frac{\partial U_{sy}}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Wilson ve Khalvati, 1983; Greeves, 1991; Calayır, 1994; Akköse, 2004). Burada;  $w_x$ ,  $w_y$ ,  $w_z$  sırasıyla x, y, z eksenleri etrafındaki rijit cisim dönmelerini göstermektedir. Eleman şekildeğiştirmesi olarak dikkate alınan rijit cisim dönmeleri ile rijitlik parametreleri birlikte düşünüldüğünde gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı,

$$\left. \begin{aligned} P_x &= C_{22} w_x \\ P_y &= C_{33} w_y \\ P_z &= C_{44} w_z \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada;  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  dönmeye ait gerilmeleri,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ , dönel yay rijitlik katsayılarını veya rijitlik parametrelerini göstermektedir. Böylece üç boyutlu bir sıvı için gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları (8) ve (12) denklemleri kullnılarak matris formda;

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{P} \\ P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_v \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{Bmatrix} \quad (13)$$

veya

$$\boldsymbol{\sigma}_s = \mathbf{C}_s \mathbf{e}_s \quad (14)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada,  $\boldsymbol{\sigma}_s$  ve  $\mathbf{e}_s$  sırasıyla sıvının gerilme ve şekildeğiştirme vektörlerini,  $\mathbf{C}_s$  ise elastisite matrisini göstermektedir.

Sonlu eleman hareket denklemleri enerji prensiplerinden yararlanarak belirlenebileceğinden sıvı sistemlerin davranışları ile ilgili enerji bağıntılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bir sıvı sistemin potansiyel enerjisi iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, sistemin şekildeğiştirme enerjisidir. (14) denklemindeki temel bağıntı kullanılarak sıvı sistemin şekildeğiştirme enerjisi,

$$\pi_e = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{e}_s^T \mathbf{C}_s \mathbf{e}_s dV \quad (15)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada;  $\mathbf{e}_s$ ,

$$\mathbf{e}_s^T = [\varepsilon_v \quad w_x \quad w_y \quad w_z] \quad (16)$$

ile ifade edilen sıvı sistemin şekildeğiştirme vektörüdür.

Sıvı sistemlerin önemli davranışlarından biri de, hacimde bir değişim olmadan yerdeğiştirme yapabilmeleridir (Greeves, 1991). Rezervuar ve su depoları için bu hareket yerdeğiştirmelerin düşey olduğu yüzey dalgaları şeklindedir. Sıvı yüzey dalgalarının etkisini ve salınım davranışını, sıvının potansiyel enerjisi yardımıyla tanımlamak mümkündür. Buna göre sıvı sistemin potansiyel enerjisinin bu ikinci bileşeni,



$$\pi_s = \frac{1}{2} \int_A \mathbf{U}_{ss}^T \rho_s \mathbf{g} \mathbf{U}_{ss} dA \quad (17)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada  $\mathbf{U}_{ss}$  sıvı serbest yüzey düşey yerdeğiştirmesini göstermektedir. Böylece, sıvı sistemin toplam potansiyel enerjisi,

$$\pi_t = \pi_e + \pi_s \quad (18)$$

şeklinde elde edilmektedir. Sıvının dinamik davranışı incelendiği için kinetik enerji bağıntısına da ihtiyaç vardır. Bir sıvı sistemin kinetik enerjisi,

$$T_k = \frac{1}{2} \int_V \dot{\mathbf{U}}_s^T \rho_s \dot{\mathbf{U}}_s dV \quad (19)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada,  $\rho_s$  sıvının birim kütle yoğunluğunu,  $\dot{\mathbf{U}}_s$  ise,

$$\dot{\mathbf{U}}_s^T = [\dot{U}_{sx} \quad \dot{U}_{sy} \quad \dot{U}_{sz}] \quad (20)$$

ile ifade edilen genel eksen takımındaki hız vektörünü göstermektedir.

Yukarıda verilen enerji bağıntılarından sistem hareket denklemlerine geçiş yapmak için aşağıdaki Lagrange denkleminde faydalanılmaktadır (Clough ve Penzien, 2003);

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T_k}{\partial q_i} + \frac{\partial \pi_t}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (21)$$

Bu ifadede,  $q_i$  ve  $Q_i$  sırasıyla  $i$ . genelleştirilmiş koordinatı ve kuvveti göstermektedir. Sonlu eleman yönteminde genelleştirilmiş koordinat olarak, ortam değişkeninin sonlu eleman düğüm noktalarındaki değerleri alınmaktadır. Örneğin, yerdeğiştirmeye dayalı Lagrange yaklaşımında söz konusu koordinatlar düğüm noktası yerdeğiştirme bileşenleridir. Buna göre, (21) denklemini aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T_k}{\partial \dot{U}_{si}} \right) - \frac{\partial T_k}{\partial U_{si}} + \frac{\partial \pi_t}{\partial U_{si}} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (22)$$

### 1.5.2. Sıvı Sisteminin Sonlu Eleman Formülasyonu

Sıvı sistemlerin sonlu eleman matrisleri izoparametrik sonlu eleman formülasyonundan elde edilmektedir. İzoparametrik formülasyonda genel ve yerel eksen takımı olmak üzere iki eksen takımı kullanılmaktadır. Genel eksen takımı, (x-y-z) Kartezyen eksen takımından, yerel eksen takımı ise (r-s-t) boyutsuz eksen takımından oluşmaktadır. Sonlu eleman düğüm noktası koordinatları genel eksen takımında,

$$\left. \begin{aligned} x^e &= \sum_{i=1}^p \bar{h}_i x_i^e \\ y^e &= \sum_{i=1}^p \bar{h}_i y_i^e \\ z^e &= \sum_{i=1}^p \bar{h}_i z_i^e \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $x^e, y^e, z^e$  sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki koordinatları,  $x_i^e, y_i^e, z_i^e$  ise p düğüm noktalı elemanın i. düğüm noktası koordinatlarını göstermektedir.  $\bar{h}_i$  interpolasyon fonksiyonları olup, her bir değişkeni -1 ile +1 arasında değişen yerel eksen takımında tanımlanmaktadır. İzoparametrik sonlu eleman formülasyonunun en önemli özelliği, eleman koordinat ve yerdeğiştirmelerinin aynı interpolasyon fonksiyonları kullanılarak elde edilmesidir.

Sıvı elemanın herhangi bir noktasındaki yerdeğiştirmenin sırasıyla x, y ve z eksenleri doğrultusundaki bileşenleri ( $U_{sx}, U_{sy}, U_{sz}$ ), interpolasyon fonksiyonları ile,

$$\left. \begin{aligned} U_{sx} &= \sum_{i=1}^p \bar{h}_i U_{sxi}^e \\ U_{sy} &= \sum_{i=1}^p \bar{h}_i U_{syi}^e \\ U_{sz} &= \sum_{i=1}^p \bar{h}_i U_{szi}^e \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $U_{sxi}^e, U_{syi}^e, U_{szi}^e$ , p düğüm noktalı elemanın sırasıyla x, y ve z eksenleri doğrultularındaki düğüm noktası yerdeğiştirmelerini göstermektedir. Sıvı elemanın şekildeğiştirme-yerdeğiştirme bağıntısı,

$$\mathbf{e}_s^e = \mathbf{B}_s^e \mathbf{U}_s^e \quad (25)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada;  $\mathbf{B}_s^e$  sıvı elemanın şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisi olup, interpolasyon fonksiyonlarının genel eksen takımındaki türevlerinden oluşmaktadır.  $\mathbf{U}_s^e$  eleman düğüm noktası yerdeğiştirme vektörünü,  $\mathbf{e}_s^e$  ise  $\mathbf{U}_s^e$ 'ye karşılık gelen şekildeğiştirme vektörünü göstermektedir. (25) denklemi ile verilen şekildeğiştirme-yerdeğiştirme bağıntısı kullanılarak (15) denklemindeki sıvı sistemin şekildeğiştirme enerjisi,

$$\pi_e = \frac{1}{2} \mathbf{U}_s^T \mathbf{K}_s \mathbf{U}_s \quad (26)$$

şeklinde elde edilebilmektedir. Burada;  $\mathbf{U}_s$  sıvı sistemin düğüm noktası yerdeğiştirme vektörünü,  $\mathbf{K}_s$  ise,

$$\mathbf{K}_s = \sum \mathbf{K}_s^e \quad (27)$$

şeklinde eleman rijitlik matrislerinin toplamından oluşan sıvı sistemin rijitlik matrisini göstermektedir.  $\mathbf{K}_s^e$  eleman rijitlik matrisi ise,

$$\mathbf{K}_s^e = \int_V \mathbf{B}_s^{eT} \mathbf{C}_s \mathbf{B}_s^e dV \quad (28)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

Yüzey salınımlarından dolayı oluşan ve denklem (17) ile elde edilen sistemin yüzey potansiyel enerjisi,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \mathbf{U}_{ss}^T \mathbf{S}_s \mathbf{U}_{ss} \quad (29)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada,  $\mathbf{U}_{ss}$  sıvı serbest yüzey düğüm noktası düşey yerdeğiştirme vektörünü,  $\mathbf{S}_s$  ise,

$$\mathbf{S}_s = \sum \mathbf{S}_s^e \quad (30)$$

şeklinde yüzey eleman rijitlik matrislerinin toplamından oluşan sıvı sistemin serbest yüzey rijitlik matrisini göstermektedir.  $\mathbf{S}_s^e$  serbest yüzey eleman rijitlik matrisi ise,

$$\mathbf{S}_s^e = \int_A \bar{\mathbf{h}}_s^T \rho_s \mathbf{g} \bar{\mathbf{h}}_s dA \quad (31)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıdaki  $\bar{\mathbf{h}}_s$  yüzey elemanının interpolasyon fonksiyonlarından oluşan vektörü göstermektedir. Aynı şekilde, denklem (19) ile verilen sistemin kinetik enerjisi,

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{U}}_s^T \mathbf{M}_s \dot{\mathbf{U}}_s \quad (32)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu ifadede,  $\dot{\mathbf{U}}_s$ , sistemin düğüm noktası hız vektörünü,  $\mathbf{M}_s$  ise,

$$\mathbf{M}_s = \sum \mathbf{M}_s^e \quad (33)$$

şeklinde eleman kütle matrislerinin toplamından oluşan sıvı sistemin kütle matrisini göstermektedir.  $\mathbf{M}_s^e$  eleman kütle matrisi ise,

$$\mathbf{M}_s^e = \int_V \bar{\mathbf{H}}^T \rho_s \bar{\mathbf{H}} dV \quad (34)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada,  $\bar{\mathbf{H}}$  interpolasyon fonksiyonlar matrisini göstermektedir.

Sonlu eleman yöntemi kullanılarak elde edilen bu enerji bağıntılarından sıvı sistemin hareket denklemlerine geçiş yapmak için (21) denklemi ile verilen Lagrange bağıntısı kullanılırsa, sıvı sistemin hareket denklemi,

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{U}_s + \mathbf{S}_s \mathbf{U}_{ss} = \mathbf{R}_s \quad (35)$$

veya

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{K}_s^* \mathbf{U}_s = \mathbf{R}_s \quad (36)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada,  $\mathbf{K}_s^*$  sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemin rijitlik matrisini,  $\mathbf{R}_s$  ise zamanla değişen yük vektörünü göstermektedir.

### 1.5.3. Sıvı-Yapı Sisteminin Ortak Formülasyonu

Sıvı-yapı sistemin ortak hareket denklemleri her iki sisteme ait denklemlerin ara yüzey şartı dikkate alınarak birleştirilmesinden elde edilmektedir. Bu sebeple, ortak sistemin ara yüzey şartını belirlemek gerekmektedir.

Sıvının viskoz olmadığı kabul edildiğinden ortak sistemin ara yüzeyinde, ara yüzeye normal yerdeğiştirmeler sürekli, teğet yerdeğiştirmeler süreksiz olmaktadır. Ortak sistemin ara yüzeyinde, yapı kısmının pozitif yüzeye ve sıvı kısmının negatif yüzeye sahip olduğu kabul edilirse ara yüzey şartı,

$$U_n^- = U_n^+ \quad (37)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Akkaş vd., 1979). Burada,  $U_n$  ara yüzeye normal yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Bu şart, sıvı-yapı ara yüzeyinde, ara yüzeye normal doğrultuda karşılıklı düğüm noktaları arasına kısa ve yeteri derecede rijit çubuk elemanlar

yerleştirilerek (Akkaş vd., 1979) veya ortak sistemin ara yüzeyindeki düğüm noktalarında ceza yöntemi (Bathe, 1996) kullanılarak sağlatılabilmektedir.

Sıvı-yapı sisteminin yer hareketi etkisindeki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi, (37) denklemi ile verilen ara yüzey şartı göz önüne alınarak Lagrange yaklaşımına dayalı olarak,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (38)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  ve  $\mathbf{K}$  ortak sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini,  $\mathbf{U}$ ,  $\dot{\mathbf{U}}$  ve  $\ddot{\mathbf{U}}$  ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir.  $\mathbf{R}$  ise ortak sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür. Sıvı-yapı sisteminin hareket denklemi (38), simetrik sistem matrislerine sahip olduğundan herhangi bir yapı sisteminin hareket denklemi ile aynı formdadır. Bu nedenle, yapı analizi için kullanılan çözüm yöntemleri sıvı-yapı sistemi için de kullanılabilir. Sıvı-yapı etkileşiminde Lagrange yaklaşımının tercih edilmesinin en önemli sebebi de budur (Akköse, 2004).

#### 1.5.3.1. Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Bir kemer baraj-rezervuar-temel sistemine veya herhangi bir yapı sistemine ait doğal frekanslar ve mod şekilleri, o sisteme ait sönümsüz serbest titreşim hareket denkleminin çözümünden elde edilmektedir. Bu durumda denklem (38)'de sönümün ve dış kuvvetin olmadığı kabul edilirse, sistemin zamana bağlı sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (39)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Chopra, 2006).

#### 1.5.3.2. Newmark Yöntemine Göre Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, kemer barajların sonlu eleman modelleri ANSYS (2008) programında oluşturulmuştur. Ayrıca, Berke Barajı'nın yapısal

performansının değerlendirilmesi için ANSYS (2008) programında gerçekleştirilen dinamik analizlerde Newmark yöntemi tercih edilmiştir.

Newmark yönteminde, hız ve yerdeğiştirmeler  $t$  ile  $t + \Delta t$  zamanı arasında,

$$\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{U}}_t + [(1-\gamma)\ddot{\mathbf{U}}_t + \gamma\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (40)$$

$$\mathbf{U}_{t+\Delta t} = \mathbf{U}_t + \dot{\mathbf{U}}_t(\Delta t) + [(0.5-\beta)\ddot{\mathbf{U}}_t + \beta\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}](\Delta t)^2 \quad (41)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Bathe, 1996; Chopra, 2006). Burada,  $\mathbf{U}_t$ ,  $\dot{\mathbf{U}}_t$ ,  $\ddot{\mathbf{U}}_t$  sırasıyla  $t$  anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini,  $\mathbf{U}_{t+\Delta t}$ ,  $\dot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}$ ,  $\ddot{\mathbf{U}}_{t+\Delta t}$  sırasıyla  $t+1$  anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemde,  $\beta$  ve  $\gamma$  integrasyon parametreleri olup  $\Delta t$  zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlamaktadır. Ayrıca bu parametreler, kullanılan yöntemin stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirlemektedir.  $\gamma = \frac{1}{2}$  ve  $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$  seçilmesi Newmark yönteminin doğruluğu için yeterli olmaktadır (Chopra, 2006).

Bölüm 1.5.4.1’de verilen (38) denkleminin  $t$  ve  $t+1$  anındaki dengesi dikkate alındığında,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{K}\mathbf{U}_t = \mathbf{R}_t \quad (42)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_{t+1} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}_{t+1} + \mathbf{K}\mathbf{U}_{t+1} = \mathbf{R}_{t+1} \quad (43)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Eğer (43) denkleminin (42) denklemini çıkarılırsa artımsal hareket denklemi,

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{U}}_t + \mathbf{K}\Delta\mathbf{U}_t = \Delta\mathbf{R}_t \quad (44)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada,  $\Delta$  değişim operatörünü göstermek üzere,

$$\left. \begin{aligned} \Delta \ddot{\mathbf{U}}_t &= \ddot{\mathbf{U}}_{t+1} - \ddot{\mathbf{U}}_t \\ \Delta \dot{\mathbf{U}}_t &= \dot{\mathbf{U}}_{t+1} - \dot{\mathbf{U}}_t \\ \Delta \mathbf{U}_t &= \mathbf{U}_{t+1} - \mathbf{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (40) ve (41) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta \dot{\mathbf{U}}_t = (\Delta t) \ddot{\mathbf{U}}_t + \gamma (\Delta t) \Delta \dot{\mathbf{U}}_t \quad (46)$$

$$\Delta \mathbf{U}_t = (\Delta t) \dot{\mathbf{U}}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{\mathbf{U}}_t + \beta (\Delta t)^2 \Delta \dot{\mathbf{U}}_t \quad (47)$$

ifadeleri elde edilmektedir. (47) denkleminde  $\Delta \dot{\mathbf{U}}_t$  çekilecek olursa;

$$\Delta \ddot{\mathbf{U}}_t = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta \mathbf{U}_t - \frac{1}{\beta (\Delta t)} \dot{\mathbf{U}}_t - \frac{1}{2\beta} \ddot{\mathbf{U}}_t \quad (48)$$

şeklinde elde edilmektedir. (48) denklemi (46) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta \dot{\mathbf{U}}_t = \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} \Delta \mathbf{U}_t - \frac{\gamma}{\beta} \dot{\mathbf{U}}_t + \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{\mathbf{U}}_t \quad (49)$$

şeklinde elde edilmektedir. (48) ve (49) denklemleri artımsal hareket denklemi (44)'te yerine konur ve düzenlenirse;

$$\left. \begin{aligned} \left( \mathbf{K} + \frac{\gamma}{\beta (\Delta t)} \mathbf{C} + \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \mathbf{M} \right) \Delta \mathbf{U}_t &= \Delta \mathbf{R}_t + \left( \frac{1}{\beta (\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{U}}_t \\ &+ \left[ \frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{\mathbf{U}}_t \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

ifadesi elde edilmektedir. Dinamik hareket denkleminin, her  $\Delta t$  zaman aralığı içinde statik denge konumunu sağlayarak çözümü elde edilmektedir. Burada adım adım çözümde ilk önce  $\Delta \mathbf{U}_t$  (50) denkleminde bulunmaktadır. Daha sonra, (48) ve (49) denklemleri



yardımıyla  $\Delta\dot{U}_t$  ve  $\Delta\ddot{U}_t$  elde edilmektedir. Bir sonraki adıma ait değerler, (51) denkleminde elde edilmektedir. İşlemler bu şekilde çözüm aralığı boyunca devam etmektedir.

$$\left. \begin{aligned} U_{t+1} &= U_t + \Delta U_t \\ \dot{U}_{t+1} &= \dot{U}_t + \Delta\dot{U}_t \\ \ddot{U}_{t+1} &= \ddot{U}_t + \Delta\ddot{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

### 1.6. Kemer Barajların Yapısal Performans Kriterleri

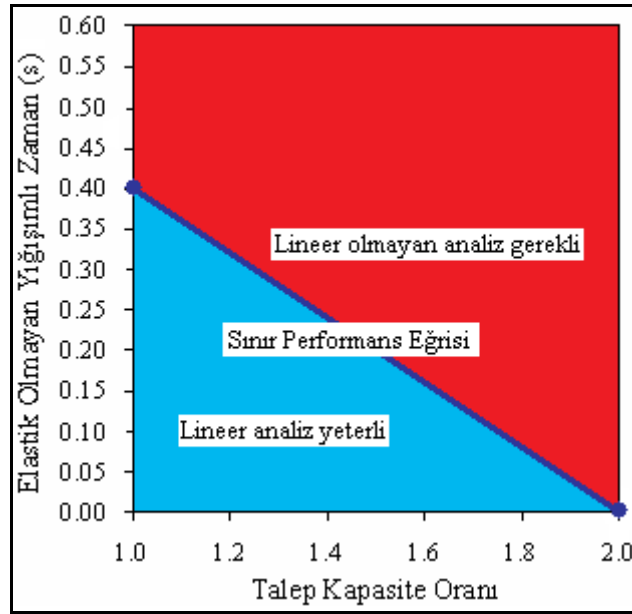
Bir yapı sisteminin yapısal performansı, öncelikle zaman tanım alanında lineer analiz ile belirlenmektedir. Lineer analizlerle çeşitli bileşenlerin elastik karakteristikleri dikkate alınarak gerilmeler hesap edilmektedir. Elde edilen gerilmeler kullanılarak yapı sisteminin yapısal performansına karşılık gelen olası hasar seviyeleri belirlenmektedir. Yapısal performans için kullanılan hasar terimi; yapıda kullanılan betonun çatlaması, bağlantı noktalarının açılması ve donatıdaki akma ile ilişkilidir (Ghanaat, 2002; USACE, 2003).

Normal şartlarda, maksimum tasarım depremine göre boyutlandırılmış, düzgün geometriye, rijitlik ve kütle dağılımına sahip yapı sistemleri için lineer analizler yeterli olmaktadır. Fakat bu özelliklerin bir arada bulunması zor olan beton kemer barajlarda elastik yöntemlere dayalı yapılan lineer analizler yeterli olmayabilmektedir. Bu sebeple, bu tür yapı sistemlerinin gerçek davranışlarının belirlenmesinde lineer analizlerden elde edilen yapısal performans parametrelerinden deformasyonlar, gerilmeler ve performans eğrileri yapının hasar seviyesinin belirlenmesini sağlamaktadır. Diğer bir ifadeyle, yapı sistemlerinin lineer analizlerinin hangi ölçüde yeterli olduğu performans eğrisinden elde edilen hasar seviyelerine göre tespit edilmeye çalışılmaktadır (Ghanaat, 2002; USACE, 2003).

Performans eğrisi, Talep-Kapasite Oranına (TKO) ve elastik olmayan yığışımli zamana bağlı olarak çizilen eğridir. Şekil 1'de görülen TKO, lineer analiz sonucunda kemer baraj gövdesinde oluşan çekme gerilmelerinin baraj betonunun çekme dayanımına oranı olarak tanımlanmaktadır. Elastik olmayan yığışımli zaman ise beton çekme dayanımını aşan her zaman adımının yığışımli toplamı olarak tanımlanmaktadır (Ghanaat,

2002; USACE, 2003). Ghanaat (2002), elastik olmayan yığılımlı zamanın yapılan birçok lineer ve lineer olmayan analiz sonuçlarına göre belirlendiğini belirtmektedir. Bu sürenin kemer barajlar için 0.4 sn olduğu vurgulanmıştır (Ghanaat, 2002).

Şekil 1’de, TKO’nun 1’den küçük olduğu durum için baraj davranışının elastik bölge içerisinde kaldığı ve hasar görmediği kabul edilmektedir. TKO’nun 1 ve 2 olması durumuna göre elde edilen performans eğrisi, sınır performans eğrisinin altında kalıyorsa, yapılan lineer deprem analizinin kemer barajın deprem davranışını belirlemede yeterli olduğunu göstermektedir. Eğer elde edilen performans eğrisi, sınır performans eğrisinin üzerine çıkıyorsa, yapılan lineer deprem analizinin yeterli olmadığını ve kemer barajın deprem davranışını belirleyebilmek için lineer olmayan analizlerin yapılması gerektiğini belirtmektedir (Ghanaat, 2002; USACE, 2003).



Şekil 1. Kemer barajlar için performans eğrisi (Ghanaat, 2002).

### 1.7. Deneysel Modal Analiz Yöntemi

Deneysel Modal Analiz (DMA) yöntemi, mühendislik yapılarının doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını deneysel olarak belirlemeye çalışan yöntemin genel adıdır. Bu yöntem, kendi içerisinde Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Tez çalışmasının bu kısmında, yapıların Deneysel Modal Analizi’nde kullanılan ölçüm sisteminden detaylı olarak bahsedilmekte, kaliteli bir

deneysel ölçümün nasıl gerçekleştirileceği anlatılmakta, dinamik karakteristiklerin hassas olarak elde edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar bahsedilmekte ve son olarak da Çevresel ve Zorlanmış Titreşim Yöntemleri'ne ait formülasyonlar verilmektedir.

### **1.7.1. Deneysel Modal Analiz Yönteminde Kullanılan Ölçüm Sistemi**

Bu kısımda daha çok tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde kullanılan ölçüm sistemine yer verilmektedir.

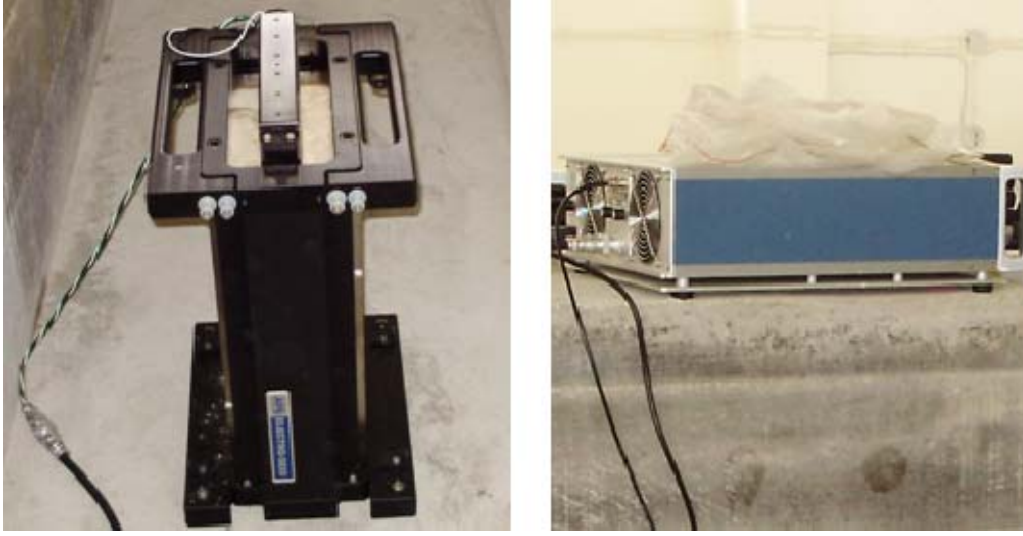
#### **1.7.1.1. Titreştiriciler**

Deneysel Modal Analiz yönteminde, yapı deprem, rüzgâr, taşıt etkileri gibi doğal veya çevresel bir etki ile titreşmekte veya özel sarsıcılar ve darbe çekiçleri ile yapay olarak titreştirilmektedir. Doğal veya çevresel etkilerden, genellikle yapay titreştiricilerin kullanılmadığı çok büyük mühendislik yapılarının ölçümlerinde yararlanılmaktadır. Yapay titreştiriciler ise ölçülebilen etkilere karşı sistemin davranışının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bunlar kullanılacakları yapının hacimsel büyüklüğüne ve rijitliğine bağlı olarak seçilmektedirler. Yapay titreştiriciler yapıya verilen etkinin ölçülmesine de imkân sağlamaktadır.

##### **1.7.1.1.1. Sarsıcılar**

Sarsıcılar, genellikle büyük yapıları titreştirmek için kullanılmaktadırlar. Sarsıcılarla yapıya üç yönde farklı özelliklere sahip dalgalar verilebilmektedir. Bunun için sarsıcının yapıya ankastre olarak monte edilmesi gerekmektedir, aksi takdirde yapıda doğru bir titreşim sağlanamaz. Diğer taraftan yapıları titreştirmek için kullanılan sarsıcı uygulaması hem pahalı olmakta hem de yanlış kullanımlarda yapıya zarar verebilmektedir.

Sarsıcılar; mekanik, elektro-manyetik ve elektro-hidrolik olarak üçe ayrılmaktadır. Bu tez kapsamında, APS 400 tipi mekanik sarsıcı deneysel ölçümlerde kullanılmıştır. Bu sarsıcıdan laboratuvar ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde yararlanılmıştır. Sarsıcıya ait bazı fotoğraflar ve genel özellikler sırasıyla Şekil 2 ve Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 2. APS 400 tipi titreştirici

Tablo 1. APS 400 tipi titreştiriciye ait genel özellikler (URL-1, 2010)

Model	APS 400
Maksimum Kuvvet	445 N
Maksimum Hız	1 m/s
Frekans Aralığı	0-200 Hz
Uygulama Yönleri	Yatay ve Düşey
Uygulama Sıcaklığı	+5 ile +40 °C arası
Boyutlar	0.526 x 0.314 x 0.178 m
Toplam Kütle	73 kg

#### 1.7.1.1.2. Darbe Çekiçleri

Darbe çekiçleri küçük veya orta ölçekli mühendislik yapılarını veya laboratuvar modellerini titreştirmek için kullanılmaktadırlar. Bu bakımdan ölçülecek yapı boyutlarına bağlı olarak darbe çekicini seçmek gerekmektedir. Darbe çekiçlerinin içinde verilen etkiyi ölçmek için bir tane hassas sensör bulunmaktadır. Ayrıca yapıya, farklı etkiye sahip darbeler uygulamak için yumuşak, orta sert ve sert başlıklar mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında, laboratuvar ölçümlerini gerçekleştirmek için Brüel&Kjaer 8206 ve 8210 tipi darbe çekiçleri kullanılmıştır. Darbe çekiçlerine ait fotoğraflar ve genel özellikler sırasıyla Şekil 3 ve Tablo 2’de verilmektedir.



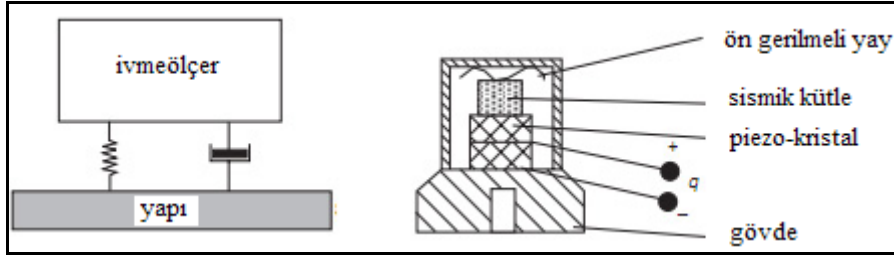
Şekil 3. B&K 8206 ve 8210 tipi darbe çekiçleri

Tablo 2. B&K 8206 ve 8210 tipi darbe çekiçlerine ait bazı özellikler (URL-2 ve 3, 2010)

Model	B&K 8206	B&K 8210
Hassasiyet	22.7 mV/N	0.225 mV/N
Maksimum Kuvvet	220 N	22200 N
Çalışma Sıcaklığı	-73 ile +60 °C arası	-73 ile +60 °C arası
Toplam Uzunluk	0.222 m	0.8966 m
Toplam Kütle	0.1 kg	5.44 kg

### 1.7.1.2. İvmeölçerler

Deneysel Modal Analiz ölçüm sisteminin en önemli araçlarından biri olan ivmeölçerler, yerleştirildikleri yapıdaki titreşimleri ölçmek için kullanılmaktadırlar. Farklı tipte ivmeölçerler olup, yapısal titreşimlerin ölçümlerinde genellikle piezoelektrik ivmeölçerler kullanılmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi bu tip ivmeölçerler, yay-kütle-sönümleyici sisteminden oluşmaktadır (Ramos, 2007). İvmeölçerlerin aktif kısmı ise kuartz veya seramik kristallerinden yapılmaktadır. Kuartz ya da seramik kristaller bir kuvvet altında kaldığında picocoulomb ( $2.78E-12$  Amper saat) seviyesinde elektrik yükü üretmektedirler. Bu elektrik yükünün kristal üzerindeki değişimi yer çekimi ivmesinin değişimi ile doğru orantılıdır. İvmeölçerlerdeki sismik kütlelerin ivme altında maruz kaldığı atalet kuvveti piezoelektrik kristale etkimekte ve ivme ile doğru orantılı bir elektrik sinyali çıkışı vermektedir. Bu ivmeölçerlerin içinde sinyali taşınabilir voltaj sinyaline çeviren bir sinyal koşullayıcı devre vardır. Bu şekilde üretilen sinyal veri toplama ünitesine aktarılmaktadır.



Şekil 4. Piezoelektrik tipi ivmeölçerin iç mekanizması (URL-4, 2010).

Bir mühendislik yapısının titreşimlerinin sağlıklı bir şekilde ölçülebilmesi için doğru ivmeölçeri seçmek gerekmektedir. Aksi takdirde, yapılan ölçümlerden kaliteli sinyaller alınması mümkün değildir. İvmeölçerleri seçerken, ölçebileceği frekans aralığı, hassasiyeti, ölçebileceği maksimum ivme değeri, çalışma sıcaklığı, ağırlığı gibi özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu özellikler kısaca aşağıdaki açıklanmaktadır.

- **Frekans Aralığı:** İvmeölçerin, ölçebileceği maksimum ve minimum frekans aralığını belirtmektedir.
- **Hassasiyet:** İvmeölçerin, yerçekimi ivmesiyle orantılı üretebileceği elektrik gücünü belirtmektedir. Birimi genellikle mV/g cinsindedir.
- **Maksimum İvme Değeri:** İvmeölçerin, elektrik sinyali bozulmadan veya kaybolmadan ölçebileceği en büyük ivme genliği değerini belirtmektedir. Birimi g'dir.
- **Çalışma Sıcaklığı:** İvmeölçerin, sağlıklı sinyal üretebileceği maksimum ve minimum ortam sıcaklığını belirtmektedir.

Yukarıda verilen özellikler bilindiği takdirde doğru ivmeölçeri seçmek kolaylaşmaktadır. Örneğin, düşük frekanslara sahip yapıları ölçerken frekans aralığı 0 Hz'den başlayan ivmeölçerleri kullanmak titreşimlerin daha sağlıklı toplanmasını kolaylaştırmaktadır. Ya da düşük frekansa sahip yapılarda yüksek hassasiyetli ivmeölçerler, yüksek frekansa sahip yapılarda düşük hassasiyetli ivmeölçerler seçilebilir. Diğer taraftan kullanılacak ivmeölçer ağırlığı ve boyutları, ölçülecek yapının ağırlığı ve boyutlarından fazla olmamalıdır.

Tez kapsamında, laboratuvar ölçümlerini gerçekleştirmek için B&K 4507 B 005 tipi tek eksenli ivmeölçerler, arazi ölçümlerini gerçekleştirmek için B&K 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler kullanılmıştır. Bu ivmeölçerlere ait bazı fotoğraflar ve genel özellikler sırasıyla Şekil 5 ve Tablo 3'te verilmektedir.



Şekil 5. B&K 4507 B 005 ve 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerler

Tablo 3. B&K 4507 B 005 ve 8340 tipi tek eksenli ivmeölçerlere ait bazı özellikler (URL-5 ve 6, 2010)

Model	B&K 4507 B 005	B&K 8340
Hassasiyet	1 V/g	10 V/g
Frekans Aralığı	0.4-6000	0.1-1500 Hz
Maksimum İvme	$\pm 7$ g	$\pm 0.5$ g
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +121 °C arası	-51 ile +74 °C arası
Boyutlar	10 x 10 x 10 mm	50.3 x 50.3 x 91.9 mm
Toplam Kütle	5 gram	775 gram

### 1.7.1.3. Veri Toplama Sistemi ve Sinyal İşleme

Veri toplama sistemi, veri toplama ünitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Veri toplama ünitesi, titreştiricilerden ve ivmeölçerlerden gelen sinyalleri kaydetmek ve ilgili bilgisayar programına göndermek için kullanılmaktadır. Bilgisayar programı ise, sinyallerin toplanmasında ve işlenmesinde gerekli arayüzü sağlamaktadır. Sinyal toplama ve işleme kısaca şu şekilde açıklanabilir.

İvmeölçerler yapıdan aldıkları elektrik sinyallerini doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden geçirdikten sonra veri toplama sistemine aktarmaktadırlar. Sinyaller burada dinamik yapılarına uygun bir hızda ve çözünürlükte örneklendikten (sayısal forma dönüştürüldükten) sonra bilgisayar programında işlenmekte ya da saklanmaktadır.

İvmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktarılan sinyaller genellikle hamdır. Yani sinyaller yapı titreşimlerinden ve ortamdaki gürültülerden (rüzgâr sesi, insan sesi, kuş sesi, dere sesi vb.) oluşmaktadır. Ham sinyallerin kullanılması durumunda yapı davranışının doğru belirlenmesi zorlaşmaktadır. Bu bakımdan veri toplama sisteminin en önemli işlevlerinden biri sinyal koşullamadır. Sinyal koşullama, ham sinyalleri istenen özelliklere getirme işlemidir. Bu işlem genellikle düşük seviyeli bir sinyalin kalitesini artırmak, gürültü sinyallerinin etkisini azaltmak, istenmeyen sinyalleri filtrelemek, gerekli durumlarda ivmeölçerlerdeki elektrik gücünü ayarlamak veya ivmeölçerlerin davranışlarının kontrol etmek için yapılmaktadır. Veri toplama sistemi içerisinde yer alan sinyal koşullandırıcılar bu işlemleri gerçekleştirmektedir. Bu işlemlerin en önemlisi istenmeyen sinyallerin filtrelenmesidir. İstenmeyen sinyaller, seçilen frekans ölçüm aralığı dışında kalan yüksek frekans sinyalleridir. Eğer sinyaller düşük bir hızda ölçülüyorsa yüksek frekans içeriğine sahip sinyaller, düşük frekanslara sahipmiş gibi algılanmakta ve yapılan ölçüm hatalı olmaktadır. Bu hatayı engellemek için ölçme hızı, en büyük frekansın en az iki katı seçilmelidir. Bu konuda daha fazla bilgi Heylen vd. (2007) ve Ramos'dan (2007) elde edilebilir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde veri ünitesi olarak B&K 3560 C tipi 17 kanallı cihaz kullanılmıştır (Şekil 6). Bu cihaz, portatif olup iki adet batarya ile çalıştırılmakta ve elektrik olmadığı durumlarda 1-1.5 saat kadar ölçüm yapılabilmektedir. Cihaza 17 adet tek eksenli ivmeölçer bağlanarak ölçümler gerçekleştirilebilmektedir. Fakat barajlar, köprüler gibi büyük mühendislik yapılarının davranışlarının doğru elde edilebilmesi için daha fazla ivmeölçer kullanılması gerekir ki bu durumda cihazdaki kanal sayısı artırılabilir. Fakat ivmeölçerler çok pahalı olduğu için fazla ivmeölçer ve ekstradan kanal artırıcı kullanmaya gerek yoktur. Bu gibi durumlarda, cihaz referanslı ölçüm yapmaya olanak sağlamaktadır. Referanslı ölçüm, mevcut ivmeölçerler kullanılarak aynı ölçüm içerisinde daha fazla noktadan ölçüm yapılmasıdır. Örneğin 12 ivmeölçer kullanılarak aynı ölçüm içerisinde 36 noktadan üç seferde sinyaller toplanmakta ve birleştirilmektedir.





Şekil 6. B&K 3560 C tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi

Yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenebilmesi için ivmeölçerlerden veri toplama ünitesine aktararak saklanan sinyallerin işlenmesi gerekmektedir. Bu adıma sinyal işleme ismi verilmektedir. Bu adım sinyallerin veri toplama ünitesinde sinyal koşullama işlemlerinden sonra bilgisayar ortamına aktarılmasıyla başlamaktadır. Sinyal işleme bilgisayarda geliştirilen özel yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sinyaller bilgisayara zaman ortamında aktarılmaktadır. Fakat gerek pratik sebeplerden gerekse hesaplama gereksinimlerinden dolayı frekans ortamı tercih edilmektedir. Zaman ortamındaki sinyallerin frekans ortamına aktarılmasında Fourier serilerinden yararlanılmaktadır.  $x(t)$  ile gösterilen periyodik bir sinyal sonsuz Fourier serisine açıldığında,

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) \right] \quad (52)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Ramos, 2007). Burada,  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right) dt \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

Sonsuz Fourier serisine açılan sinyal,  $t_k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ) gibi sonlu bir zamana karşılık gelmektedir. Bu durumda sonlu sinyal Fourier serisine açıldığında,

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi k n}{N}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi k n}{N}\right) \right], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (54)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x_k \\ a_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos \frac{2\pi nk}{N} \\ b_n &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \sin \frac{2\pi nk}{N} \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

Sinyal işleme sırasında bazı problemlerle karşılaşmaktadır. Bu problemlerin en önemlisi sızıntı hatasıdır. Sızıntı hatası, sinyal periyodunun tam katlı olmamasından yani sinyalin periyodik olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu hatayı azaltmak için ölçüm süresi uzun tutulmalıdır. Diğer bir çözüm ise pencereleme yöntemlerini kullanmaktır. Pencereleme yöntemleri sinyal periyodunu tam katlı hale getirerek sızıntı problemini ortadan kaldırmaktadır. Bu konuda daha fazla bilgi literatürden elde edilebilir (Heylen vd., 2007; Ramos, 2007; Şahin, 2009).

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda; ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine tanıtılmasında, ivmeölçerlerden sinyallerin alınarak veri toplama ünitesinde depolanmasında, depolanan sinyallerin sinyal koşullandırma işlemlerinin tamamlanmasında ve bilgisayara dayalı sinyal işleme programına aktarılmasında Brüel&Kjaer Firması tarafından geliştirilen PULSE (2006) yazılımı kullanılmıştır. Çevresel titreşim testlerinden PULSE (2006) yazılımıyla alınan sinyallerin işlenmesinde ve barajların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Operational Modal Analysis (OMA, 2006) yazılımı kullanılmış; zorlanmış titreşim testlerinden toplanan sinyaller ise özel bir sinyal işleme yazılımı olmadığından sadece PULSE (2006) yazılımında sinyal koşullama gerçekleştirilerek barajlara ait Frekans Davranış Fonksiyonları (FDF) elde edilmiştir.

### 1.7.2. Deneysel Modal Analiz Yöntemi ile İlgili Genel Kurallar

Deneysel Modal Analiz yöntemi ile ilgili ilk çalışmalar 1940'lı yıllarda uzay ve astronomi bilimlerinde, daha sonra havacılık, makine ve otomotiv sektörlerinde gerçekleştirilmiştir. 1980'li yıllarda Zorlanmış Titreşim Yöntemi, 1990'lı yıllarda ise Çevresel Titreşim Yöntemi inşaat mühendisliği yapılarında kullanılmaya başlanmıştır (Ewins, 2000; Bayraktar vd., 2007a; Ramos, 2007; Bayraktar vd., 2008c; Bayraktar vd., 2008d; Bayraktar vd., 2008e; Bayraktar vd., 2009d; Bayraktar vd., 2009e; Bayraktar vd., 2009f; Bayraktar vd., 2009g; Bayraktar vd., 2009h;. Her iki yöntemin birbirine göre üstün tarafları vardır.

Yapıların çevresel etkilerle titreştirilemediği veya ortamda yapıyı titreştirecek seviyede doğal etki olmadığı zaman Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ni kullanmak gerekmektedir. Örneğin, küçük veya orta boy yapıların dinamik karakteristikleri belirlenirken darbe çekici kullanılarak yapılan zorlanmış titreşim testi iyi sonuçlar vermektedir. Çekiç testinde yapıya ölçülebilen bir kuvvet verildiği için yapıdaki titreşim sinyalleri ile ortamdaki titreşim sinyalleri daha kolay ayırt edilebilmektedir. Dolayısıyla, ölçüm sonuçları sağlıklı bir şekilde belirlenebilmektedir. Benzer şekilde büyük yapılarda sarsıcılar kullanmak suretiyle yapılar titreştirilmekte ve yapı davranışı belirlenmektedir. Diğer taraftan zorlanmış titreşim testinde kullanılan darbe çekiçleri ve sarsıcılar hem pahalıdır hem uygulamaları pratik değildir ve hem de mevcut yapıya zarar verebilmektedir. Ayrıca baraj, köprü gibi büyük mühendislik yapıları mevcut sarsıcılarla ancak lokal olarak titreştirilebilmektedir. Lokal titreşimlerden elde edilen veriler ise yapı bütünü değerlendirilmesinde hatalara neden olabilmektedirler. Bu nedenle günümüzde Çevresel Titreşim Yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Çünkü çevresel titreşim testinde, yapı doğal etkilerle titreşmekte ve herhangi bir dış tetikleyiciye ihtiyaç duyulmamaktadır. Dolayısıyla uygulaması, zorlanmış titreşim testine göre hem kolay hem de daha ucuzdur. Yapı doğal etkiler altında titreştiğinden, yapıdan alınan sinyaller yapı bütünü kapsamaktadır. Bu yöntemde yapıya zarar verme riski neredeyse sıfırdır. Üstelik uygulama sırasında yapı kullanım amacına hizmete devam etmektedir (Schwarz ve Richardson, 1999; Bayraktar vd., 2009i; Bayraktar vd., 2009j; Bayraktar vd., 2009k; Bayraktar vd., 2009l; Bayraktar vd., 2009m; Bayraktar vd., 2009n; Şahin, 2009; Bayraktar vd., 2010a; Bayraktar vd., 2010b; Bayraktar vd., 2010c; Bayraktar vd., 2010d; Bayraktar vd., 2010e; Sevim vd., 2010b).

Deneysel Modal Analiz Yöntemi'nin geçerli olabilmesi için bazı temel kabuller yapılmaktadır (Heylen vd., 2007). Bu kabuller birbirleriyle ilişkili olup kısaca şu şekilde sıralanabilir:

- Deneysel ölçümler sırasında, sıcaklık, nem vb. gibi bir etki altında yapının malzeme özelliklerinde ve sınır şartlarında herhangi bir değişim olmadığı kabul edilmektedir.
- Yapıda oluşan titreşimlerin küçük olduğu yani, yapının lineer davranış sergilediği kabul edilmektedir. Yapının rijitliğini değiştirebilecek çok büyük titreşimler altında yapılan ölçümlerin doğru sonuçlar vermeyeceği kabul edilmektedir.
- Yapının bir bütün ve sürekli olduğu kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, yapının bir noktasında elde edilen davranışın bütün yapıyı temsil ettiği kabul edilmektedir. Barajlar gibi büyük yapıların, özellikle Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne göre yapılan Deneysel Modal Analizi'nde bu kabulün sağlanması oldukça zordur.

Deneysel Modal Analiz ölçümlerinin sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için uygulamacıların hem Deneysel Modal Analiz yöntemi hem de ölçülecek yapı davranışı hakkında genel mühendislik bilgisine sahip olması gerekmektedir. Bu bakımdan uygulamacı test planını doğru bir şekilde yapmalıdır. İyi bir test planı aşağıdaki gibi hazırlanmalıdır:

- ❖ Ölçülecek yapı belirlenmelidir (Baraj, köprü, bina, vs.).
- ❖ Yapının dinamik karakteristikleri hakkında ön bilgiye sahip olunmalıdır. Belirlenmesi gereken mod sayısı, modları içeren frekans aralığı ve mod şekilleri bilinmelidir. Bu bilgilere deneysel ölçümden önce yapılacak sonlu eleman analizi ile yaklaşık olarak ulaşılabilir.
- ❖ Kullanılacak Deneysel Modal Analiz Yöntemi belirlenmelidir. Zorlanmış Titreşim Yöntemi veya Çevresel Titreşim Yöntemi'nden uygun olana karar verilmelidir.
- ❖ Ölçümlerde kullanılacak ivmeölçer tipi seçilmeli ve kaç noktadan ölçüm alınacağı belirlenmelidir. İvmeölçer seçimiyle ilgili bilgiler Bölüm 1.7.1.2'de detaylıca anlatılmıştır. İvmeölçerler sadece yerleştirildikleri noktadaki sinyalleri algıladıklarından yapının mod şekillerini elde edecek şekilde, uygun bir sıklıkta yerleştirilmelidir. Çünkü deneysel mod şekilleri ivmeölçer noktalarının modal yerdeğiştirmelerin birleştirilmesinden meydana gelmektedir. Eğer ivmeölçer noktaları yeterli sıklıkta değilse yapının mod şekillerinin hepsi elde edilemeyebilir. Mümkünse ivmeölçer noktaları ile sonlu eleman modelindeki serbest düğüm noktaları birbiriyle örtüşmelidir. İvmeölçer sayısının yetersiz

kaldığı durumlarda referanslı ölçümler gerçekleştirilerek bu sorun ortadan kaldırılmalıdır. Bu husus analitik ve deneysel modların karşılaştırılması sırasında ayrıca önem teşkil etmektedir. Ayrıca ölçümler sırasında ivmeölçerlerin yapıyla tam bağlı olması yani yapı ile ivmeölçer arasında gevşeklik olmaması ve ivmeölçerlerin yağmurdan, manyetik alandan ve darbelerden korunması gerekmektedir.

❖ Yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerler veri toplama ünitesine tanıtılmalıdır. Sinyaller toplanmaya başlamadan önce frekans aralığı ve ölçüm hızı belirlenmelidir. Frekans aralığı ve ölçüm hızı istenmeyen ortam sinyallerin ve gürültü sinyallerinin etkisini azaltmak için gereklidir. Yapı için frekans aralığı sonlu eleman analizinden yaklaşık olarak tespit edilebilmektedir. Örneğin 0-25 Hz aralığında ölçüm yapılırsa 25 Hz'den yüksek sinyallerin ölçülmemesi sağlanmaktadır. Çünkü bu sinyaller yapı davranışının belirlenmesine katkıda bulunmaktan ziyade karışıklığa neden olmaktadır. Bu konuyla ilgili geniş bilgiler Bölüm 1.7.1.3'te verilmektedir.

❖ Ölçümlere başlanmadan önce, yapı üzerine yerleştirilen ivmeölçerlerin veri toplama ünitesine sinyal aktarıp aktaramadığı kontrol edilmelidir.

❖ Testlerde gerekli miktarda kaliteli sinyalin elde edilebilmesi için ölçüm süresinin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Ölçüm süresinin belirlenmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bendat ve Piersol'a (1986) göre minimum 17 dk, Caetano'ya (2000) göre, yapının en büyük periyodunun 240-1280 katı kadar ölçüm alınmalıdır (Ramos, 2007). Örneğin, en büyük periyodu 0.5 s olan bir yapının dinamik karakteristiklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için yaklaşık 2-11 dk arası ölçüm alınmalıdır. Rodrigues'e (2004) göre, yapının en büyük periyodunun 2000 katı kadar ölçüm alınmalıdır. Örneğin, 0.5 s periyot için yaklaşık 17 dk ölçüm alınmalıdır (Ramos, 2007). Ramos'a (2007) göre, her testte 10 dk'den az olmamak kaydıyla, yapının en büyük periyodunun 1000 katı kadar ölçüm alınmalıdır.

❖ Ölçümler bittikten sonra, veri toplama sistemine ait yazılım kullanılarak ham sinyaller koşullama işlemine tabi tutulmakta ve işlenmek üzere bilgisayara dayalı sinyal işleme ve dinamik karakteristikleri belirleme programına aktarılmaktadır. Burada sinyaller işlenerek, hem frekans ortamında hem de zaman ortamında yapının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmektedir.

### 1.7.3. Deneysel Modal Analiz Yöntemine Ait Formülasyon

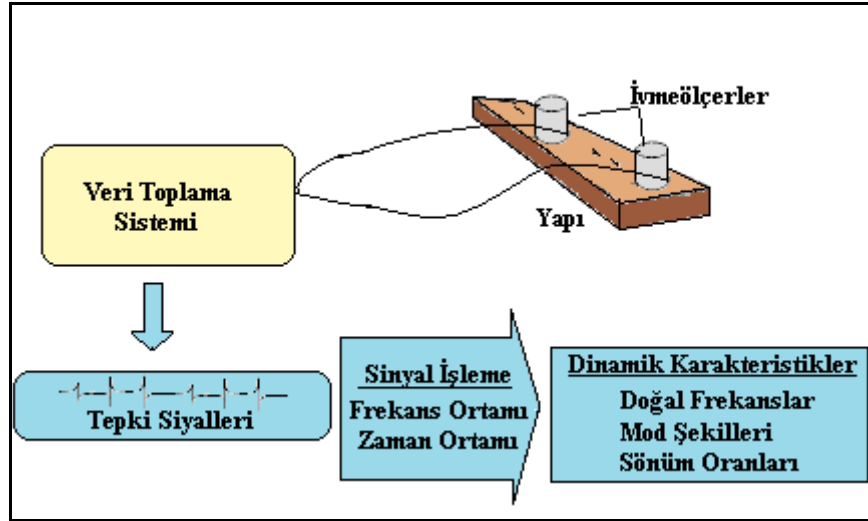
#### 1.7.3.1. Çevresel Titreşim Yöntemi

Çevresel Titreşim Yöntemi'nde, etki kuvveti ölçülmediğinden Etki Davranış Fonksiyonu belirlenmez. Dolayısıyla bu yöntem literatürde Operasyonel Modal Analiz veya Sadece Tepki Modal Analizi gibi isimler almaktadır (Zhang vd., 2002; Brincker vd., 2003). Bu yöntemde, yapıların dinamik karakteristikleri frekans ve zaman ortamında algoritmalara sahip yöntemlerle belirlenmektedir. Frekans ortamındaki yöntemler, her bir noktada ölçülen sinyalin analizine ve sinyaller arasındaki korelasyona dayanmaktadır. Bunlar, parametrik olmayan yöntemler olarak da adlandırılmaktadır. Zaman ortamındaki yöntemler ise her bir noktada sinyalin zaman geçmişine veya korelasyon fonksiyonlarıyla model uydurmaya dayanmaktadır. Zaman ve frekans ortamından birinin diğerine göre kesin bir üstünlüğü yoktur. Yani her iki ortama dayalı yöntemler dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde kullanılabilir. Bununla birlikte iki ortam arasında bazı farklılıklardan bahsedilebilir. Zaman ortamına dayalı yöntemlerin sayısal alt yapısı daha sağlamdır. Ayrıca istenmeyen gürültü sinyalleri daha kolay ayırt edilebilmekte ve sinyal işleme sırasında karşılaşılan sızıntı ve filtreleme hataları en aza indirilebilmektedir. Birbirine yakın frekanslar zaman ortamına dayalı yöntemlerle daha kolay belirlenebilmektedir (Ramos, 2007). Literatürde frekans ve zaman ortamına dayalı pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları Tablo 4'te özetlenmektedir. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne göre yapıların dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren akış şeması Şekil 7'de verilmektedir.

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, barajların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde OMA (2006) yazılımında yer alan ve literatürde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden, frekans ortamında Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) ve zaman ortamında Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlere ait formülasyon aşağıda verilmektedir

Tablo 4. ÇTY'e dayalı bazı dinamik karakteristik belirleme yöntemleri

Ortam	Yöntem
Frekans	Piklerin Seçilmesi (PS)
	Frekans Ortamında Ayrıştırma (FOA)
	Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA)
Zaman	Polimax
	Rastgele Azaltım
	Tekrarlanan
	Maksimum Olasılık
	Stokastik Altalan Belirleme (SAB)



Şekil 7. Çevresel Titreşim Yöntemi'ne göre yapıların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi

### 1.7.3.1.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) Yöntemi

Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) yöntemi kullanımı kolay olan Frekans Ortamında Ayrıştırma (FOA) yönteminin genişletilmiş halidir. Bu yöntemde, modlar davranışın spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayrıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilmektedir. FOA yöntemini Hızlı Fourier Dönüşümü'nden (HFD) tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olduğundan, belirlenen doğal frekansın kesinliği HFD'nin çözünürlüğüne bağlıdır. FOA yönteminde yapının sönüm oranları belirlenemez. Diğer taraftan GFOA yönteminde belirlenen doğal

frekansların ve mod şekillerinin kesinliği artırılmakta ayrıca, sönüm oranları elde edilebilmektedir (Jacobsen vd., 2006).

GFOA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu (GSY), Ters Ayırık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman ortamına geri dönüştürülebilmektedir. Doğal frekans zamana bağlı sıfır geçiş sayısının belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilmektedir (Jacobsen vd., 2006). GFOA yönteminde ölçülmeyen etki kuvveti ve ölçülen davranış fonksiyonu arasındaki ilişki;

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \mathbf{H}(j\omega)^* \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \mathbf{H}(j\omega)^T \quad (56)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Bendat ve Piersol, 2004). Burada;  $\mathbf{G}_{xx}(j\omega)$  etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu,  $\mathbf{G}_{yy}(j\omega)$  tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve  $\mathbf{H}(j\omega)$  frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Denklem (56)'teki \* ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Matematiksel düzenlemelerden sonra tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,

$$\mathbf{H}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (57)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada; n mod sayısını,  $\lambda_k$  kutup fonksiyonunu ve  $R_k$  artık değer fonksiyonunu göstermektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra denklem (56),

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \left[ \frac{R_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right] \mathbf{G}_{xx}(j\omega) \left[ \frac{R_s}{j\omega - \lambda_s} + \frac{R_s^*}{j\omega - \lambda_s^*} \right]^{\bar{H}} \quad (58)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada; s tekil değerleri,  $\bar{H}$  kompleks eşleniği ve transpozeyi ifade etmektedir. Matematiksel ifadeler sadeleştirildiğinde tepki sinyaline ait GSY fonksiyonu tek kutuplu artık değer fonksiyonu formunda,



$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{\mathbf{A}_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{A}_k^*}{j\omega - \lambda_k^*} + \frac{\mathbf{B}_k}{-j\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{B}_k^*}{-j\omega - \lambda_k^*} \quad (59)$$

şeklinde elde edilmektedir (Brincker vd., 2000). Burada;  $\mathbf{A}_k$  tepki sinyalinin GSY fonksiyonuna ait  $k$ . artık değer matrisini göstermektedir. GFOA yönteminde ilk adım GSY matrisini belirlemektir. Ayrık frekanslarda tepki sinyalinin GSY'sinin tahmini  $\omega = \omega_i$  olarak bilinmekte ve sonra tekil değer ayrıştırma matrisi alınarak ayrıştırılmaktadır (Brincker vd., 2000). Buna göre denklem (59),

$$\mathbf{G}_{yy}(j\omega_i) = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i \mathbf{U}_i^H \quad (60)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $u_{ij}$  tekil vektörleri,  $\mathbf{U}_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$  tekil vektörleri içeren bütün matrisi,  $s_{ij}$  skaler tekil değerleri ve  $\mathbf{S}_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}]$  skaler tekil değerleri içeren diyagonal matrisi göstermektedir. Denklem (60)'da verilen GSY fonksiyonunda, pik değer yapan noktalar doğal frekanslara karşılık gelmektedir. Pik noktaları oluşturan tekil vektörler ( $u_{ij}$ ) ise doğal mod şekillerine karşılık gelmektedir (Brincker vd., 2000).

Pik etrafındaki GSY fonksiyonundan elde edilen tek serbestlik dereceli tekil değer yoğunluk fonksiyonu kullanılarak doğal frekans ve sönüm elde edilmektedir. Bu işlem ters HFD yapılarak zaman ortamında doğal frekans ve sönüm belirlenebilmektedir (Brincker vd., 2000). İki modun belirgin olması durumunda, birinci tekil vektör her zaman için iyi bir mod şekli ortaya koyacaktır. Bununla birlikte, iki mod ortogonal olması durumunda, bu modlara ait tekil vektörler ilgili mod şekil vektörlerini göstermektedir (Brincker vd., 2000).

#### 1.7.3.1.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemi

Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemi korelasyon veya spektruma ihtiyaç duymadan doğrudan zaman verileriyle çalışan, zaman ortamına dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için çok uygundur (Overschee ve Moor, 1996; Peeters ve Roeck, 2000; Peeters, 2000; Yu ve Ren, 2005). Bu yöntemde yapı

sisteminin dinamik davranışı lineer, sabit katsayılı ikinci derece diferansiyel denklem olarak,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = \mathbf{R}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (61)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir.  $\mathbf{F}(t)$  titreşim kuvvetini,  $\mathbf{U}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{U}}(t)$ ,  $\ddot{\mathbf{U}}(t)$  ise zamana bağlı yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Burada,  $\mathbf{F}(t)$  kuvvet vektörü, ortamdaki verileri simgeleyen  $\mathbf{B}$  matrisi ve  $\mathbf{u}(t)$  vektörü cinsinden ifade edilebilmektedir. Dinamik denge denklemi, denklem (61), titreşen yapının davranışını temsil etmesine rağmen bu şekliyle SAB yöntemine uygun değildir. Bu yüzden, denklem (61) daha uygun bir form olan ayrık-zaman stokastik durum-uzayı modeline dönüştürülmektedir (Yu ve Ren, 2005). Durum-Uzay modeli kontrol teorisinden üretilmekte, fakat bu model inşaat mühendisliğinde viskoz sönüme sahip yapıların dinamik karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmaktadır (Yu ve Ren, 2005). Aşağıdaki tanımlamalar kullanılarak (61) denklemi,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \begin{pmatrix} \mathbf{U}(t) \\ \dot{\mathbf{U}}(t) \end{pmatrix} \\ \mathbf{A}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I}_{n_2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_* &= \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_*\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_*\mathbf{u}(t) \quad (63)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada;  $\mathbf{A}_*$  durum matrisini,  $\mathbf{B}_*$  veri matrisini ve  $\mathbf{x}(t)$  durum vektörünü göstermektedir. Çevresel titreşim testlerinde, yapının bütün serbestliklerini ölçmek pek mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla, durum-uzay vektörünün eleman sayısı, sistemin durumunu tanımlayan bağımsız değişken sayısına eşittir ve gözlem denklemi,

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_*\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_*\mathbf{u}(t) \quad (64)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada;  $\mathbf{C}_*$  sistem davranış matrisini,  $\mathbf{D}_*$  doğrudan iletim matrisini göstermektedir. Denklem (63) ve (64) sürekli-zaman belirli durum-uzay modelini oluşturmaktadır. Burada, “Sürekli Zaman” ile ifadelerin herhangi bir  $t \in \mathbb{N}$  anında değerlendirilebileceği ifade edilmektedir. Fakat ölçümler  $k\Delta t$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) gibi ayrık zamanlarda gerçekleştirilmektedir. Örnekleme süresi ve ortamdaki gürültü sinyal verilerini her zaman için etkilemektedir. Örneklemeden sonra, durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_* \mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_* \mathbf{u}_k \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada;  $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}(k\Delta t)$  ayrık-zaman durum vektörünü,  $\mathbf{u}_k$  belirgin etki sinyal vektörünü göstermektedir. Gerçek operasyonel koşullarda yapılan ölçümler, yapıya ve dış ortamdaki gürültüye ait sinyalleri içermektedir. Dolayısıyla denklem (65)’e stokastik gürültü bileşenleri eklendiğinde belirli-stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_* \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_* \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \right\} \quad (66)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\mathbf{w}_k$ , modeldeki belirsizlikler ve kusurlar nedeniyle işlenen gürültü sinyallerini,  $\mathbf{v}_k$  ise ivmeölçer kusurlarından dolayı işlenen gürültü sinyalini göstermektedir. Her iki vektörde değeri ölçülemeyen sinyallerden oluşmaktadır. Etkisi olmayan beyaz gürültü ve kovaryans matrisleri,

$$\mathbf{E}_* \left[ \begin{pmatrix} \mathbf{w}_p \\ \mathbf{v}_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{w}_q^T & \mathbf{v}_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & \mathbf{R} \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (67)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yu ve Ren, 2005). Burada;  $\mathbf{E}_*$  beklenen değer operatörünü,  $\delta_{pq}$  ise Kronecker deltayı göstermektedir. Kronecker delta iki değişkenli bir fonksiyondur ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\delta_{pq} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p = q \\ 0, & \text{eğer } p \neq q \end{cases} \quad (68)$$

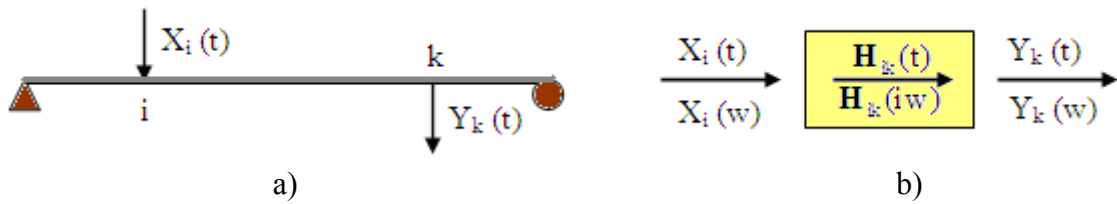
SAB yönteminde yapı sisteminin davranışı, normal operasyon koşullarında değeri ölçülemeyen sinyallerle titreştirilerek belirlenmektedir. Bu veri eksikliğinden dolayı, denklem (66)'da gösterilen belirgin sinyal verisi  $\mathbf{u}_k$ 'yi, gürültü terimleri olan  $\mathbf{w}_k$  ve  $\mathbf{v}_k$ 'den ayırt etmek mümkün değildir. Bu durumda,  $\mathbf{u}_k$  gürültü terimleri  $\mathbf{w}_k$  ve  $\mathbf{v}_k$  cinsinden yazılırsa yapının ayrık-zaman stokastik durum-uzay modeli,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_* \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \right\} \quad (69)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (69), çevresel titreşimlerden dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde zaman alanının temelini oluşturmaktadır.

### 1.7.3.2. Zorlanmış Titreşim Yöntemi

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, yapı  $X_i(t)$  gibi yapay bir kuvvetle  $i$  noktasından titreştirilmekte ve yapının bu etkiye göstermiş olduğu tepki- $Y_k(t)$ , yapay kuvvet sinyali- $X_i(t)$  ile birlikte ölçülmektedir (Şekil 8a). Yapay titreşimler, sarsıcılardan veya darbe çekiçlerinden elde edilmektedir. Zaman ortamında ölçülen bu sinyaller frekans ortamına Fourier serileri kullanılarak dönüştürüldüğünde, etki-tepki zaman sinyalleri arasındaki ilişkiyi gösteren FDF- $H_{ik}$  yerini Transfer Matrisi- $H_{ik}(i\omega)$  olarak adlandırılan FDF matrisine bırakmaktadır (Şekil 8b) (Schwarz ve Richardson, 1999).



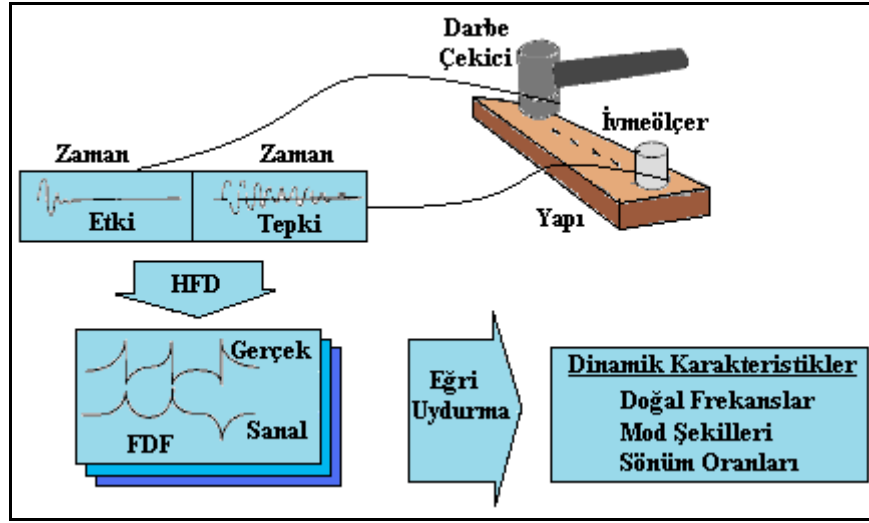
Şekil 8. Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nin a) şematik gösterimi b) Frekans davranış fonksiyonunun belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999).

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde, etki-tepki sinyalleri arasındaki ilişki,

$$\mathbf{H}_{ik}(iw) = \frac{\mathbf{Y}_k(w)}{\mathbf{X}_i(w)} \quad (70)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\mathbf{H}_{ik}(iw)$  Frekans Davranış Fonksiyonu'nu,  $\mathbf{X}_i(w)$  frekans ortamındaki tepki fonksiyonunu ve  $\mathbf{Y}_k(w)$  frekans ortamındaki etki fonksiyonunu göstermektedir. Elde edilen Frekans Davranış Fonksiyonu  $\mathbf{H}_{ik}(iw)$  çeşitli sayısal teknikler kullanılarak ayrıştırılmakta ve yapıya ait doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmektedir.

Zorlanmış Titreşim Yöntemi'ne göre bir yapının dinamik karakteristiklerinin nasıl belirlendiğini gösteren akış şeması Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi yapıya etkiyen kuvvet darbe çekicinden sağlanmaktadır.



Şekil 9. Darbe çekici ile dinamik karakteristiklerin belirlenmesi (Schwarz ve Richardson, 1999).

### 1.8. Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerin Modal Güvence Kriterine (MGK) Göre Değerlendirilmesi

Bir yapının analitik ve deneysel yöntemlerle elde edilen modlarının doğruluğuna sadece frekans değerlerinin yakınlığına bakılarak karar verilmemektedir. Bunun için modların karşılaştırılması daha doğru bir çözümdür. Modal Güvence Kriteri (MGK), analitik ve deneysel olarak hesaplanan farklı mod şekil vektörlerinin karşılaştırılmasında

ya da bir yöntem kullanılarak hesaplanan mod şekil grubunun doğruluğunun kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. İki mod şekli arasındaki Modal Güvence Kriteri,

$$\text{MGK}(\Psi_a, \Psi_d) = \frac{|\Psi_a^T \Psi_d|^2}{(\Psi_a^T \Psi_a)(\Psi_d^T \Psi_d)} \quad (71)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Allemang, 2003; Heylen vd., 2007; Şahin, 2009). Burada;  $\Psi_a$  analitik ve  $\Psi_d$  deneysel mod şekil vektörlerini göstermektedir. Eğer  $\Psi_a$  ve  $\Psi_d$  aynı mod şekil vektörleri iseler, MGK birim matris olmalıdır. Eğer  $\Psi_a$  ve  $\Psi_d$  farklı mod şekil vektörleri iseler, MGK değeri sıfıra yakın olmalıdır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR**

### **2.1. Giriş**

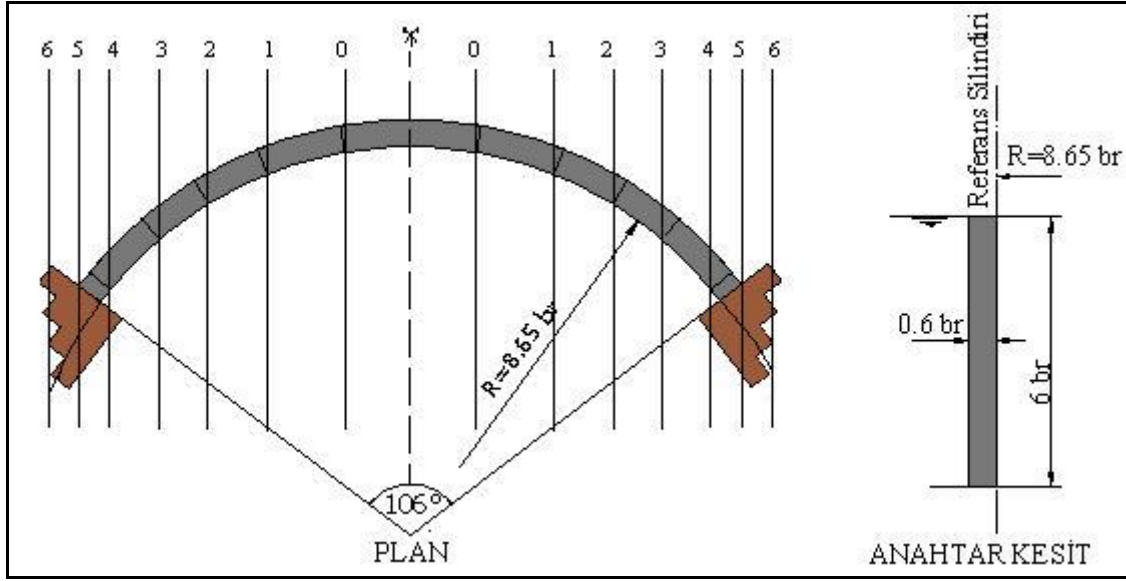
Bu tez çalışmasında, kemer barajların dinamik davranışlarının analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmada, farklı iki kemer baraj uygulama olarak seçilmiştir. İlk uygulama için laboratuvar ortamında inşa edilmiş küçük ölçekli bir kemer baraj, ikinci uygulama için arazi üzerinde gerçek bir kemer baraj seçilmiştir. Bu bakımdan yapılan çalışmalar, laboratuvar ve arazi çalışmaları olarak iki kısımda incelenmiştir.

### **2.2. Laboratuvar Çalışmaları**

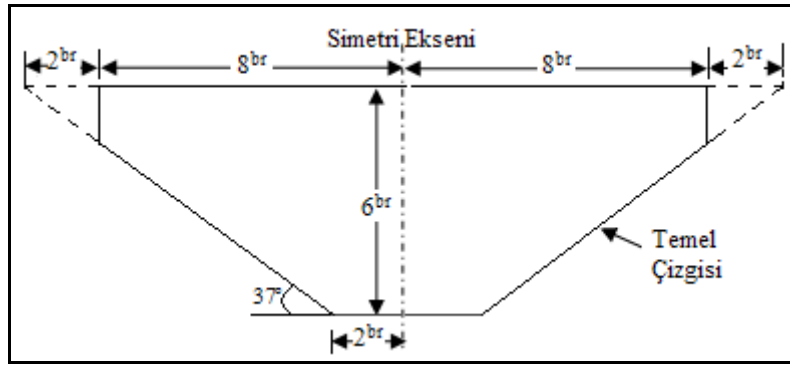
Tez çalışması kapsamında, deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılabilmesi için deneysel ve analitik modelin birbirleri ile uyumlu olması gerekmektedir. Bu amaçla, laboratuvarda yapılması planlanan küçük ölçekli kemer baraj için, İngiltere’de 1968 yılında düzenlenen “Arch Dams (1968)” sempozyumunda önerilen farklı geometrilere sahip beş tip kemer barajdan Tip-1 barajı seçilmiştir. Tip-1 kemer barajı, sabit yarıçaplı, sabit açılı ve tek eğrilikli bir geometriye sahip olduğu için tercih edilmiştir. Çünkü çift eğrilikli barajların geometrilerini tam olarak inşa etmek oldukça zordur. Bunun için önemli bir kalıp işçiliği gerekmektedir. Tip-1 kemer barajı diğer tiplere göre daha sadedir, dolayısıyla hatasız inşa edilme ihtimali diğer tip barajlara göre daha fazladır.

#### **2.2.1. Tip-1 Kemer Barajının Geometrik Özellikleri ve Boyutlandırılması**

Tip-1 kemer barajının plan ve anahtar kesit görünüşüne ait geometrik özellikleri Şekil 10’da verilmektedir. Şekil 10’da görüldüğü gibi mansap yüzü referans kabul edilen Tip-1 kemer barajı,  $106^\circ$ ’lik sabit merkez açısına ve 8.65 birimlik sabit yarıçapa sahip simetrik bir barajdır. Yüksekliği 6 birim olan Tip-1 kemer barajının, kret ve taban genişliliği 0.6 birimdir. Tip-1 kemer barajının, en kesiti Şekil 11’de verilen trapez kesitli bir vadi üzerine yerleştirildiği kabul edilmiştir (Arch Dams, 1968). Şekil 11’de görüldüğü gibi vadi, kret seviyesinde 16 birim, taban seviyesinde 4 birim genişliğe sahiptir.



Şekil 10. Tip-1 kemer barajının geometrik özellikleri (Arch Dams, 1968).

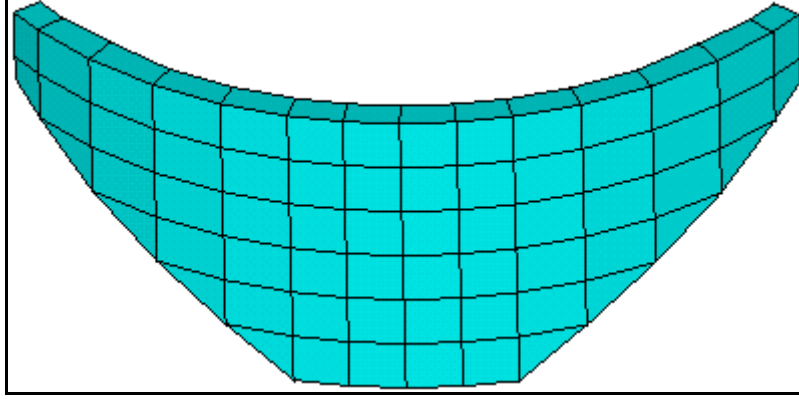


Şekil 11. Tip-1 kemer barajının yerleştirildiği vadinin en kesiti (Arch Dams, 1968).

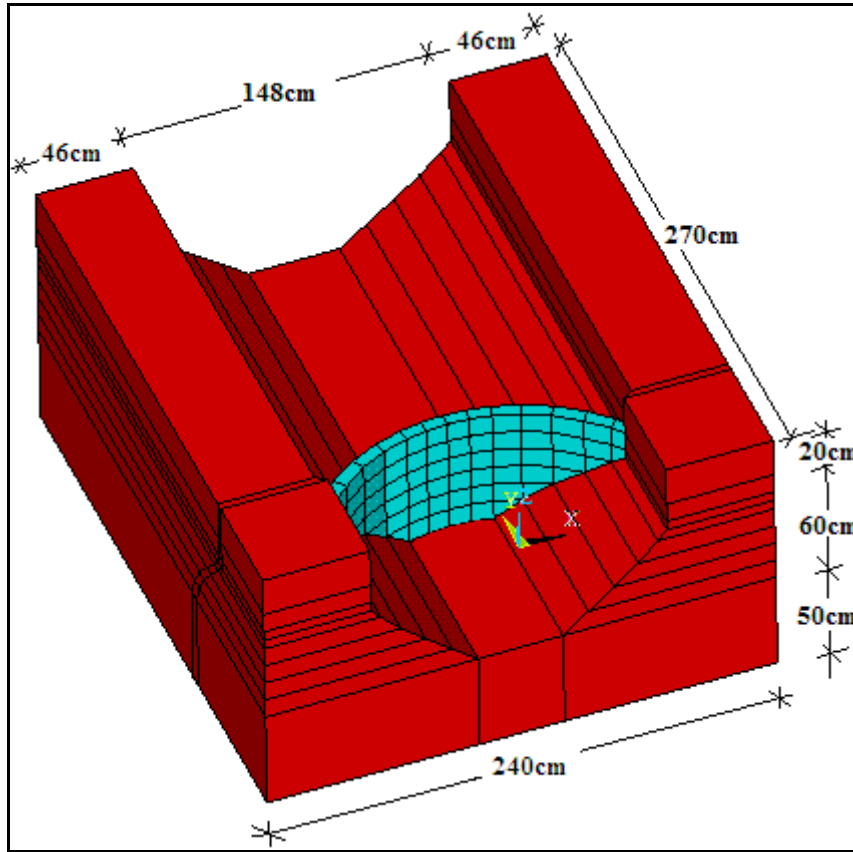
Boyutları birim olarak verilen Tip-1 kemer barajının laboratuvar modelini oluşturmak için, 1 birim=10 cm seçilmiştir. Buna göre baraj yüksekliği (H) 60 cm, kret ve taban genişliği 6 cm hesap edilmiştir. Barajın kret uzunluğu, memba kısmında 171.13 cm ve mansap kısmında 160.03 cm olarak hesaplanmıştır. Tip-1 kemer barajının bu hesaplara göre oluşturulan üç boyutlu modeli Şekil 12’de verilmektedir. Tip-1 kemer barajının dinamik davranışını gerçekçi bir şekilde belirleyebilmek için Şekil 12’de verilen baraj modeli, temel ve rezervuar içerecek şekilde geliştirilmiştir. Temel ve rezervuar uzunlukları, Bölüm 1.4’e uygun olarak seçilmiştir. Bu bağlamda, rezervuar uzunluğu baraj yüksekliğinin üç katı kadar, temel memba yönünde rezervuar uzunluğu kadar, mansap yönünde baraj yüksekliği kadar, akış yönüne dik doğrultularda ve düşey yönde yaklaşık



baraj yüksekliği kadar uzatılmıştır. Bu özelliklere göre hazırlanan Tip-1 kemer barajına ait  boyutlu baraj-rezervuar-temel modeli ve bu modelin boyutları Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 12. Tip-1 kemer barajının  boyutlu modeli



Şekil 13. Tip-1 kemer barajının  boyutlu baraj-rezervuar-temel modeli

### 2.2.2. Tip-1 Kemer Barajının Laboratuar Modelinin İnşası

Boyutları Şekil 13'te verilen Tip-1 kemer barajının laboratuar modelinin inşasında malzeme olarak hem baraj hem de temel için beton tercih edilmiştir. Betonun yerleştirmek için temel dış kalıbı ise ahşap keresteden, baraj kemeri ve temel iç kalıbı ise çelik sacdan yapılmıştır. Kemer ve temel iç kalıbının ahşap keresteden yapılmasının zor olması ve kalıptan çıkacak beton yüzeyinin daha pürüzsüz olması sebebiyle çelik sac tercih edilmiştir.

#### 2.2.2.1. Çelik Sac Kalıba Ait Detaylar

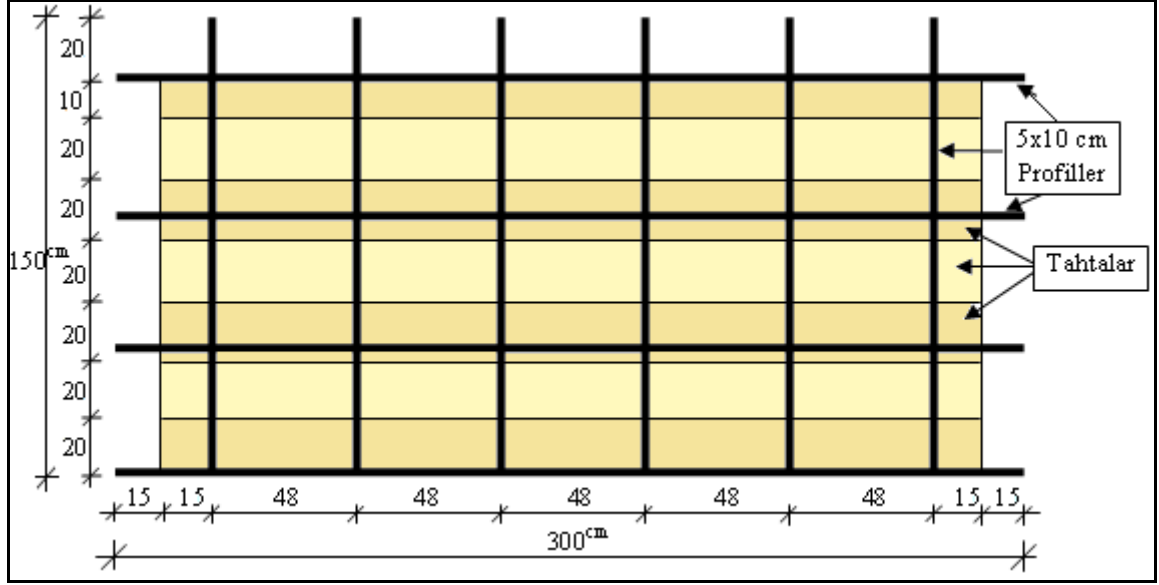
Tip-1 kemer barajının Şekil 13'te görüldüğü gibi, gövde kısmının eğriliğe sahip olması ve rezervuar kısmının değişken olması sebebiyle iç yüzeyde kolay şekil verilebilen sac malzeme kullanılmıştır. Şekil 13 incelendiğinde iç kalıbın yerden 50 cm yukarıda askıda kalacağı anlaşılmaktadır. Fakat sac kalıba ait hiçbir elemanın beton içerisinde kalması istenmemektedir. Dolayısıyla sac kalıbın dış kalıpla bağlantısı beton dökülecek alana hiç temas etmeden yapılmalıdır. Ayrıca beton dökümü tamamlanıp kalıp alma zamanı geldiğinde, ince kemer olan baraj gövdesine hiçbir zarar gelmemelidir. Bu yüzden çelik kalıbı yaparken çok iyi bir işçilik gerekmektedir. Belirtilen kriterler dikkate alınarak imal edilen çelik kalıba ait bazı fotoğraflar Şekil 14'te verilmektedir. Şekil 14'te görüldüğü gibi, 1 ve 2 numaralı parçalar, mansap yüzeyinin sağ ve sol yamaçlarına; 5 ve 6 numaralı parçalar ise memba yüzeyinin sağ ve sol yamaçlarına ait olup birbirlerine göre simetrik yapılmıştır. 3 ve 4 numaralı iki parça barajın gövdesi için kemer formunda yapılmıştır. Çelik kalıp dış kalıba Şekil 14'te görülen 7 numaralı parçalarla (kulaklar) monte edilecektir. Şekil 14'te görüldüğü gibi parçalar birbirlerine levhalar ve L30.30.3 profillerle bağlanmıştır. Parçalar birbirine civatayla birleştirilerek bütün hale getirilmiştir. Çelik kalıbın oluşturulmasında et kalınlığı 2 mm olan toplam 150 kg sac ve profil kullanılmıştır.



Şekil 14. Çelik kalıba ait bazı fotoğraflar

### 2.2.2.2. Ahşap Kalıba Ait Detaylar

Tip-1 kemer barajının dış yüzeyi Şekil 13'te görüldüğü gibi ikişer adet  $270 \times 130 \text{ cm}^2$  ve  $240 \times 130 \text{ m}^2$  boyutlarındaki alanlardan oluşmaktadır. Her bir alan için panel kalıplar yapılmıştır. Panel kalıplar, belirli aralıklarla yerleştirilmiş  $5 \times 10 \text{ cm}$ 'lik ahşap profillerin üzerine tahtalar monte etmek suretiyle oluşturulmuştur. Şekil 15'te  $270 \times 130 \text{ cm}^2$  boyutlu yüzey için hazırlanan panel kalıp planı verilmektedir. Şekil 15'te görüldüğü gibi panelde altı tane  $20 \text{ cm}$  ve bir tane  $10 \text{ cm}$  eninde tahta kullanılmıştır.  $5 \times 10 \text{ cm}$ 'lik ahşap profillerin arasındaki mesafe ise yaklaşık  $45\text{-}50 \text{ cm}$  alınmıştır. Ahşap kalıp, içerisine yerleştirilecek taze betondan gelecek basıncı, formu bozulmadan taşıyacak sağlamlıkta olmalıdır. Dolayısıyla kalıp içerisine dökülecek taze betonun kalıplarda açılmaya sebep olmaması için profiller arasındaki mesafe kısa tutulmuştur. Dış panelleri oluşturulan ahşap kalıbı sağlamlaştırmak için, panellerden yere çapraz  $5 \times 10 \text{ cm}$ 'lik ahşap profiller uzatılmıştır. Ayrıca panellerin içinden  $8 \text{ mm}$  çaplı demir geçirilerek kelepçelerle tutturulmuştur. Dış kalıbın içerisine yerleştirilen çelik kalıp, kulaklarından paneller üzerinden uzatılan  $5 \times 10 \text{ cm}$ 'lik ahşap profillere monte edilmiştir. Böylelikle çelik kalıbın tüm yönlerde hareketi tutularak denge konumunda sabitlenmiştir. Yaklaşık  $1500 \text{ dm}^3$  kereste kullanılarak oluşturulan ahşap kalıbın yapımına ait bazı fotoğraflar Şekil 16'da verilmektedir.



Şekil 15. (270 x 130) cm<sup>2</sup> boyutlu yüzey için hazırlanan kalıp planı



Şekil 16. Ahşap kalıbın yapımına ait bazı fotoğraflar



### 2.2.2.3. Beton Dökümüne Ait Detaylar

Beton dökümünden önce ahşap ve çelik kalıp yağlanmıştır. Böylelikle kalıpların sertleşmiş betondan kolaylıkla çıkması sağlanmıştır. Döküm öncesi diğer kontrollerde yapılarak ortam, beton dökümüne müsait hale getirilmiştir. İstenen özellikteki beton, hazır beton santralinden tedarik edilmiştir. Tip-1 kemer baraj-rezervuar-zemin sistemi için yaklaşık 6.5 m<sup>3</sup> beton kullanılmıştır. Laboratuara getirilen beton, kalıba kontrollü bir şekilde homojen olarak dökülmüştür. Döküm sırasında betonun iyi sıkışması ve kalıbın pürüzsüz bir yüzeye sahip olması için vibratör kullanılmıştır. Barajın kemer kısmına, narin olduğu için daha fazla özen gösterilmiştir. Kemer kısmı ince olduğu için buraya dökülen betonun maksimum agrega dane çapı 9-12 mm ile sınırlandırılmıştır. Bu kısımda, vibratör sığmadığı için şişlenerek sıkılaştırma yapılmıştır. Betonun mukavemetini ölçmek için, döküm sırasında betonun çeşitli yerlerinden numuneler alınarak küp şeklindeki kaplara konulmuştur. Beton dökümüne ait bazı fotoğraflar Şekil 17’de verilmektedir.



Şekil 17. Beton dökümüne ait bazı fotoğraflar

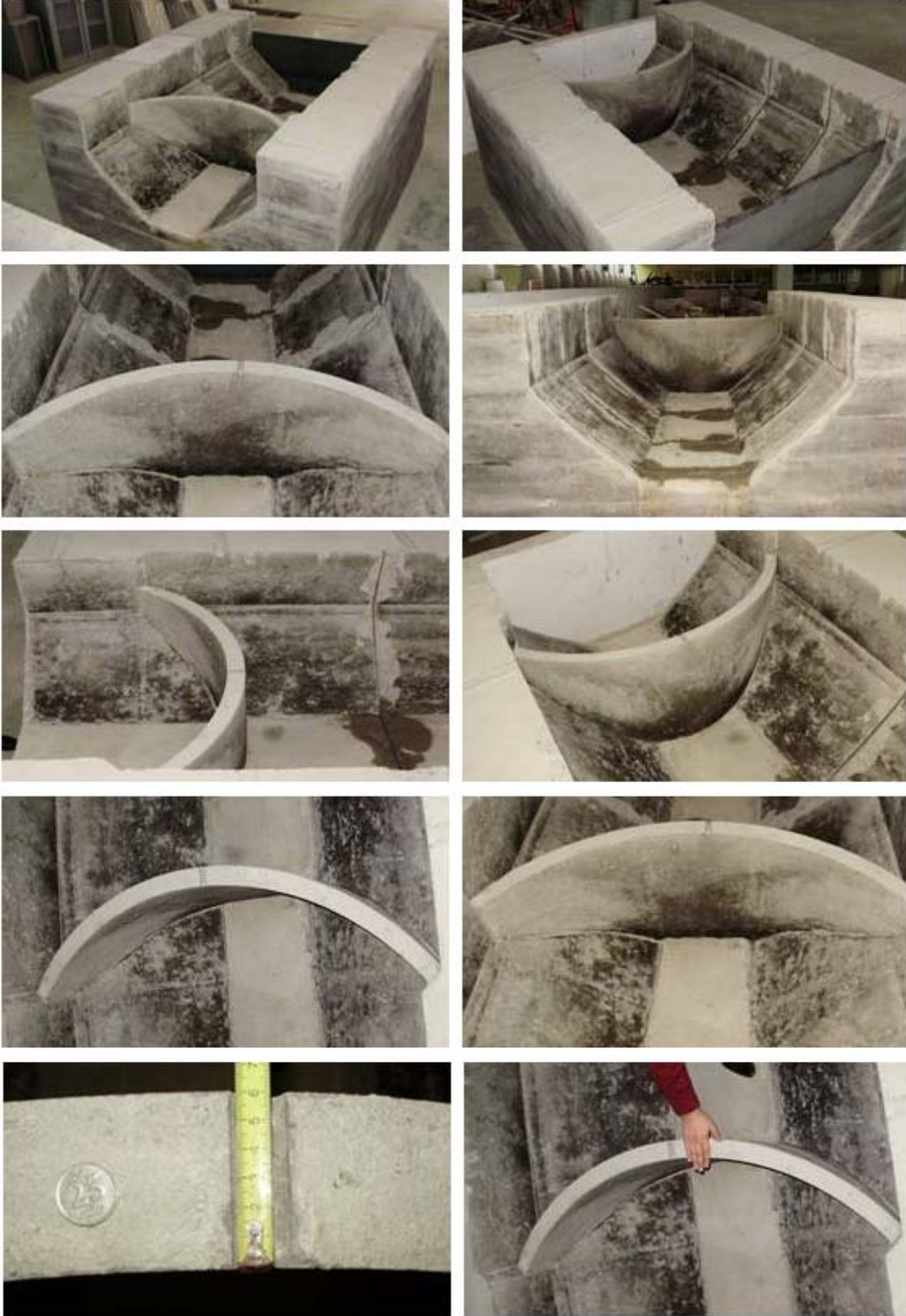
#### 2.2.2.4. Beton Dökümünden Sonraki Detaylar

Beton dökümü bittikten sonra yaklaşık iki hafta boyunca her gün sabah ve akşam olmak üzere beton sulanarak kür yapılmıştır. Ahşap kalıp, beton dökümünden on gün sonra, çelik kalıp ise üç hafta sonra sökülerek Tip-1 kemer barajının laboratuvar modeli ortaya çıkmıştır. Ahşap kalıp söküldükten sonra modele ait bazı fotoğraflar Şekil 18’de, modelin bitmiş haline ait bazı fotoğraflar Şekil 19’da verilmektedir.



Şekil 18. Ahşap kalıp söküldükten sonra modele ait bazı fotoğraflar





Şekil 19. Tip-1 kemer baraj modelinin bitmiş haline ait bazı fotoğraflar

### 2.2.3. Tip-1 Kemer Barajının Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Tip-1 kemer barajının sonlu eleman yöntemine göre analizlerinin gerçekleştirilmesi için elastisite modülü, kütle yoğunlu ve Poisson oranı gibi malzeme özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tip-1 kemer barajının inşası için kullanılan beton hazır beton santralinde üretilmiştir. Üretimde kullanılan malzeme karışımları Tablo 5'te verilmektedir.

Tablo 5. Tip-1 kemer barajının inşasında kullanılan malzeme karışımları

Bileşen	Baraj	Temel
Hacim	0.044 m <sup>3</sup>	6.21 m <sup>3</sup>
Agrega (10-22mm)	-	712 kg/m <sup>3</sup>
Agrega (3-9mm)	1556 kg/m <sup>3</sup>	874 kg/m <sup>3</sup>
Agrega (0-2mm)	175 kg/m <sup>3</sup>	175 kg/m <sup>3</sup>
Çimento (Ç)	360 kg/m <sup>3</sup>	360 kg/m <sup>3</sup>
Su (S)	210 kg/m <sup>3</sup>	180 kg/m <sup>3</sup>
Ç/S	0.58	0.5
Katkı	3.14 kg/m <sup>3</sup>	3.24 kg/m <sup>3</sup>
Toplam	101.4 kg	14309.3 kg

Tip-1 kemer barajının malzeme özelliklerini belirlemek için, tek eksenli basınç deneyleri ve ultrasonik hız testleri yapılmıştır. Tek eksenli basınç deneylerinde, beton dökümü sırasındaki taze betondan; model bittikten ve kalıplar alındıktan sonra sertleşmiş betondan numuneler alınarak deneyler gerçekleştirilmiş ve betonun basınç dayanımı belirlenmiştir. Elde edilen basınç dayanımları yardımıyla bazı ampirik formüllerle betonun elastisite modülü belirlenmeye çalışılmıştır. Ultrasonik hız testlerinde ise betondan geçen ses dalgası hızı ölçülmekte ve bu hıza bağlı geliştirilen ampirik formüller kullanılarak betonun elastisite modülü belirlenmektedir.

#### 2.2.3.1. Tek Eksenli Basınç Deneyleri

Tek eksenli basınç deneyleri için, beton dökümü sırasında üç adet 15 cm'lik küp numune taze betondan, dört adet 10 cm çapında yükseklikleri farklı silindir karot numune barajın temel kısımlarından alınmıştır. Numunelerin alınmasına ve hazırlanmasına ilişkin bazı fotoğraflar Şekil 20'de verilmektedir.





Şekil 20. Numunelerin alınmasına ve hazırlanmasına ilişkin bazı fotoğraflar

Küp numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını belirlemek için yapılan tek eksenli basınç deneylerine ilişkin bazı fotoğraflar Şekil 21’de, testlerden elde edilen bazı özellikler Tablo 6’da verilmektedir. Tablo 6’dan görüldüğü gibi, küp numunelerin basınç dayanımları 33.9-39.4 MPa arasında değişmektedir.

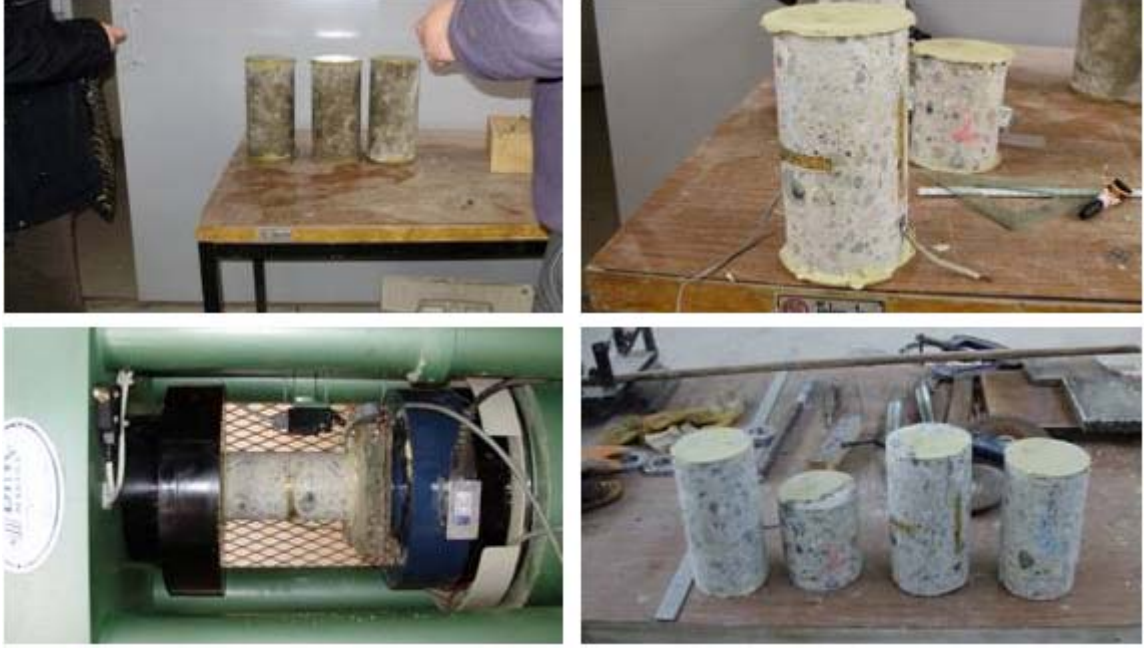


Şekil 21. Küp numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden bazı fotoğraflar

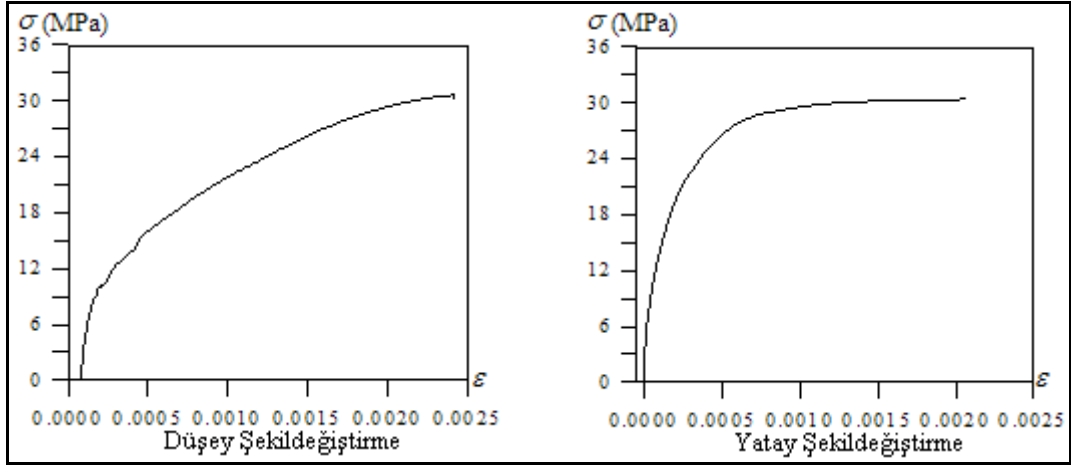
Tablo 6. Küp numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen bazı özellikler

Numune	Alan (cm <sup>2</sup> )	Hacim (cm <sup>3</sup> )	Kütle (kg)	Kütle Yoğunluğu (kg/cm <sup>3</sup> )	Yaş (Gün)	Kırılma Yüğü (kgf)	Dayanım (f <sub>küp</sub> ) (kgf/cm <sup>2</sup> )	Dayanım (f <sub>küp</sub> ) (MPa)
1	225	3375	7.753	2.30E-3	7	76216	338.7	33.9
2	225	3375	7.707	2.28E-3	28	83822	370.3	37.0
3	225	3375	7.798	2.31E-3	28	88696	394.2	39.4

Silindir karot numuneler, beton dökümünden 75 gün sonra temelin farklı yerlerinden alınmıştır. Kemer kısmı narin olduğundan; yapısal davranışın etkilenmemesi için bu bölgeden numune alınamamıştır. Alınan numunelerde, silindir yüksekliğinin çapa oranı ( $H_{sil}/D_{sil}$ ) birbirinden farklıdır. Hâlbuki standartlarda bu oran ( $H_{sil}=30$  cm ve  $D_{sil}=15$  cm) 2'dir (TS 3502, 1981). Dolayısıyla silindir numunelerin, tek eksenli basınç deneyinden elde edilen başlangıç basınç dayanımları  $H_{sil}/D_{sil}$  oranına bağlı olarak TS 3502'de (1981) verilen düzeltme faktörleriyle çarpılarak nihai basınç dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca, Tablo 7'de gösterilen 3 no'lu numuneye yatay ve düşeyde şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılarak, betonun gerilme-şekildeğiştirme grafiği ve Poisson oranı elde edilmiştir. Numunelerin tek eksenli basınç deneylerine ait bazı fotoğraflar Şekil 22'de; betonun gerilme-şekildeğiştirme grafiği ise Şekil 23'te verilmektedir. Testlerden elde edilen bazı özellikler Tablo 7'de verilmektedir.



Şekil 22. Silindir numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden bazı fotoğraflar



Şekil 23. 3 no'lu silindir numuneden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafiği

Tablo 7. Silindir numunelerin tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen bazı özellikler

Numune	Yükseklik (cm)	Çap (cm)	H/D	Düzeltilme Faktörü	Yaş (Gün)	Kırılma Yüğü (N)	Başlangıç Dayanımı ( $f_{sil}$ ) (MPa)	Nihai Dayanım ( $f_{sil}$ ) (MPa)
1	17.7	10	1.77	0.991	75	196850	28.36	28.10
2	11.1	10	1.11	0.923	75	152000	21.90	20.21
3	17.9	10	1.79	0.992	75	212720	30.65	30.40
4	16.1	10	1.61	0.979	75	168010	24.21	23.70

Şekil 23'te, betonun dinamik elastisite modülü, nihai gerilmenin %20'sine karşılık gelen gerilme-sekildeğiştirme oranından; statik elastisite modülü ise nihai gerilmenin %40'ına karşılık gelen gerilme-sekildeğiştirme oranından hesaplanmıştır (Mehta, 1986). Buna göre elde edilen gerilme, şekildeğiştirme ve elastisite modülü değerleri Tablo 8'de verilmektedir.

Betonun diğer bir malzeme özelliği olan Poisson oranı genellikle 0.15-0.20 arası bir değer almaktadır. Fakat Poisson oranının agrega, çimento, su miktarı gibi beton parametreleriyle doğrudan bir ilişkisi yoktur. Bununla birlikte, Poisson oranı yüksek dayanımlı betonlar için düşük, normal dayanımlı betonlar için ise yüksektir (Mehta, 1986).

Tablo 8. 3 no'lu numuneye ait gerilme-şekildeğiştirme grafiğinden elde edilen özellikler

Nihai Dayanım ( $f_{sil}$ ) (MPa)	0.2 $f_{sil}$ (MPa)	0.4 $f_{sil}$ (MPa)	$\epsilon_{0.2}$	$\epsilon_{0.4}$	Dinamik Elastisite Modülü (MPa) $0.2f_c/\epsilon_{0.2}$	Statik Elastisite Modülü (MPa) $0.4f_c/\epsilon_{0.4}$
30.6	6.12	12.24	2.24E-4	6.99E-4	27306	17503

Beton heterojen bir malzeme olduğundan elastisite modülünü tam olarak bulmak neredeyse imkânsızdır. Bununla birlikte betonun elastisite modülü, betonda kullanılan agrega tipine, çapına, porozitesine, su/çimento oranına, sertleşmiş betona uygulanan yükleme hızına vs. bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Mehta, 1986). Literatürde betonun elastisite modülünü belirlemek için bazı ampirik denklemler geliştirilmiştir. Bu denklemlerin birçoğunda elastisite modülü, betonun basınç dayanımına ve kütle yoğunluğuna bağlı olarak hesaplanmaktadır (Arioğlu ve Arioğlu, 2005). Küp ve silindir numuneler için tek eksenli basınç testlerinden elde edilen basınç dayanımları kullanılarak Tip-1 kemer barajının temel kısmına ait elastisite modülleri bazı standartlara göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

TS 500' e (2000) göre betonun dinamik elastisite modülü  $E_d$ ,

$$E_d = 3250\sqrt{f_{sil}} + 14000 \text{ (MPa)} \quad (72)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $f_{sil}$  (MPa), silindir numunenin basınç dayanımını göstermektedir.

Barlett (1994) denkleminde göre betonun dinamik elastisite modülü  $E_d$ ,

$$E_d = \frac{10^5 f_{küp}}{48 + 1.733 f_{küp}} \text{ (MPa)} \quad (73)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $f_{küp}$  (MPa) küp numunenin basınç dayanımını göstermektedir.

ACI Building Code 318-83'e (Neville, 1984) göre betonun statik elastisite modülü  $E_s$ ,

$$E_s = \frac{\gamma_{bet}^{1.5} * 33 \sqrt{f_{sil}}}{1000} \text{ (MPa)} \quad (74)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $\gamma_{bet}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) ve  $f_{sil}$  (MPa) sırasıyla silindir numunenin kütle yoğunluğunu ve basınç dayanımını göstermektedir.

British Code of Practice CP 110'a (1972) göre betonun statik elastisite modülü  $E_s$ ,

$$E_s = 9100 \sqrt[3]{f_{küp}} \text{ (MPa)} \quad (75)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $f_{küp}$  (MPa) küp numunenin basınç dayanımını göstermektedir.

ACI 363 R-84'e (1993) göre betonun statik elastisite modülü  $E_s$ ,

$$E_s = (3300 \sqrt{f_{sil}} + 6900) \left( \frac{\gamma_{bet}}{2320} \right)^2 \text{ (MPa)} \quad (76)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $\gamma_{bet}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) ve  $f_{sil}$  (MPa) sırasıyla silindir numunenin kütle yoğunluğunu ve basınç dayanımını göstermektedir.

CEB/FIB MC 90'a (Eibl, 1995) göre betonun statik elastisite modülü  $E_s$ ,

$$E_s = 21500\alpha_\beta \sqrt[3]{\frac{f_{sil}}{10}} \text{ (MPa)} \quad (77)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\alpha_\beta$  agrega faktörünü,  $f_{sil}$  (MPa) silindir numunenin basınç dayanımını göstermektedir.  $\alpha_\beta$  agrega tipine göre değişken olmaktadır. Bu değer Tip-1 kemer barajında kullanılan agrega tipi için 0.8'dir (Arıoğlu ve Arıoğlu, 2005).

Yukarıda verilen bağıntılara göre betonun dinamik veya statik elastisite modülü hesaplanmaktadır. Literatürde dinamik ve statik elastisite modülleri arasındaki geçişi sağlamak için bazı ampirik denklemler geliştirilmiştir. Bu denklemlerden ikisi Popovic ve İtalyan bağıntılarıdır (Cabrera ve Pozzo, 1992).

Popovics'e (Cabrera and Pozzo, 1992) göre bu ilişki aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$E_s = 2590 \frac{\left(\frac{E_d}{703}\right)^{1.4}}{\delta_{bet}} \text{ (MPa)} \quad (78)$$

İtalyan'a (Cabrera and Pozzo, 1992) göre bu ilişki aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$E_s = 1.25E_d - 19000 \text{ (MPa)} \quad (79)$$

Denklem (78) ve (79)'da,  $E_s$  (MPa) ve  $E_d$  (MPa) sırasıyla betonun statik ve dinamik elastisite modüllerini,  $\delta_{bet}$  ( $\text{kN/m}^3$ ) ise betonun birim hacim ağırlığını göstermektedir.

Yukarıda verilen bağıntılara göre, küp ve silindir numuneler için elde edilen elastisite modülleri Tablo 9'da verilmektedir. Tablo 9'dan görüldüğü gibi, her bir numune için elastisite modülleri birbirinden farklı elde edilmiştir.

Tablo 9. Tip-1 kemer barajının temel kısmı için tek eksenli basınç deneylerinden elde edilen elastisite modülleri

Numuneler	Yaş (Gün)	Dayanım (MPa)	Statik Elastisite Modülü (MPa)				Dinamik Elastisite Modülü (MPa)		Statik Elastisite Modülü (MPa)		
			ACI 318-83	CP 110	ACI 363-84	CEB/FIB MC 90	TS 500	Barlett	Popovics	Italian	
Küp	1	7	33.9	-	29448	-	-	-	31757	23357	20696
	2	28	37.0	-	30286	-	-	-	33000	24646	22250
	3	28	39.4	-	30961	-	-	-	33884	25576	23355
Silindir	1	75	28.1	19296	-	23978	24271	31228	-	22814	20035
	2	75	20.2	16364	-	21366	21741	28611	-	20183	16764
	3	75	30.4	20070	-	24668	24916	31919	-	23524	20900
	4	75	23.7	17721	-	22575	22931	29822	-	21389	18278

### 2.2.3.2. Ultrasonik Hız Testleri

Ultrasonik hız testlerinde, Tip-1 kemer barajının kemer ve temelinin çeşitli noktalarından ses geçiş hızları ölçülmüştür. Bu yöntemde, betonun dinamik elastisite modülü ses geçiş hızına bağlı olarak ampirik bir formülle hesaplanmaktadır (BS 1881, 1986). Bu bağıntıya göre betonun dinamik elastisite modülü  $E_d$ ,

$$E_d = \gamma_{bet} v^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \text{ (MPa)} \quad (80)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada,  $\mu$  Poisson oranını,  $\gamma_{bet}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) betonun kütle yoğunluğunu ve  $v$  (km/s) ses hızını göstermektedir.

Ultrasonik hız testlerinden elde edilen ses hızlarına bağlı olarak, içerisinde genel agrega tipini barındıran bir betonun statik ve dinamik elastisite modülleri arasında ilişki kurulabilmektedir. Bu ilişki BS 1881'de (1986)  $\% \pm 10$  hata payı ile hesaplanmaktadır (Tablo 10).

Tablo 10. Ultrasonik ses hızına bağlı elastisite modülü değerleri (BS 1881, 1986)

Ses Hızı (km/s)	Elastisite Modülü	
	Dinamik (MPa)	Statik (MPa)
3.6	24000	13000
3.8	26000	15000
4.0	39000	18000
4.2	32000	22000
4.4	36000	27000
4.6	42000	34000
4.8	49000	43000
5.0	58000	52000

Tip-1 kemer barajı üzerinde, beton dökümünden 45 gün sonra ultrasonik hız testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, baraj kemeri ve temeli için değişik üçer noktaya uygulanmıştır. Testlere ait bazı fotoğraflar Şekil 24'te verilmektedir. Testlerde hata payının azaltmak için



her noktadan ortalama beş okuma yapılmıştır. Testlerde elde edilen okumalar Tablo 11’de, okumalara bağlı olarak belirlenen elastisite modülleri Tablo 12’de verilmektedir.



Şekil 24. Tip-1 kemer barajında yapılan ultrasonik hız testlerine ait bazı fotoğraflar

Tablo 11. Tip-1 kemer barajında ultrasonik hız testlerinden yapılan okumalar

Okumalar	Kemer 1 (km/s)	Kemer 2 (km/s)	Kemer 3 (km/s)	Temel 1 (km/s)	Temel 2 (km/s)	Temel 3 (km/s)
1	3.8	3.95	3.75	3.76	3.75	4.05
2	3.80	3.95	3.80	3.76	3.90	3.85
3	3.80	3.90	3.85	3.57	3.90	3.80
4	3.90	3.80	3.80	3.56	3.90	3.75
5	3.80	3.80	3.80	3.32	3.80	3.90
Ortalama	3.83	3.88	3.80	3.59	3.85	3.87

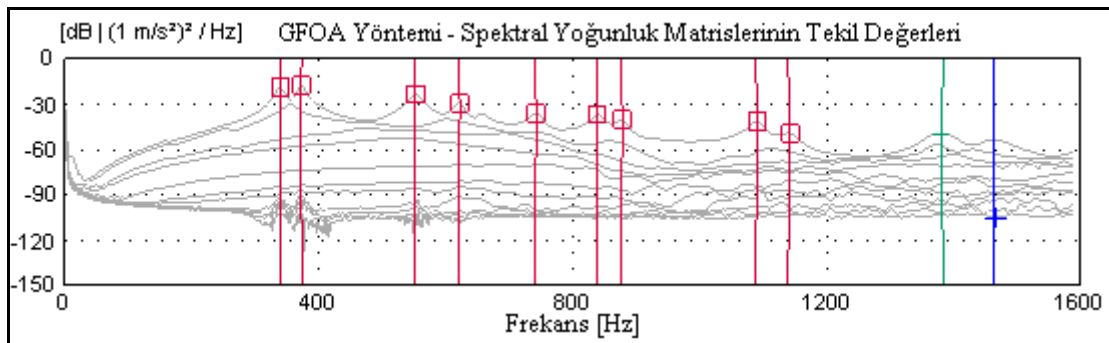
Tablo 12. Tip-1 kemer barajının ultrasonik hız testlerinden belirlenen elastisite modülleri

	Kemer 1	Kemer 2	Kemer 3	Temel 1	Temel 2	Temel 3
Hız (km/s)	3.830	3.880	3.800	3.594	3.850	3.870
Dinamik Elastisite Modülü (MPa)	27950	31200	26000	24000	29250	30550
Statik Elastisite Modülü (MPa)	15450	16200	15000	13000	15750	16050

### 2.2.3.3. Çevresel Titreşim Testleri ve Sonlu Eleman Analizi

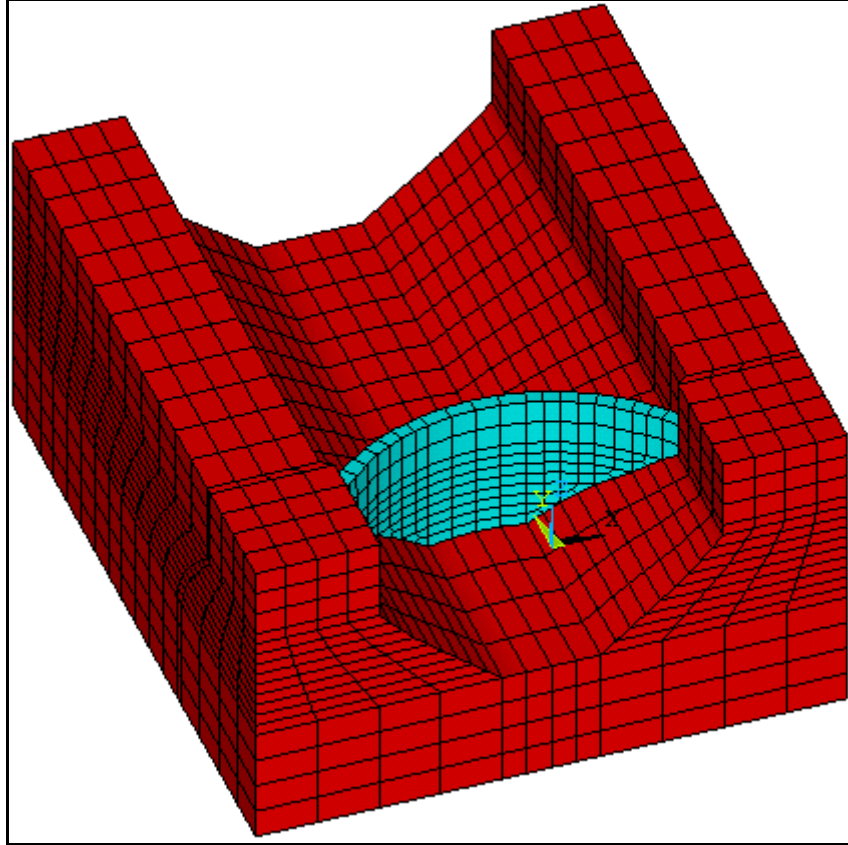
Bölüm 2.2.3.1 ve 2.2.3.2 incelendiğinde, Tip-1 kemer barajının inşasında kullanılan betonun malzeme özelliklerini belirlemek için yapılan tek eksenli basınç deneylerinden ve ultrasonik hız testlerinden, betonun birim kütle yoğunluğu ( $\gamma_{bet}$ ) ve Poisson oranı ( $\mu$ ) sırasıyla yaklaşık  $2300 \text{ kg/m}^3$  ve 0.2 olarak belirlenmiştir. Fakat betonun elastisite modülü konusunda tam olarak net bir bilgiye ulaşılamamıştır. Bununla birlikte gerçekleştirilen testlerden betonun elastisite modülü 13000-30000 MPa arasında tespit edilmiştir.

Tez çalışmasının bu kısmında, Tip-1 kemer barajında, kemer ve temel için kullanılan betonun elastisite modülü, Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) elde edilmektedir. Bunun için öncelikle Tip-1 kemer barajına, rezervuarın boş olması durumunda çevresel titreşim testleri uygulanarak doğal frekanslar elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen frekansları analitik olarak da bulmak için Tip-1 kemer barajının üç boyutlu Sonlu Eleman Modeli (SEM) rezervuarın boş olması durumu için oluşturulmuş ve modal analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 25'te Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinde toplanan sinyallerin işlenerek Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) Yöntemi ile elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonlarının tekil değerleri verilmektedir.



Şekil 25. Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri

Tip-1 kemer barajının rezervuarının boş olması için oluşturulan sonlu eleman modeli Şekil 26'da verilmektedir. Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinde kemer ve temel için malzeme birim hacim ağırlığı ve Poisson oranları yukarıda belirtildiği gibi sırasıyla  $2300 \text{ kg/m}^3$  ve 0.2 olarak alınmıştır. Elastisite modülleri ise değişken seçilerek deneysel frekanslara en yakın analitik frekanslar belirlenmiştir. Tablo 13'te, Tip-1 kemer barajı için elde edilen deneysel frekanslar ve farklı elastisite modülleri için elde edilen analitik frekanslar yer almaktadır. Tablo 13'te görüldüğü gibi, Durum 4 için elde edilen analitik frekanslar deneysel frekanslara diğer durumlara göre elde edilen analitik frekanslardan daha çok yaklaşmıştır. Deneysel ve Durum 4 için elde edilen analitik frekanslar arasında %2.9 gibi makul sayılabilecek bir fark vardır. Durum 4'te baraj betonunun ve temel betonunun elastisite modülleri sırasıyla 15500 ve 20000 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 26. Tip-1 kemer barajının üç boyutlu baraj-rezervuar-temel sonlu eleman modeli

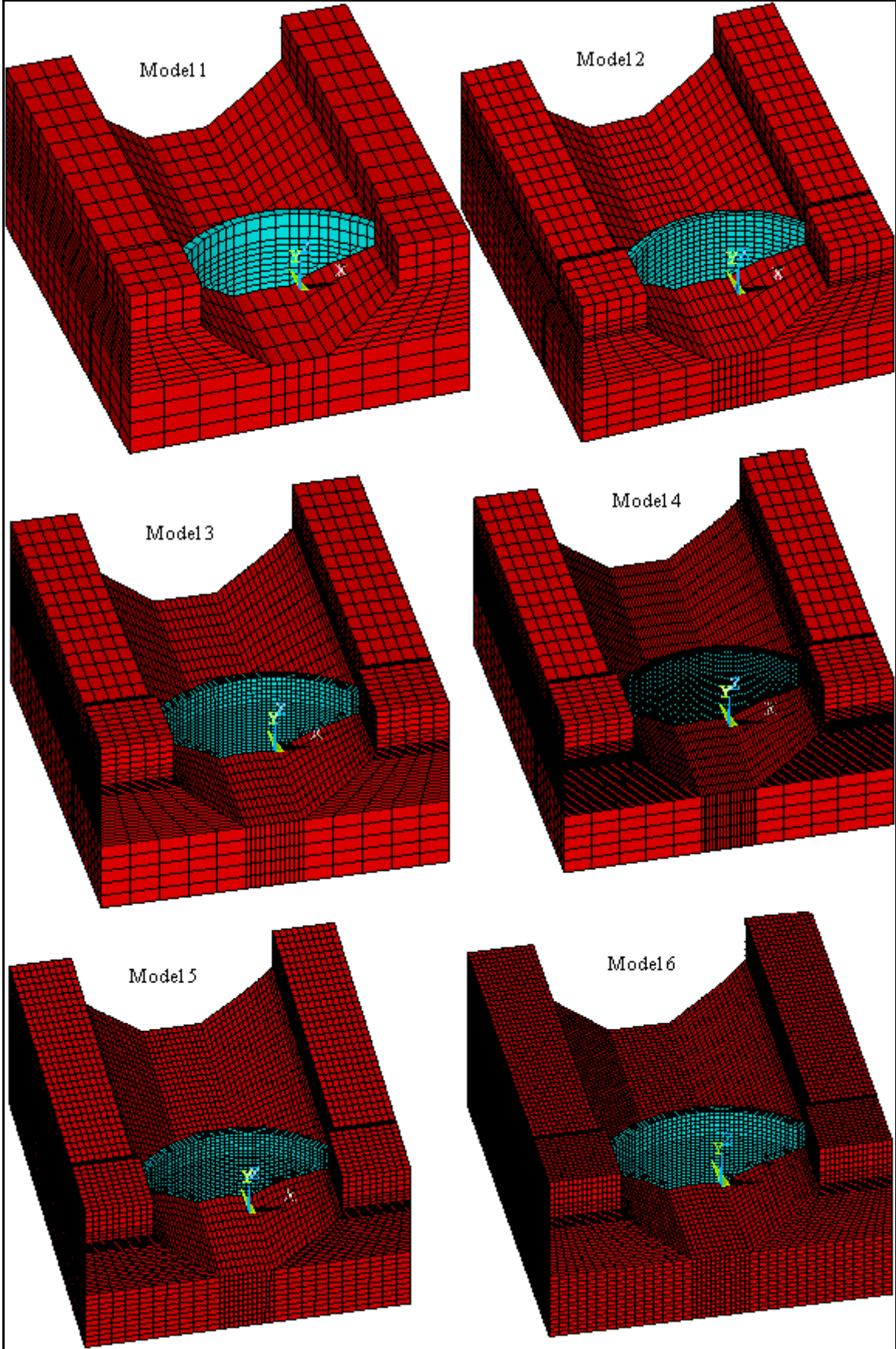
Tablo 13. Tip-1 kemer barajının farklı elastisite modülleri için hesaplanan analitik ve deneysel doğal frekansları

Mod	Deneysel Frekanslar (Hz)	Analitik Frekanslar (Hz)									
		<u>Durum 1</u>		<u>Durum 2</u>		<u>Durum 3</u>		<u>Durum 4</u>		<u>Durum 5</u>	
		E* (MPa) E <sub>b</sub> :16000 E <sub>t</sub> :16000	Fark %	E* (MPa) E <sub>b</sub> :18000 E <sub>t</sub> :18000	Fark %	E* (MPa) E <sub>b</sub> :20000 E <sub>t</sub> :20000	Fark %	E* (MPa) E <sub>b</sub> :15500 E <sub>t</sub> :20000	Fark %	E* (MPa) E <sub>b</sub> :17500 E <sub>t</sub> :20000	Fark %
1	339.2	355.89	4.9	377.47	11.3	397.89	17.3	348.87	2.8	374.49	10.4
2	372.6	373.05	0.12	395.68	6.2	417.08	11.9	364.81	2.1	392.08	8.99
3	552.3	522.14	5.5	553.81	0.27	583.77	5.7	510.22	7.6	548.59	0.67
4	619.8	673.47	8.6	714.32	15.2	752.96	21.5	658.45	6.2	707.74	14.2
5	741.1	696.48	6.0	738.72	0.3	778.69	5.0	740.70	0.1	761.70	2.8
6	839.0	888.32	5.9	942.21	12.3	993.18	18.4	836.73	0.3	936.93	11.7
7	875.5	920.01	5.1	975.81	11.5	1028.6	17.5	898.70	2.6	966.44	10.4
8	1088	1065.9	2.0	1045.2	3.9	1059.1	2.7	1070.8	1.6	1057.9	2.8
E*: Elastisite Modülü		E <sub>b</sub> : Barajın Elastisite Modülü				E <sub>t</sub> : Temelin Elastisite Modülü					

#### 2.2.4. Tip-1 Kemer Barajının Sonlu Eleman Ağı Seçimi

Mühendislik yapılarının sonlu eleman yöntemine dayalı analizlerinde ağ seçimi sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu sebepten, sonuçların güvenilir sayılabilmesi için optimum sonlu eleman ağını seçmek gerekmektedir. Yapılan literatür araştırmasında, kemer barajlar için sonlu eleman ağı seçimiyle ilgili kesin bir bilgiye ulaşılamamıştır. Fakat çeşitli ağ boyutlarına sahip sonlu eleman modelleri geliştirilerek yapılan analizlerden (statik, modal, dinamik, vs.) elde edilen sonuçların birbirine yakınsaması durumunda ideal sonlu eleman modeline karar verilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, Tip-1 kemer barajının dinamik karakteristikleri belirlenmesi amaçlandığı için, barajın modal analizlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılacak modeline karar vermek için sonlu eleman ağı seçimi yapılmıştır. Bunun için Tip-1 kemer barajının Şekil 13'te verilen üç boyutlu modeli, altı farklı sonlu eleman ağı içerecek şekilde modellenmiş ve modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen periyotlar her bir model için birbiriyle karşılaştırılarak uygun olan sonlu eleman modeline karar verilmiştir. Analizlerde, Bölüm 2.2.3.3'te belirtilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. Tip-1 kemer barajının sonlu eleman modelleri ANSYS (2008) programı kullanılarak oluşturulmuş ve barajın hem kemer hem de temel kısmı SOLID45 elemanı ile modellenmiştir. Tip-1 kemer barajının farklı sonlu eleman ağı içeren modelleri Şekil 27'de, her bir model için kullanılan eleman sayısı ve analiz süresi Tablo 14'te ve her bir analizden elde edilen doğal periyotlar Tablo 15'te verilmektedir. Tablo 15 incelendiğinde, her bir modelden elde edilen doğal periyotlar diğer modellerden elde edilen doğal periyotlarla karşılaştırıldıklarında, aralarında çok büyük farklılıklar olmadığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla modellerden herhangi biri Tip-1 kemer barajının sonlu eleman modeli olarak seçilebilir. Eleman sayısının az ve analiz süresinin kısa olması sebebiyle Model 1, Tip-1 kemer barajının sonlu eleman modeli olarak kararlaştırılmış ve tez çalışmasının bundan sonraki kısmı için gerekli olan analitik çalışmalarda bu model kullanılmıştır.



Şekil 27. Tip-1 kemer barajının farklı sonlu eleman ağı içeren modelleri

Tablo 14. Tip-1 kemer barajının farklı sonlu eleman ağlarında kullanılan eleman sayısı ve analiz süreleri

Sonlu Eleman Ağı	Eleman Sayısı			Analiz Süresi
	Kemer	Temel	Toplam	
Model 1	148	2584	2732	1 dk
Model 2	480	5280	5760	2 dk
Model 3	2340	10400	12740	3 dk
Model 4	9540	16240	25780	5 dk
Model 5	2340	38700	41040	15 dk
Model 6	2340	94500	96840	90 dk

Tablo 15. Tip-1 kemer barajının farklı sonlu eleman ağları için gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen doğal periyotlar

Doğal Periyotlar (s)	Sonlu Eleman Ağı					
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
1	0.00287	0.00287	0.00290	0.00291	0.00291	0.00292
2	0.00274	0.00274	0.00277	0.00278	0.00278	0.00278
3	0.00196	0.00196	0.00197	0.00198	0.00198	0.00199
4	0.00152	0.00153	0.00158	0.00159	0.00159	0.00159
5	0.00147	0.00147	0.00149	0.00149	0.00149	0.0149
6	0.00143	0.00144	0.00144	0.00145	0.00145	0.00145
7	0.00135	0.00137	0.00138	0.00139	0.00139	0.00139
8	0.00126	0.00127	0.00128	0.00129	0.00129	0.00129
9	0.00120	0.00120	0.00121	0.00121	0.00121	0.00121
10	0.00111	0.00113	0.00117	0.00119	0.00118	0.00119

### 2.2.5. Rezervuar Yüksekliği Değişiminin Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi

Tez çalışmasının bu kısmında, Tip-1 kemer barajının rezervuarındaki su yüksekliğinin barajın dinamik karakteristikleri üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalar detaylıca anlatılmaktadır.

### 2.2.5.1. Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

60 cm yüksekliğe sahip Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için rezervuarın boş olması ve rezervuarda sırasıyla 10, 20, 30, 40, 50, 60 cm yüksekliğinde su bulunması durumları için barajın sonlu eleman modelleri ANSYS (2008) yazılımıyla oluşturulmuştur. Her bir rezervuar su yüksekliği durumunda oluşturulan sonlu eleman modelini belirtmek için aşağıdaki kısaltmalar kullanılmaktadır:

- $H_{a0}$ : Rezervuarın boş olması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $H_{a1}$ : Rezervuarda 10 cm su yüksekliği bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $H_{a2}$ : Rezervuarda 20 cm su yüksekliği bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $H_{a3}$ : Rezervuarda 30 cm su yüksekliği bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $H_{a4}$ : Rezervuarda 40 cm su yüksekliği bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $H_{a5}$ : Rezervuarda 50 cm su yüksekliği bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $H_{a6}$ : Rezervuarda 60 cm su yüksekliği bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli.

Her bir duruma ait sonlu eleman modelinde, baraj-rezervuar-temel etkileşimi Lagrange yaklaşımına göre temsil edilmiştir. Lagrange yaklaşımıyla ilgili detaylı bilgiler Bölüm 1.5'te mevcuttur. Bu yaklaşıma göre Tip-1 kemer barajının; kemer ve temel kısmı katı elemanlarla, rezervuar kısmı ise sıvı elemanlarla modellenmiştir. Her bir sonlu eleman modelinde katı elemanlar için SOLID45, sıvı elemanlar için ise FLUID80 kullanılmıştır (ANSYS, 2008). Hem SOLID45 hem de FLUID80 elemanı 8 düğüm noktasına sahip olup, her bir düğüm noktasında X, Y ve Z yönlerinde yerdeğiştirme serbestliğine sahiptir (ANSYS, 2008). Dolayısıyla Lagrange yaklaşımına uygun olarak, katı ve sıvı elemanlar arasında fazladan bir arayüzey denklemi oluşturmaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Tip-1 kemer barajının sonlu eleman modellerinde baraj-rezervuar-temel etkileşimini sağlamak için Bölüm 1.5.4'te denklem (37)'de verilen bağıntıya uygun olarak etkileşim yüzeylerinde yer alan düğüm noktalarının normalleri doğrultusunda 0.001 m uzunluğa sahip bağlantı



elemanları kullanılmıştır. Bu bağlantı elemanları bağladıkları düğüm noktalarının aynı hareketi yapmalarını sağlamaktadır. Bölüm 1.4'te ifade edildiği gibi Tip-1 kemer barajının her bir sonlu eleman modelinde temel, kütsüz kabul edilmiş ve temel dış yüzeyleri ankastre olarak tanımlanmıştır. Rezervuar suyunun memba yüzeyinde, düşey yerdeğiştirmeler serbest bırakılmış, yatay yerdeğiştirmeler tutulmuştur.

Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar yükseklikleri için oluşturulan her bir sonlu eleman modelinde kullanılan eleman tipleri ve sayıları Tablo 16'da verilmektedir. Tablo 16'da görüldüğü gibi, Tip-1 kemer barajı; rezervuarın boş olması durumunda toplam 2732 sonlu eleman, rezervuarın tam dolu olması durumunda ise toplam 4508 sonlu eleman kullanılarak temsil edilmektedir. Her bir modelin sonlu eleman analizinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 17'de verilmektedir. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Bölüm 2.2.3'te bahsedilen çalışmalar ışığında belirlenmiştir.

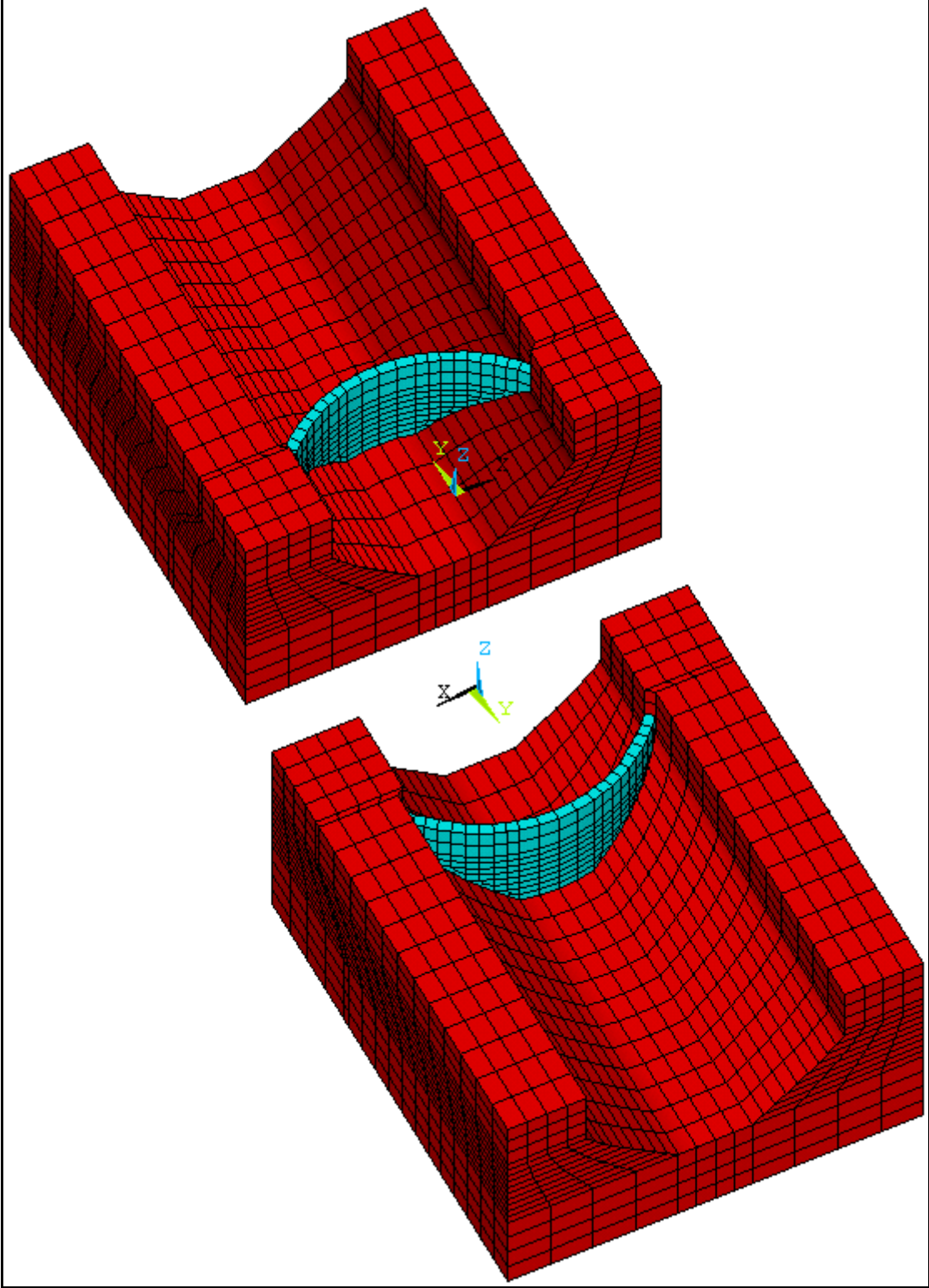
Tablo 16. Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar yüksekliği için oluşturulan sonlu eleman modellerine ait eleman tipleri ve sayıları

Sonlu Eleman Modeli	ANSYS Eleman Tipi	Eleman Sayısı						
		H <sub>a0</sub>	H <sub>a1</sub>	H <sub>a2</sub>	H <sub>a3</sub>	H <sub>a4</sub>	H <sub>a5</sub>	H <sub>a6</sub>
Kemer	SOLID45	148	148	148	148	148	148	148
Rezervuar	FLUID80	-	168	432	792	1248	1670	1776
Temel	SOLID45	2584	2584	2584	2584	2584	2584	2584
Toplam		2732	2900	3164	3524	3980	4402	4508

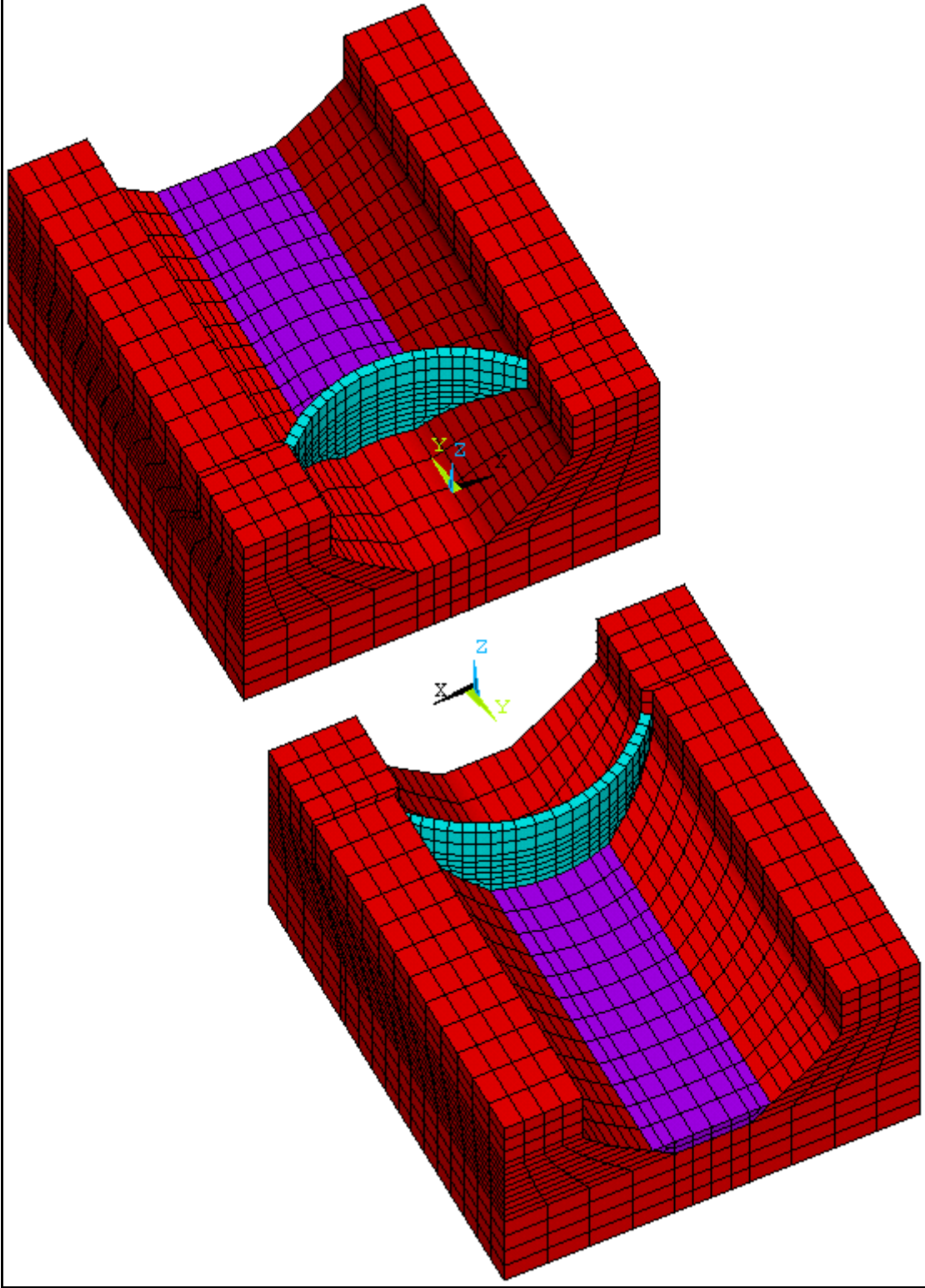
Tablo 17. Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

Sonlu Eleman Modeli	Malzeme Özellikleri		
	Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
Kemer	1.55E10	0.2	2300
Rezervuar	2.07E9	-	1000
Temel	2.0E10	0.2	-

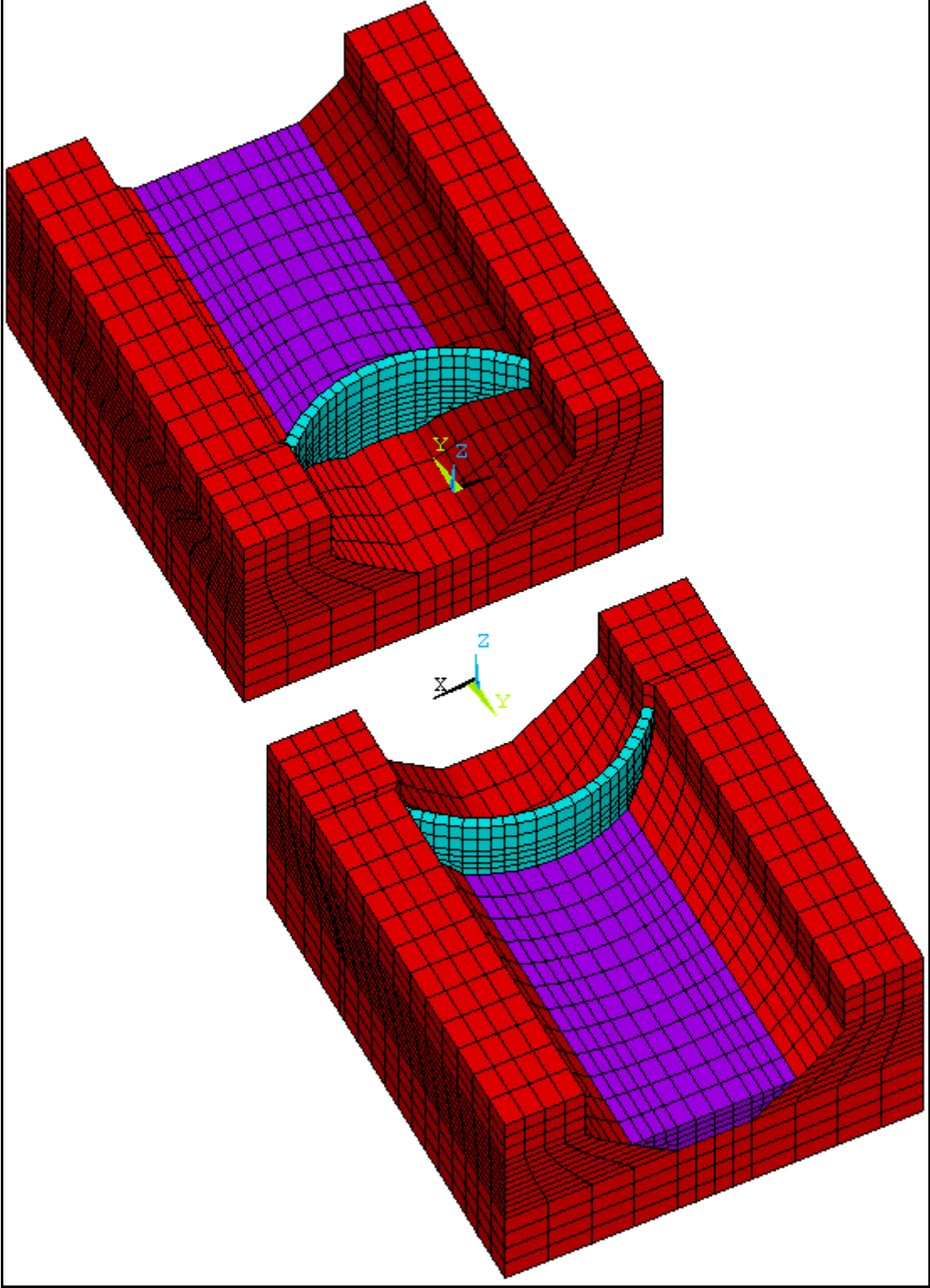
Tablo 16'da, eleman sayıları verilen Tip-1 kemer barajının H<sub>a0</sub>, H<sub>a1</sub>, H<sub>a2</sub>, H<sub>a3</sub>, H<sub>a4</sub>, H<sub>a5</sub> ve H<sub>a6</sub> durumları için oluşturulan sonlu eleman modelleri sırasıyla Şekil 28-34'te verilmektedir.



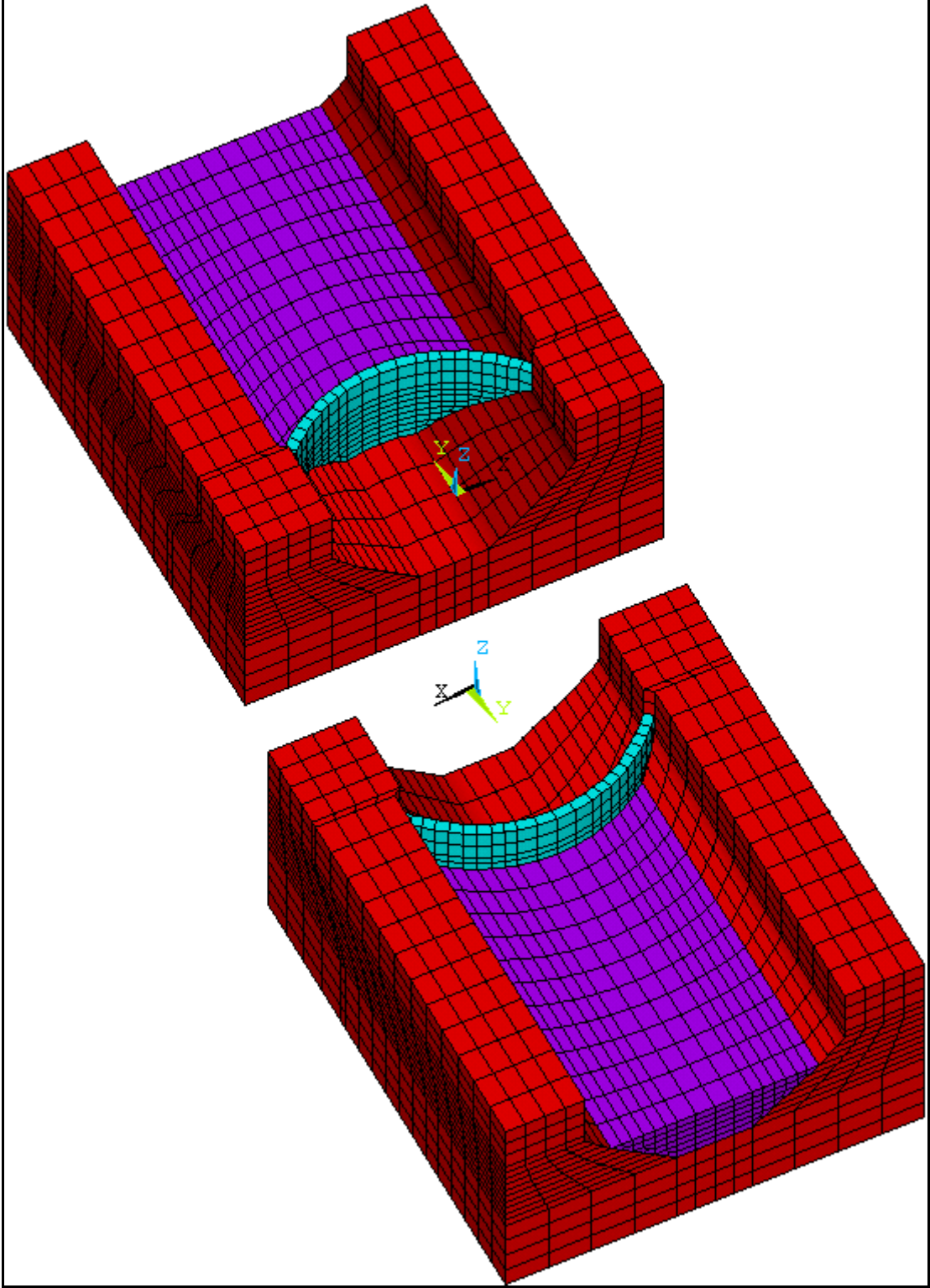
Şekil 28. Tip-1 kemer barajının H<sub>a</sub>0 durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 29. Tip-1 kemer barajının  $H_a1$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli

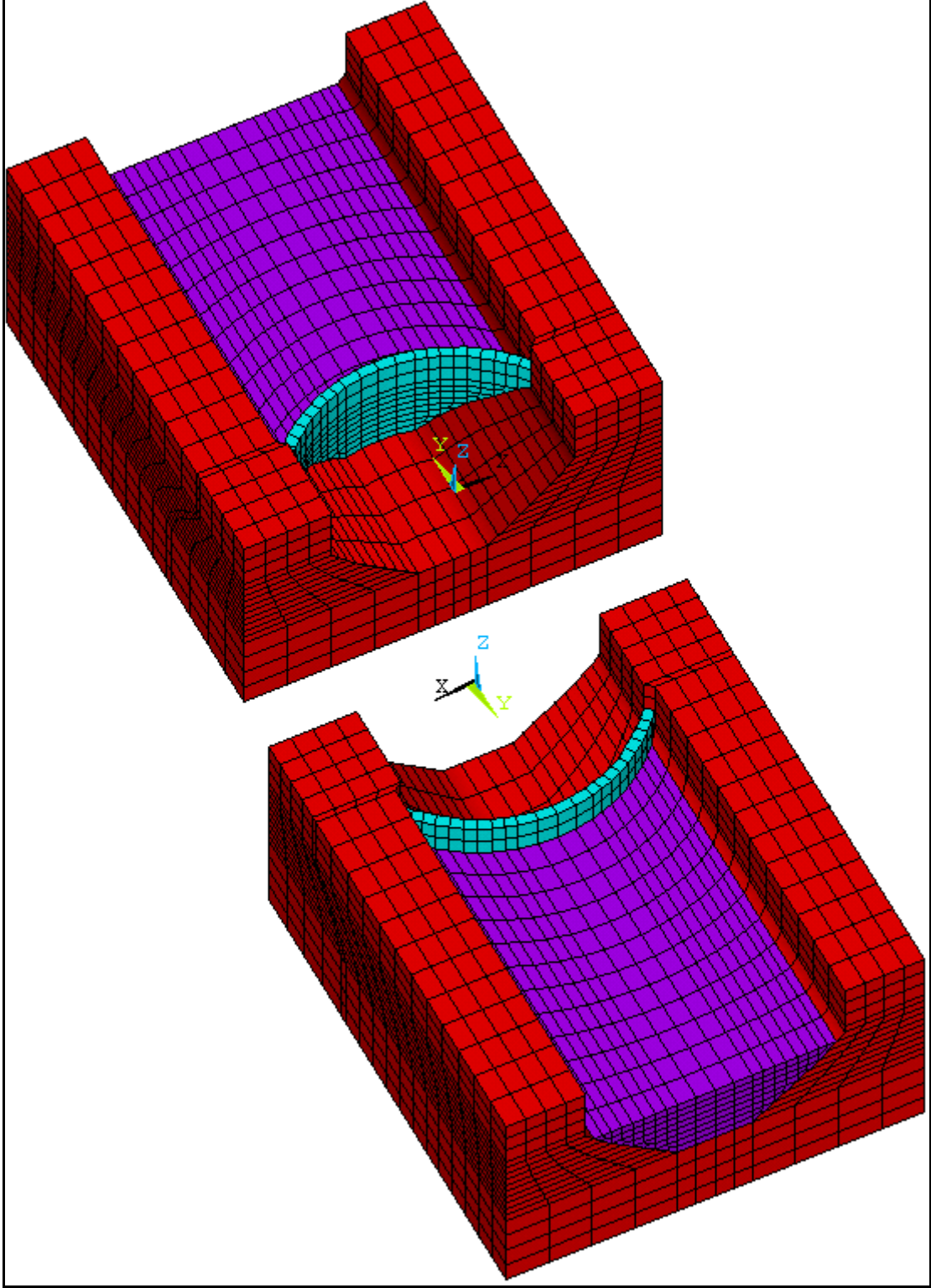


Şekil 30. Tip-1 kemer barajının  $H_2$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli

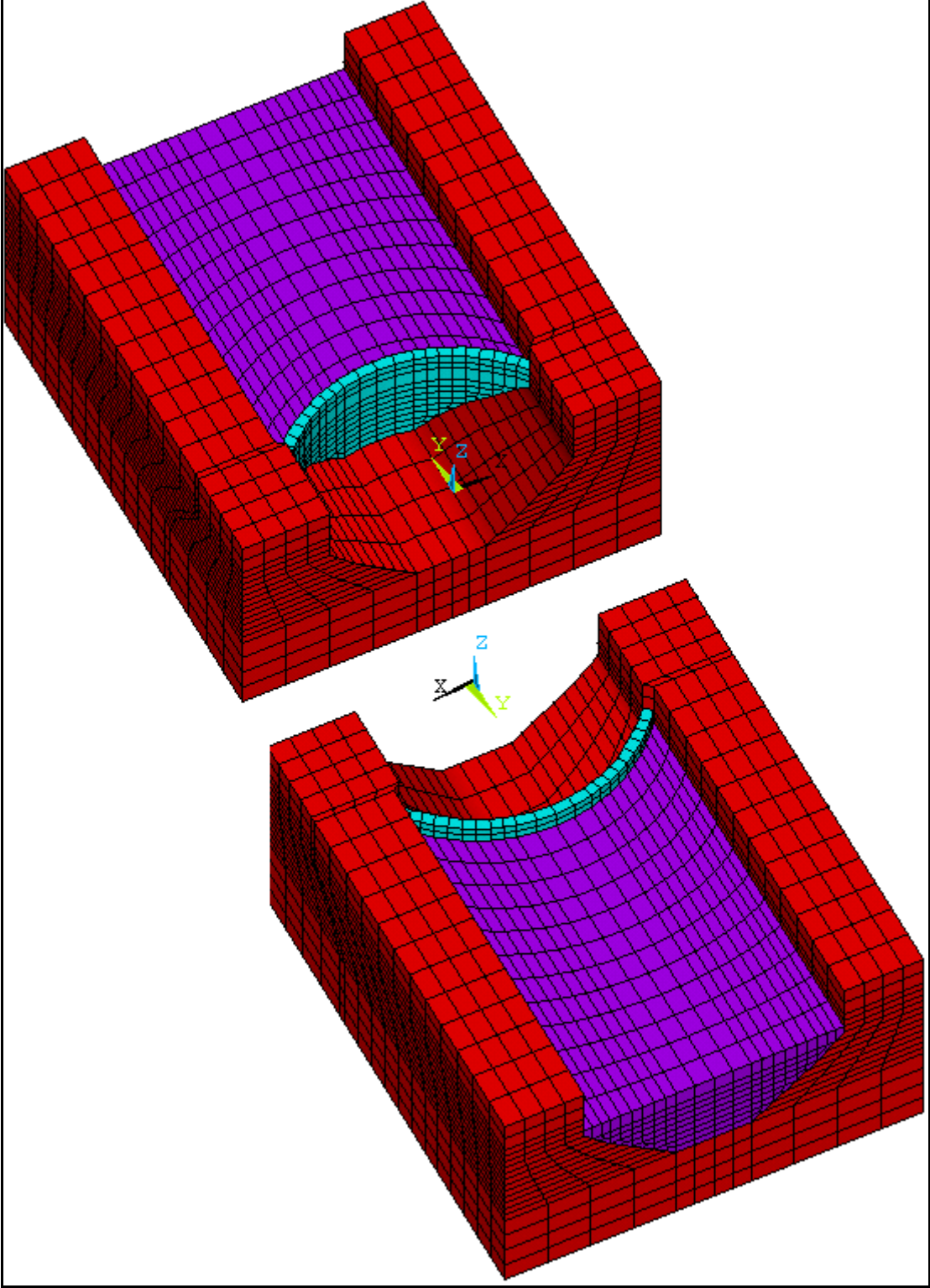


Şekil 31. Tip-1 kemer barajının  $H_3$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli

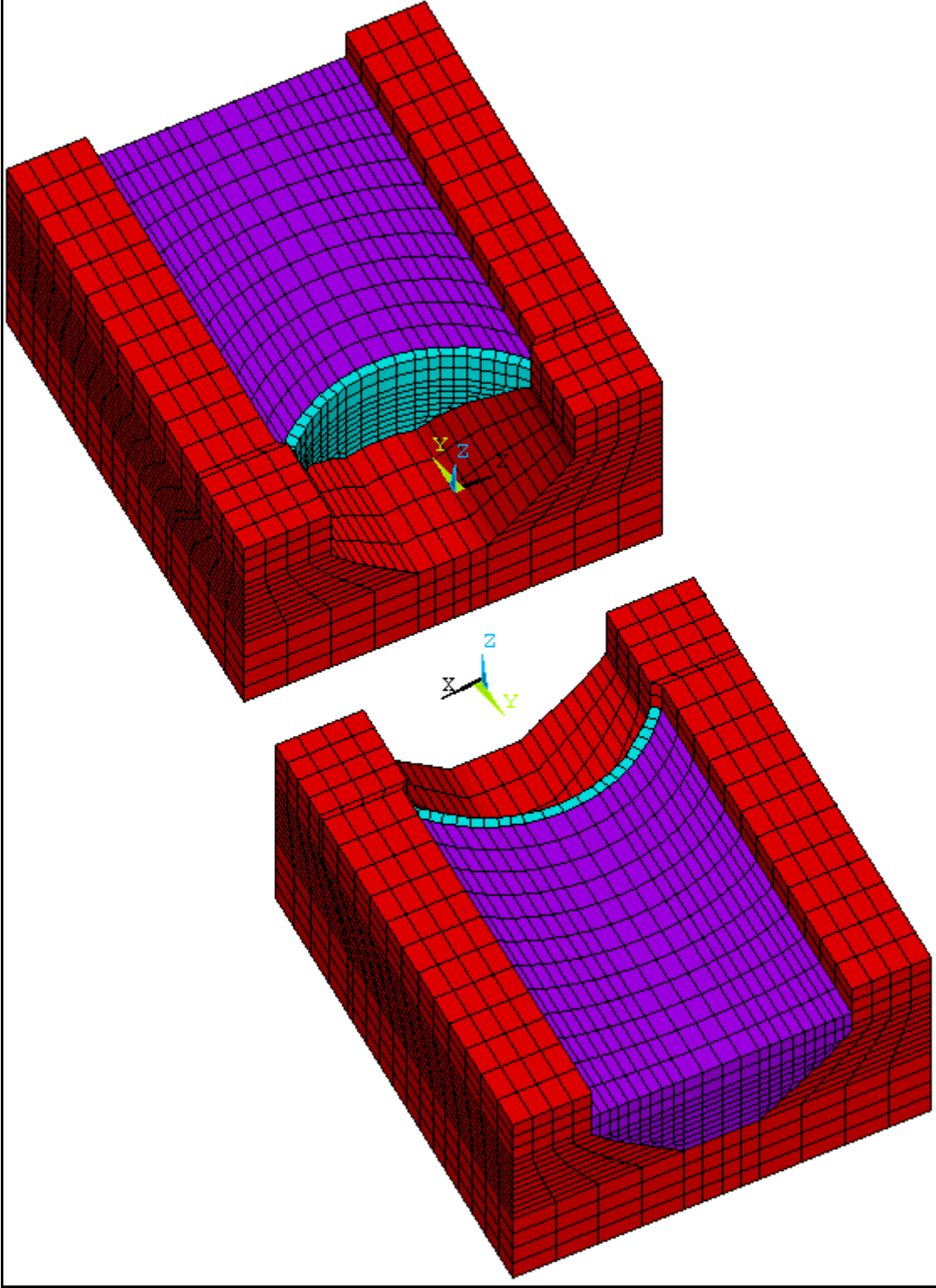




Şekil 32. Tip-1 kemer barajının  $H_4$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 33. Tip-1 kemer barajının  $H_a5$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 34. Tip-1 kemer barajının  $H_a6$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli

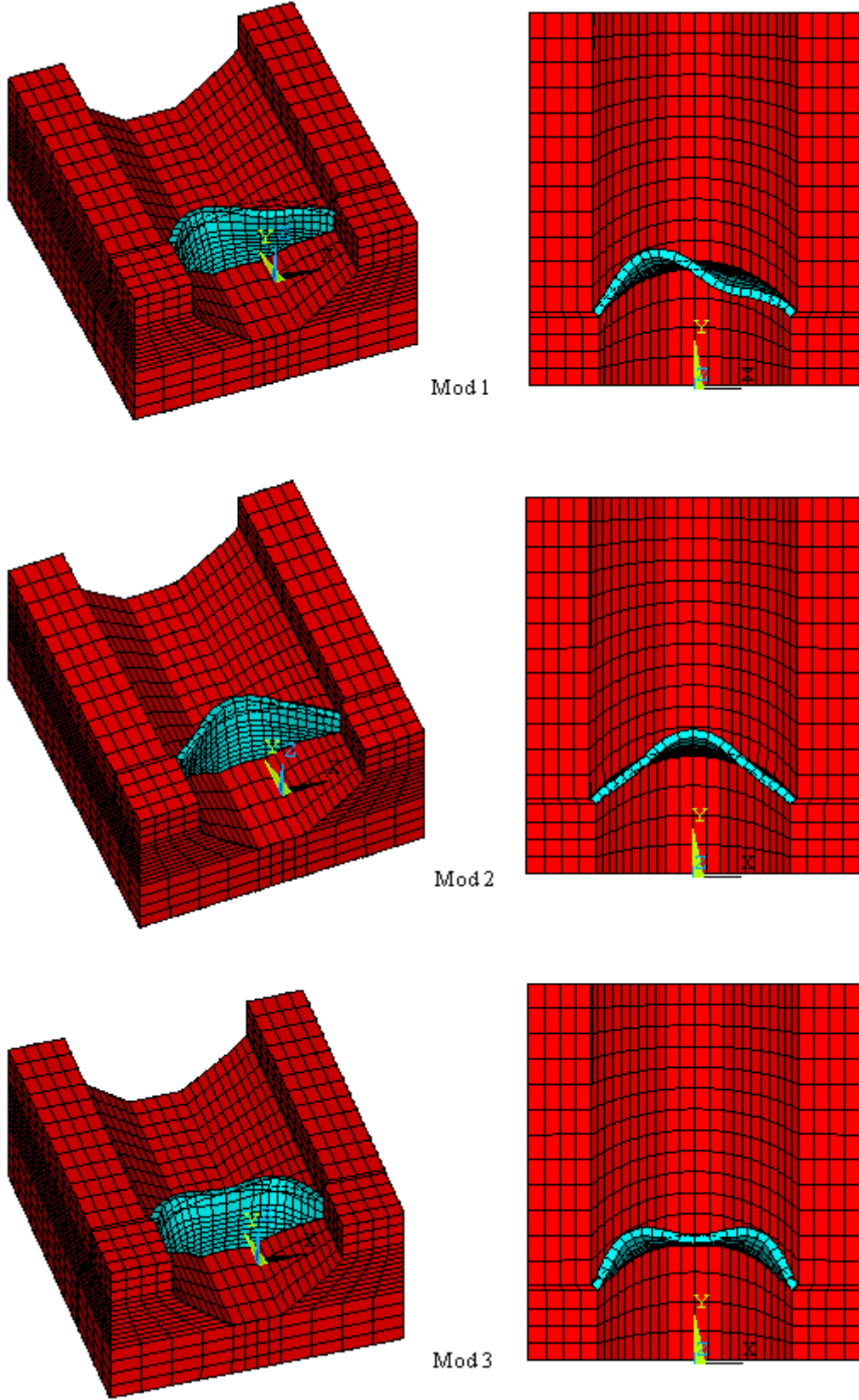


Tip-1 kemer barajının  $H_a0$  durumu için gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk dokuz mod şekli Şekil 35’te verilmektedir. Şekil 35 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik, anti-simetrik ve düşey eğilme modları olduğu görülmektedir. Burada, simetrik ve anti-simetrik modlar kret düzleminde, düşey modlar ise kret düzlemine dik doğrultuda oluşmaktadır. Ayrıca, Tip-1 kemer barajının mod şekilleri, literatürde kemer barajlar için elde edilenlerle benzerlik göstermektedir.

Tip-1 kemer barajının  $H_a0$  durumu için gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk dokuz moda ait doğal frekans, doğal periyot ve mod şekli Tablo 18’de verilmektedir. Tablo 18’de görüldüğü gibi ilk dokuz doğal frekans 349-837 Hz arasında değişmektedir. 60 cm yüksekliğe sahip Tip-1 kemer barajının doğal frekansları, 60 m yüksekliğe sahip Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarından yaklaşık yüz kat daha büyüktür. Buradan Tip-1 kemer barajının ölçeklendirilmiş modelinin çok rijit olduğu anlaşılmaktadır.

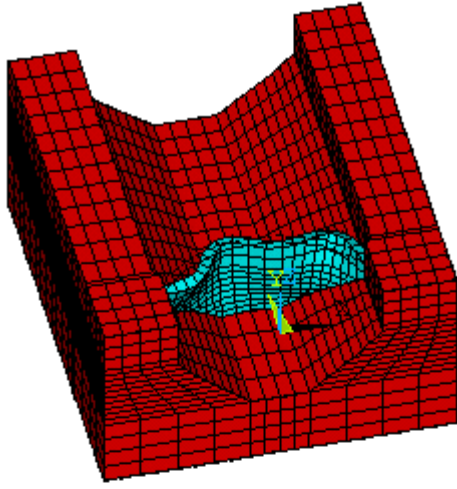
Tablo 18.  $H_a0$  durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	348.87	0.00287	Anti-Simetrik Eğilme
2	364.81	0.00274	Simetrik Eğilme
3	510.22	0.00200	Simetrik Eğilme
4	658.45	0.00152	Anti-Simetrik Eğilme
5	680.42	0.00147	Düşey Eğilme
6	701.66	0.00143	Düşey Eğilme
7	740.70	0.00135	Simetrik Eğilme
8	793.32	0.00126	Düşey Eğilme
9	836.73	0.00120	Simetrik Eğilme

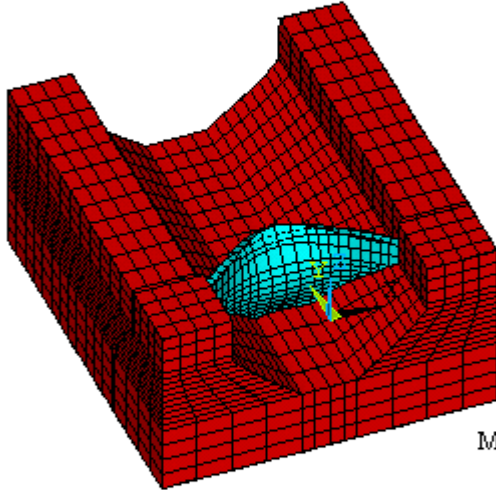
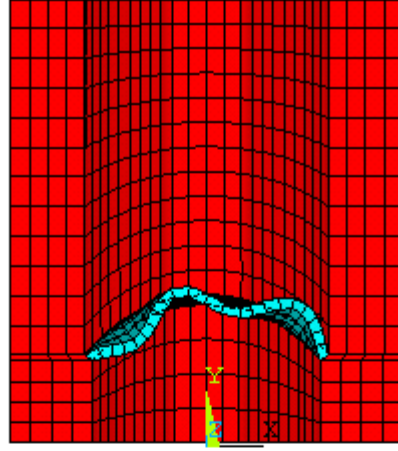


Şekil 35. Tip-1 kemer barajının  $H_2O$  durumu için elde edilen mod şekilleri

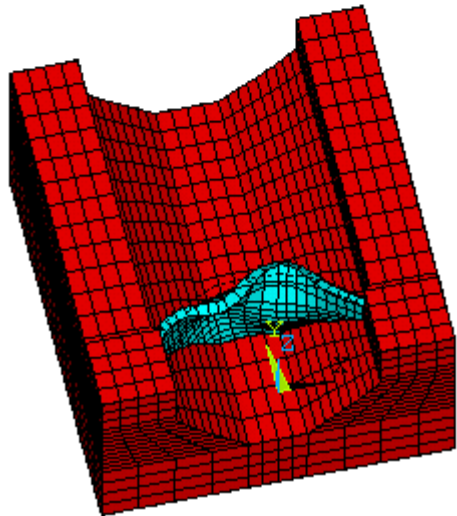
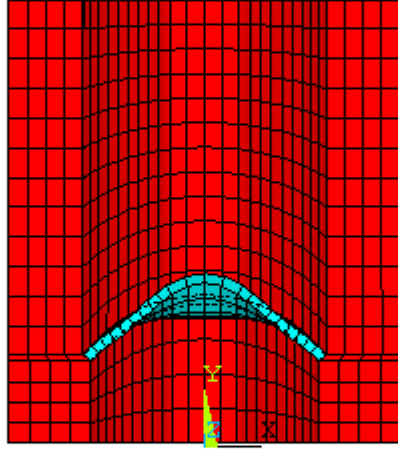
Şekil 35'in devamı



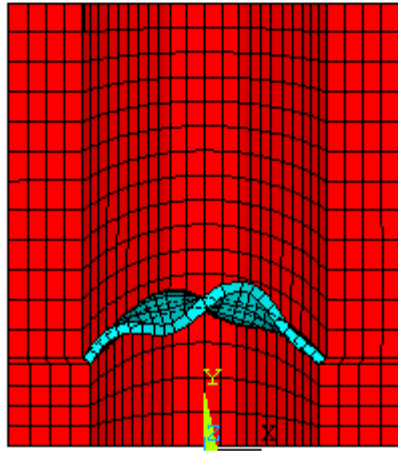
Mod 4



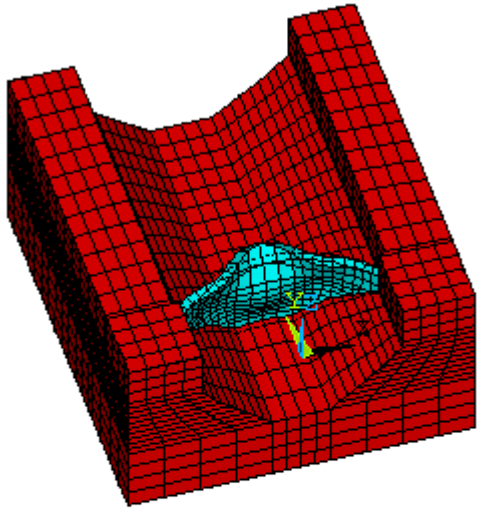
Mod 5



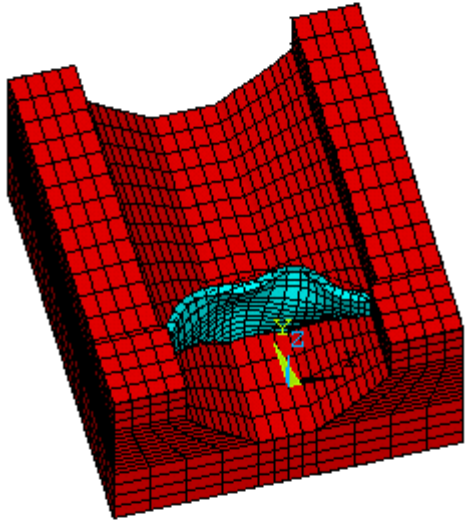
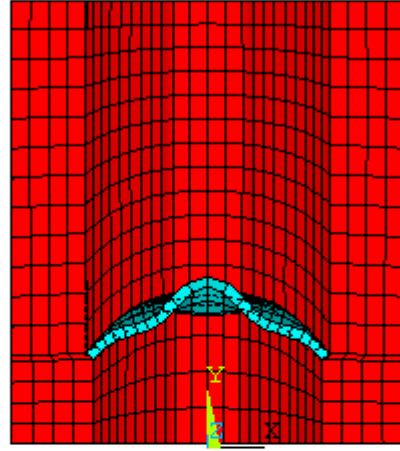
Mod 6



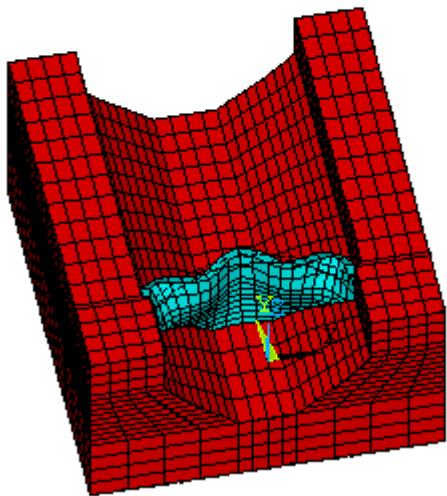
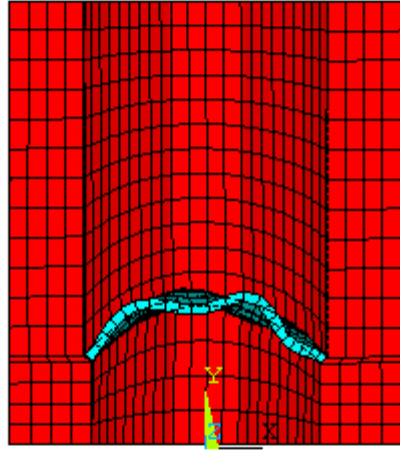
Şekil 35'in devamı



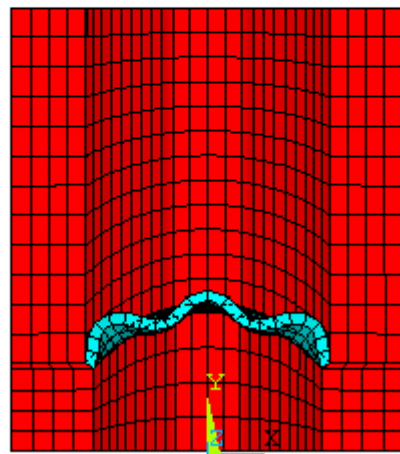
Mod 7



Mod 8



Mod 9



Tip-1 kemer barajının  $H_{a1}$  ve  $H_{a2}$  durumları için gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk dokuz mod şekli sırasıyla Şekil 36 ve 37’de verilmektedir. Şekil 36 ve 37 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik, anti-simetrik ve düşey eğilme modları olduğu görülmektedir.

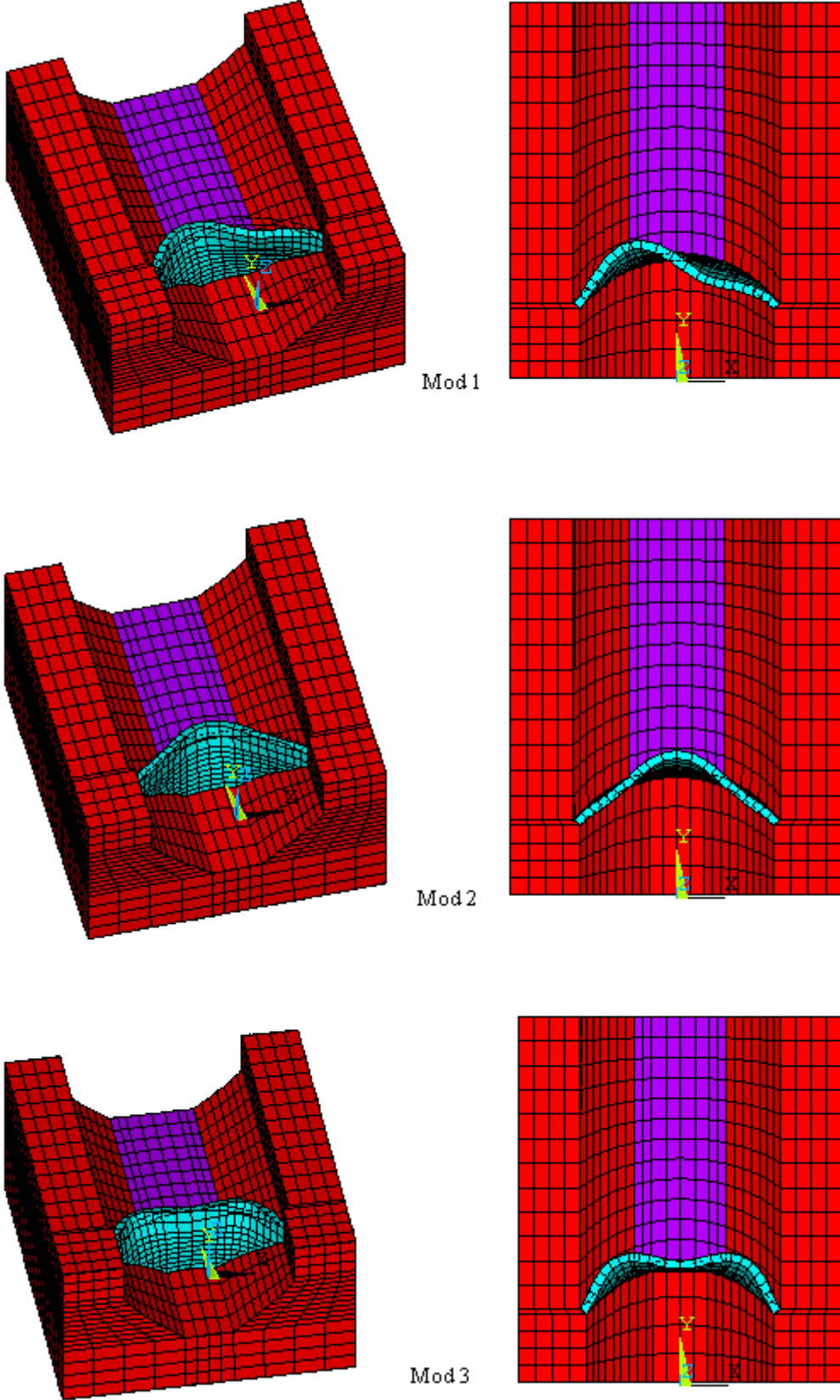
Tip-1 kemer barajının  $H_{a1}$  ve  $H_{a2}$  durumları için gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk dokuz moda ait doğal frekans, doğal periyot ve mod şekli sırasıyla Tablo 19 ve 20’de verilmektedir. Tablo 19 ve 20’de görüldüğü gibi, Tip-1 kemer barajının ilk dokuz doğal frekansı hem  $H_{a1}$  durumu için hem de  $H_{a2}$  durumu için 349-837 Hz arasında değişmektedir.

Tablo 19.  $H_{a1}$  durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	349.08	0.00286	Anti-Simetrik Eğilme
2	364.96	0.00274	Simetrik Eğilme
3	510.51	0.00196	Simetrik Eğilme
4	658.92	0.00152	Anti-Simetrik Eğilme
5	678.69	0.00147	Düşey Eğilme
6	702.71	0.00142	Düşey Eğilme
7	741.38	0.00134	Simetrik Eğilme
8	794.82	0.00126	Düşey Eğilme
9	837.03	0.00119	Simetrik Eğilme

Tablo 20.  $H_{a2}$  durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

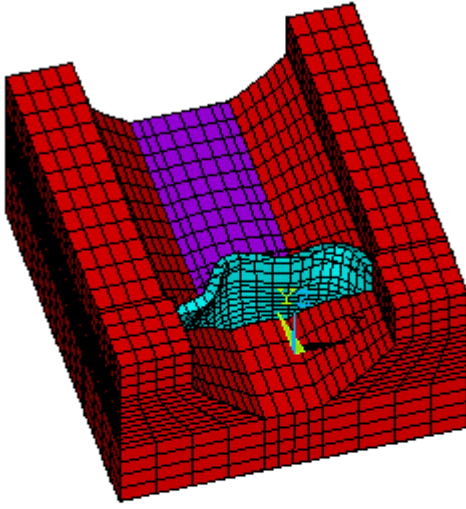
Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	348.60	0.00287	Anti-Simetrik Eğilme
2	363.16	0.00275	Simetrik Eğilme
3	509.82	0.00196	Simetrik Eğilme
4	648.13	0.00154	Anti-Simetrik Eğilme
5	656.03	0.00152	Düşey Eğilme
6	683.71	0.00146	Düşey Eğilme
7	728.83	0.00137	Simetrik Eğilme
8	794.61	0.00126	Düşey Eğilme
9	836.84	0.00119	Simetrik Eğilme



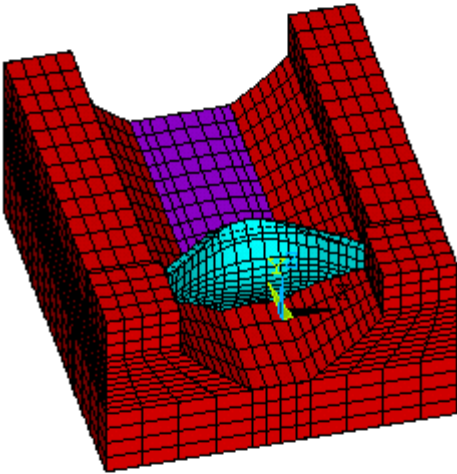
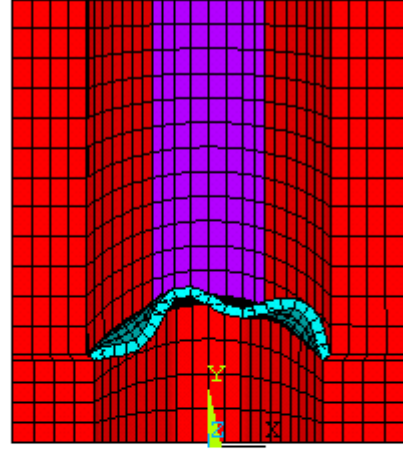
Şekil 36. Tip-1 kemer barajının  $H_a1$  durumu için elde edilen mod şekilleri



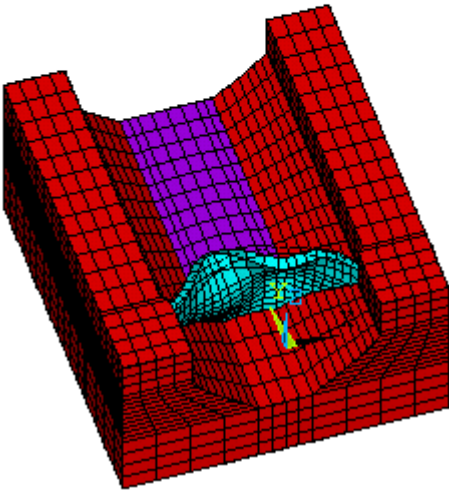
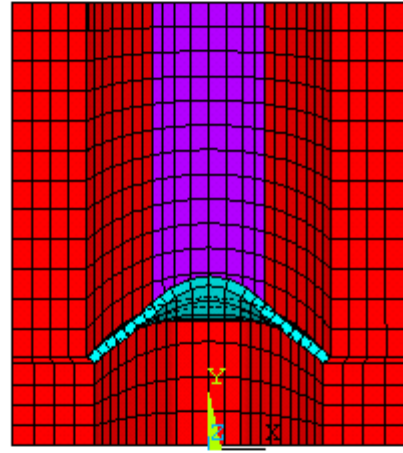
Şekil 36'nın devamı



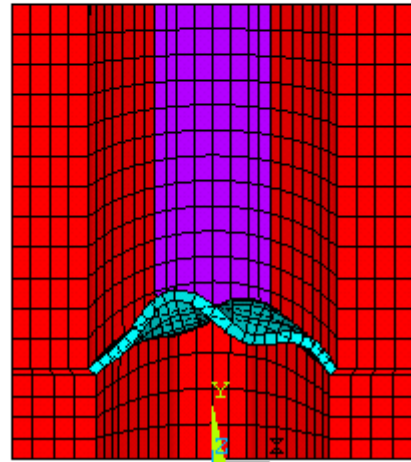
Mod 4



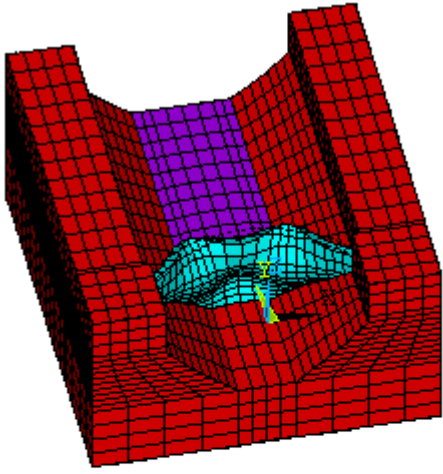
Mod 5



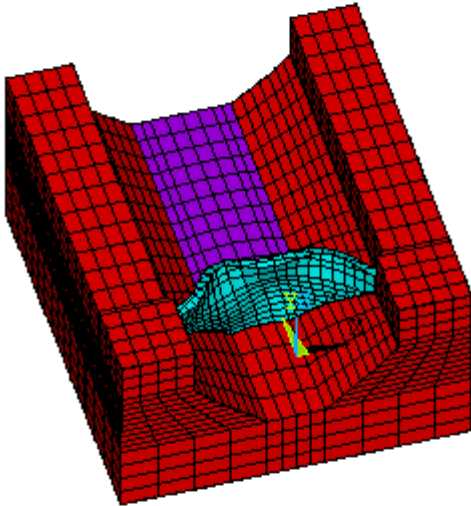
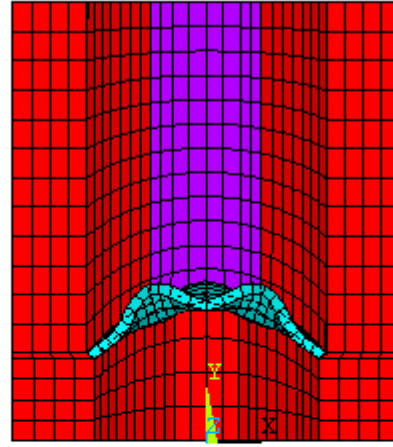
Mod 6



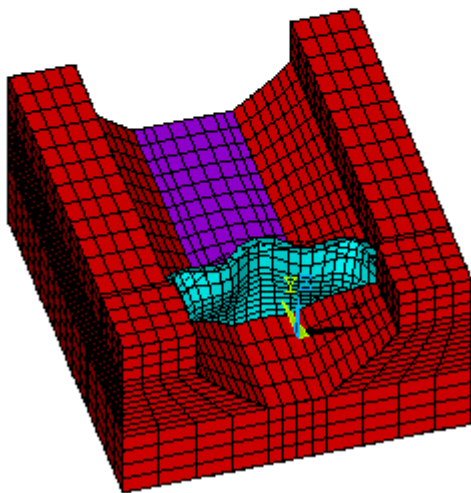
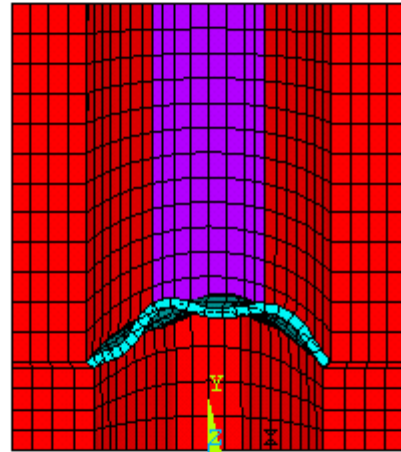
Şekil 36'nın devamı



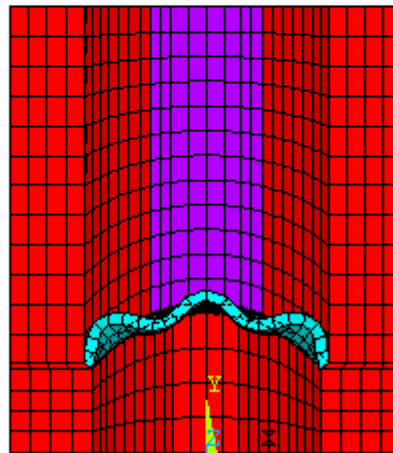
Mod 7



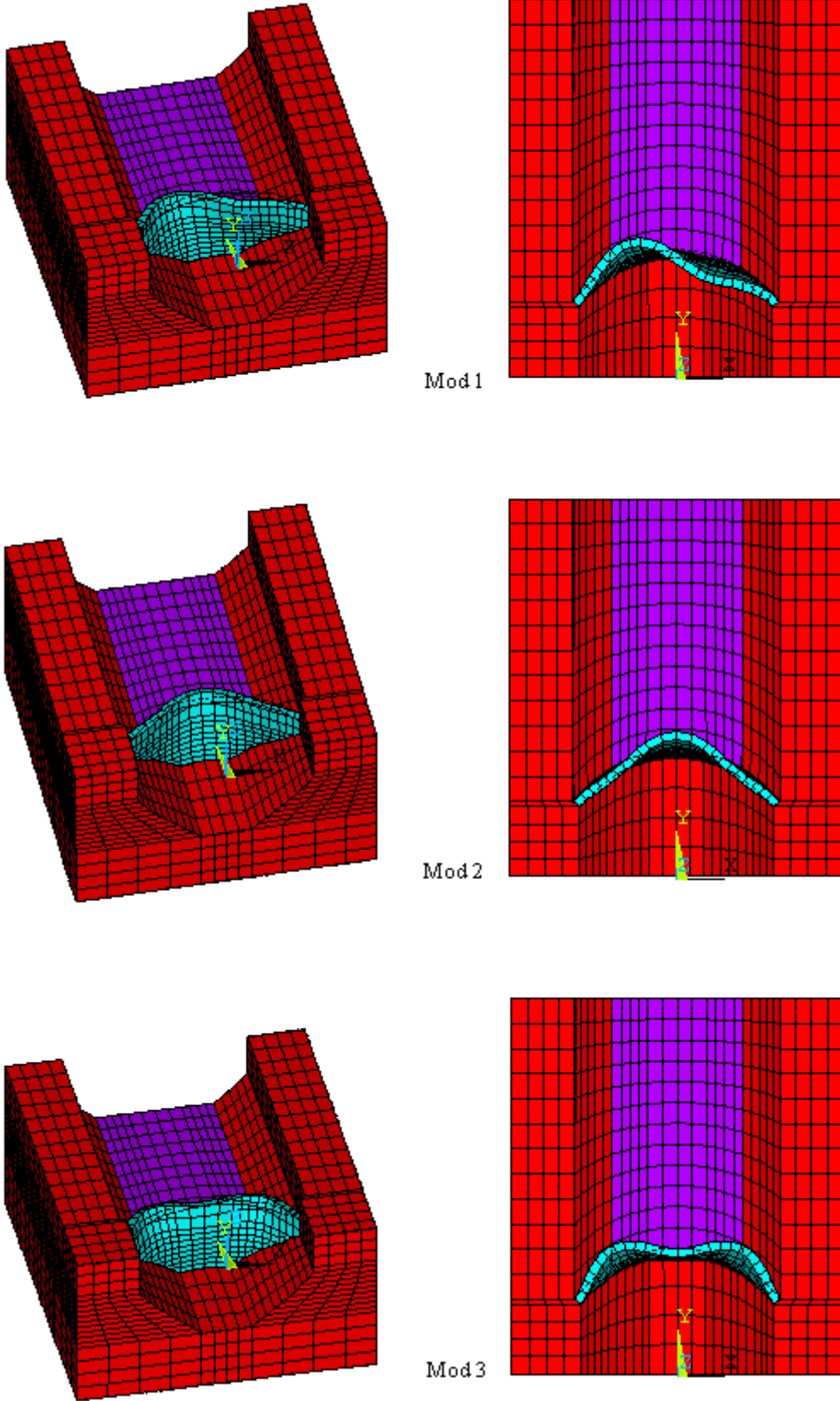
Mod 8



Mod 9

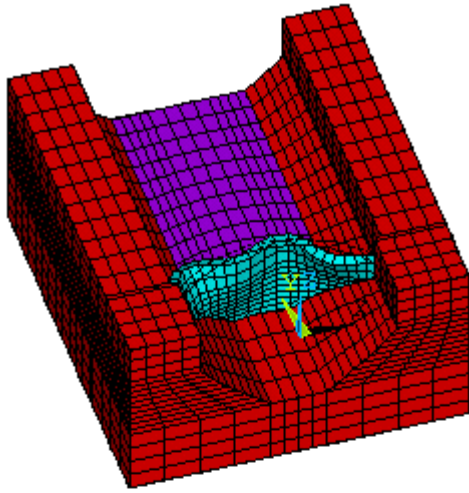




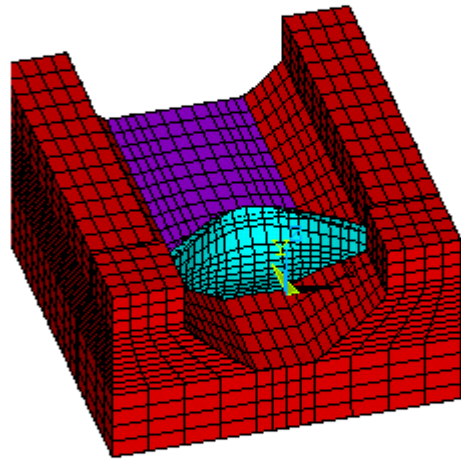
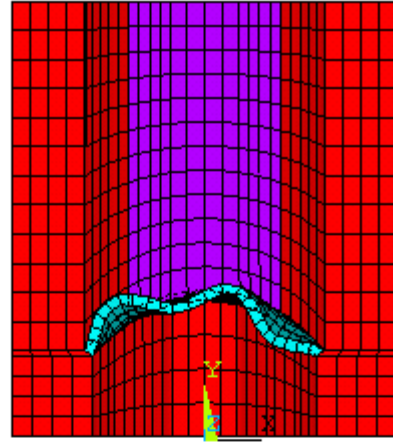


Şekil 37. Tip-1 kemer barajının  $H_a2$  durumu için elde edilen mod şekilleri

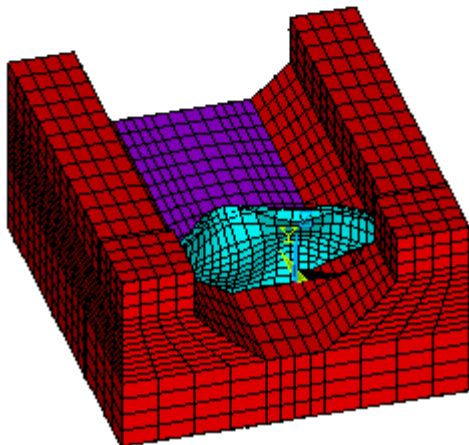
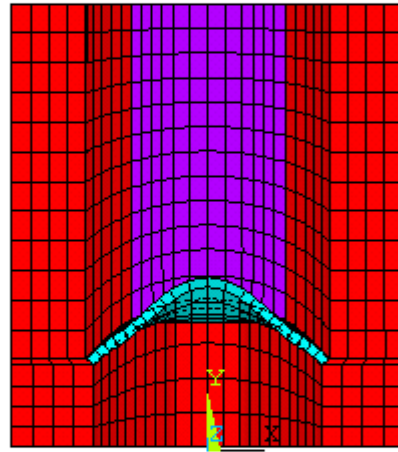
Şekil 37'nin devamı



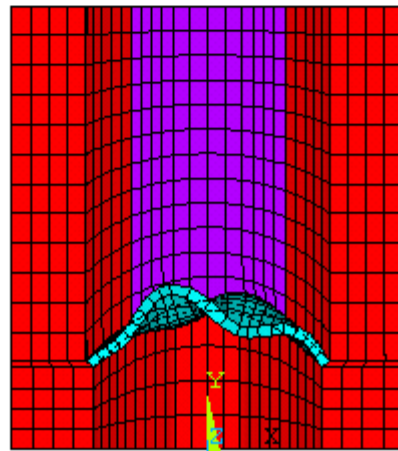
Mod 4



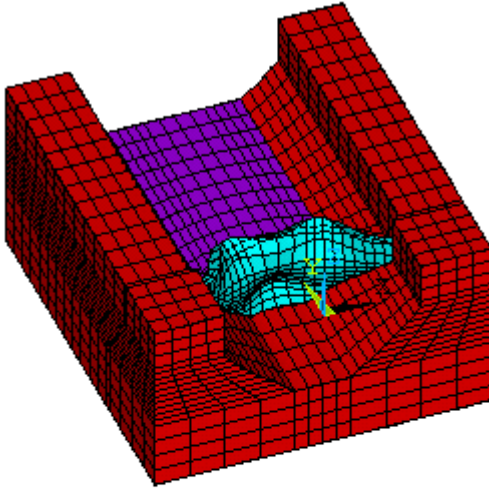
Mod 5



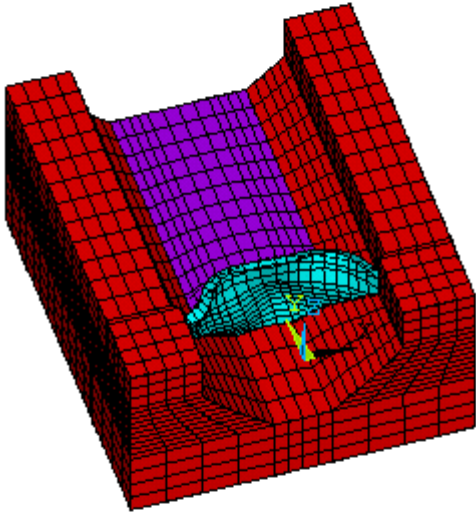
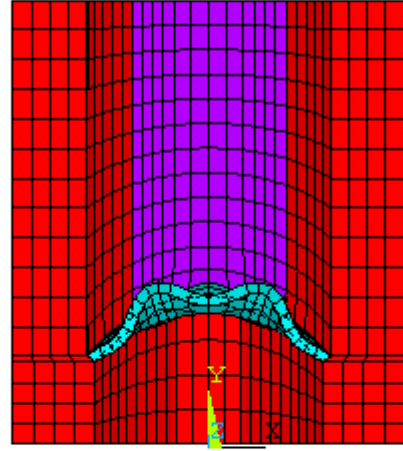
Mod 6



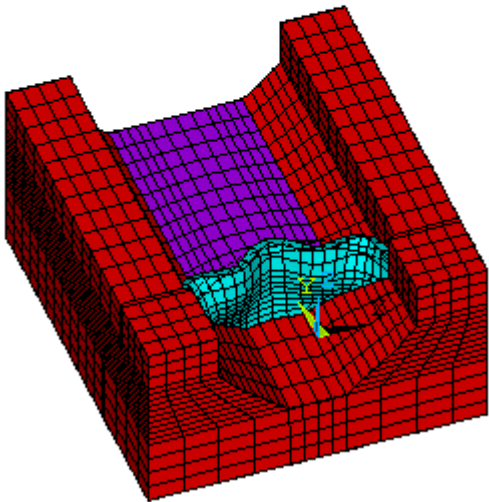
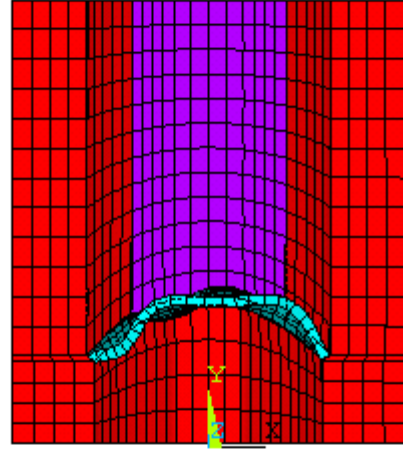
Şekil 37'nin devamı



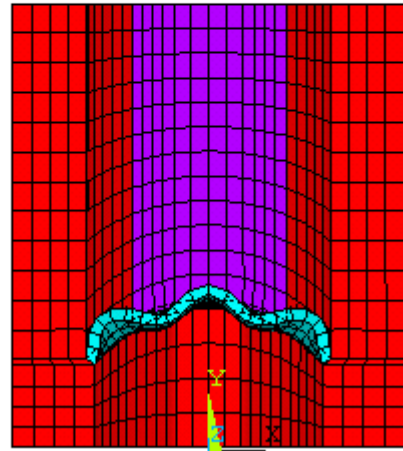
Mod 7



Mod 8



Mod 9



Tip-1 kemer barajının  $H_{a3}$  ve  $H_{a4}$  durumları için gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk dokuz mod şekli sırasıyla Şekil 38 ve 39’da verilmektedir. Şekil 38 ve 39 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik, anti-simetrik ve düşey eğilme modları olduğu görülmektedir.

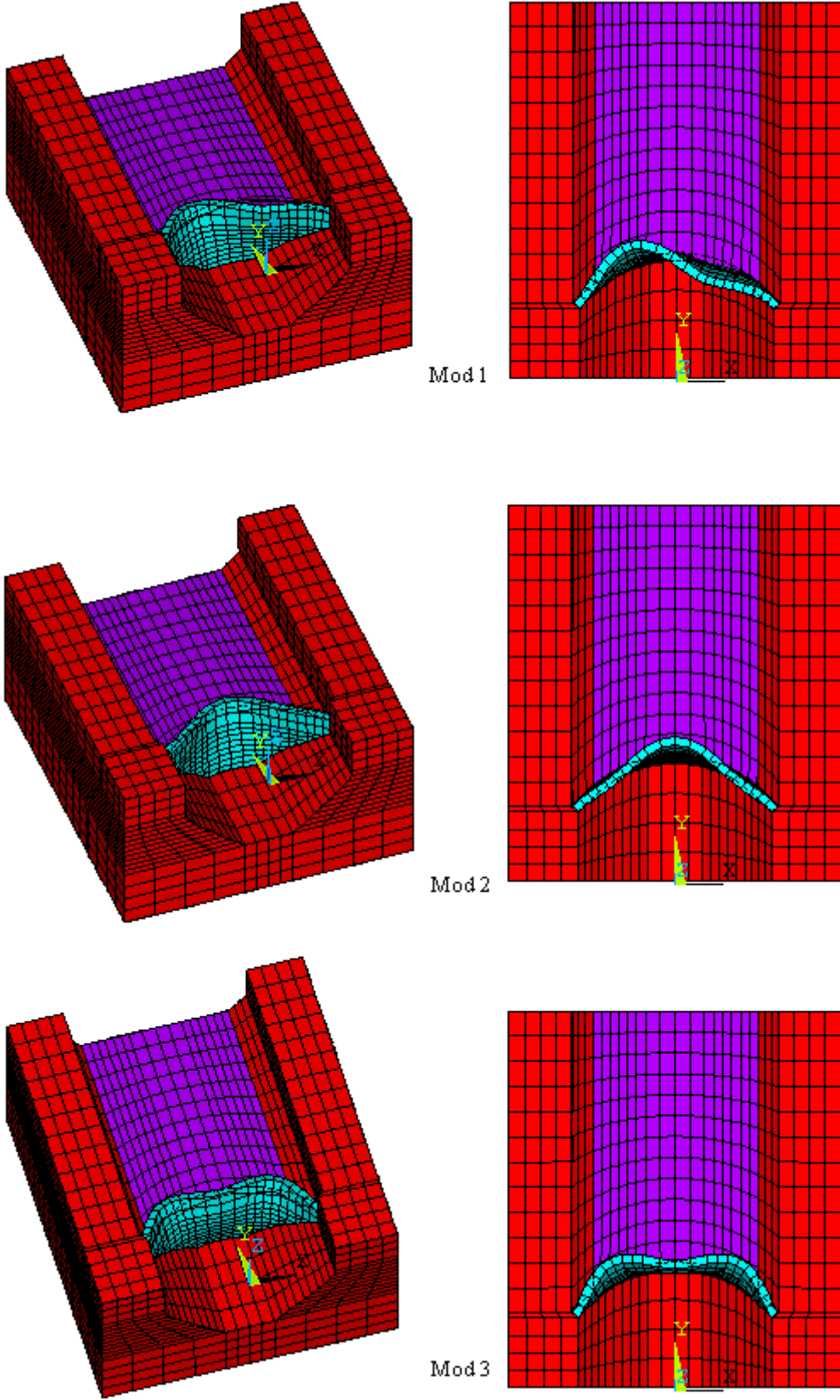
Tip-1 kemer barajının  $H_{a3}$  ve  $H_{a4}$  durumları için gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk dokuz moda ait doğal frekans, doğal periyot ve mod şekli sırasıyla Tablo 21 ve 22’de verilmektedir. Tablo 21 ve 22’de görüldüğü gibi, Tip-1 kemer barajının ilk dokuz doğal frekansı  $H_{a3}$  durumu için 345-828 Hz arasında,  $H_{a4}$  durumu için ise 329-800 Hz arasında değişmektedir.

Tablo 21.  $H_{a3}$  durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	344.67	0.00290	Anti-Simetrik Eğilme
2	353.57	0.00283	Simetrik Eğilme
3	506.50	0.00197	Simetrik Eğilme
4	588.40	0.00170	Anti-Simetrik Eğilme
5	638.61	0.00157	Düşey Eğilme
6	664.63	0.00150	Düşey Eğilme
7	703.05	0.00142	Simetrik Eğilme
8	778.87	0.00128	Düşey Eğilme
9	827.74	0.00121	Simetrik Eğilme

Tablo 22.  $H_{a4}$  durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

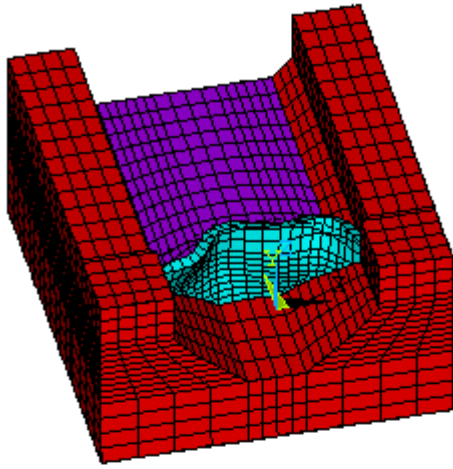
Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	328.89	0.00304	Anti-Simetrik Eğilme
2	329.31	0.0304	Simetrik Eğilme
3	494.36	0.00202	Simetrik Eğilme
4	552.64	0.00181	Anti-Simetrik Eğilme
5	604.80	0.00165	Düşey Eğilme
6	638.24	0.00157	Düşey Eğilme
7	674.22	0.00148	Simetrik Eğilme
8	741.68	0.00135	Düşey Eğilme
9	800.17	0.00125	Simetrik Eğilme



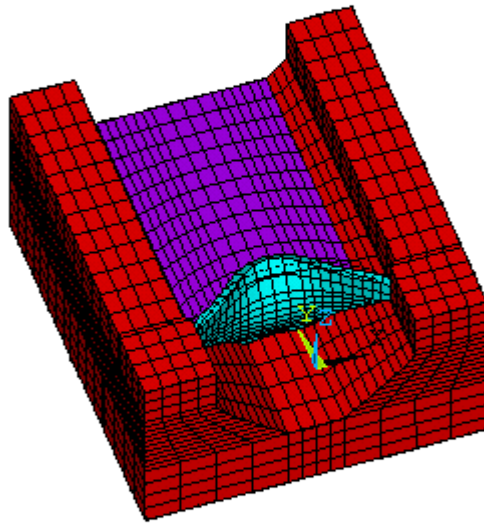
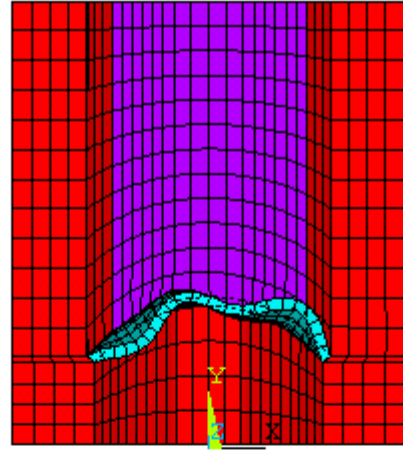
Şekil 38. Tip-1 kemer barajının  $H_a3$  durumu için elde edilen mod şekilleri



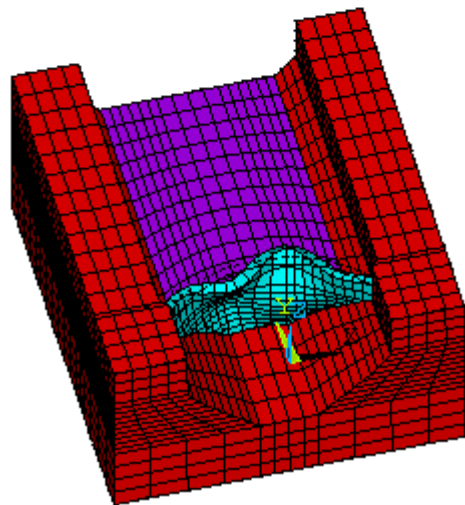
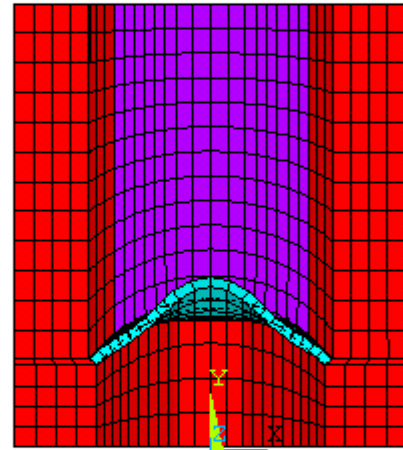
Şekil 38'in devamı



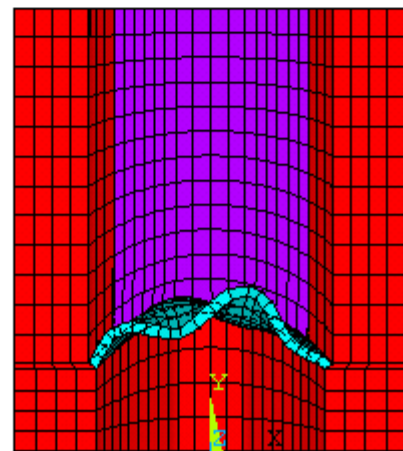
Mod 4



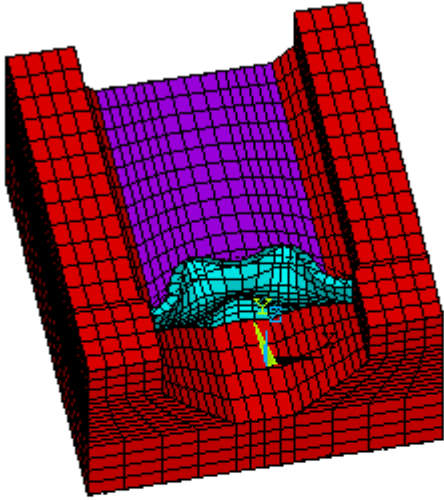
Mod 5



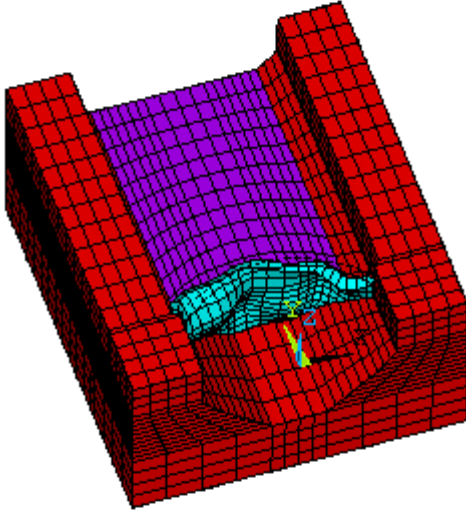
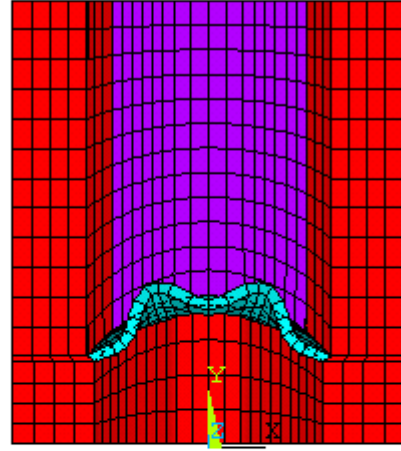
Mod 6



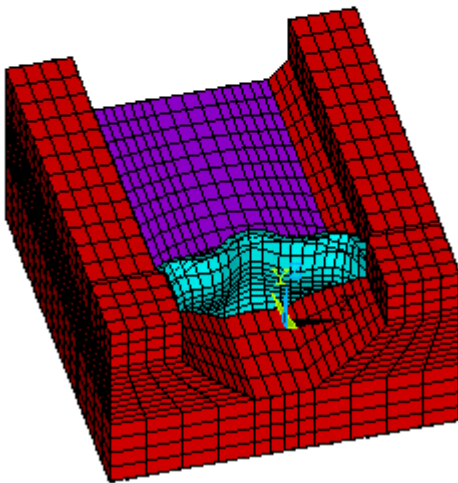
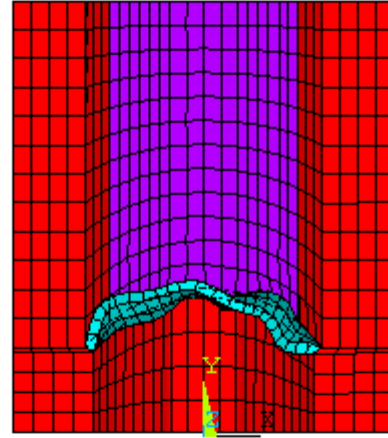
Şekil 38'in devamı



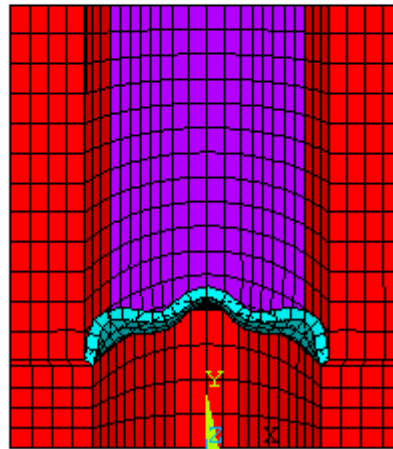
Mod 7

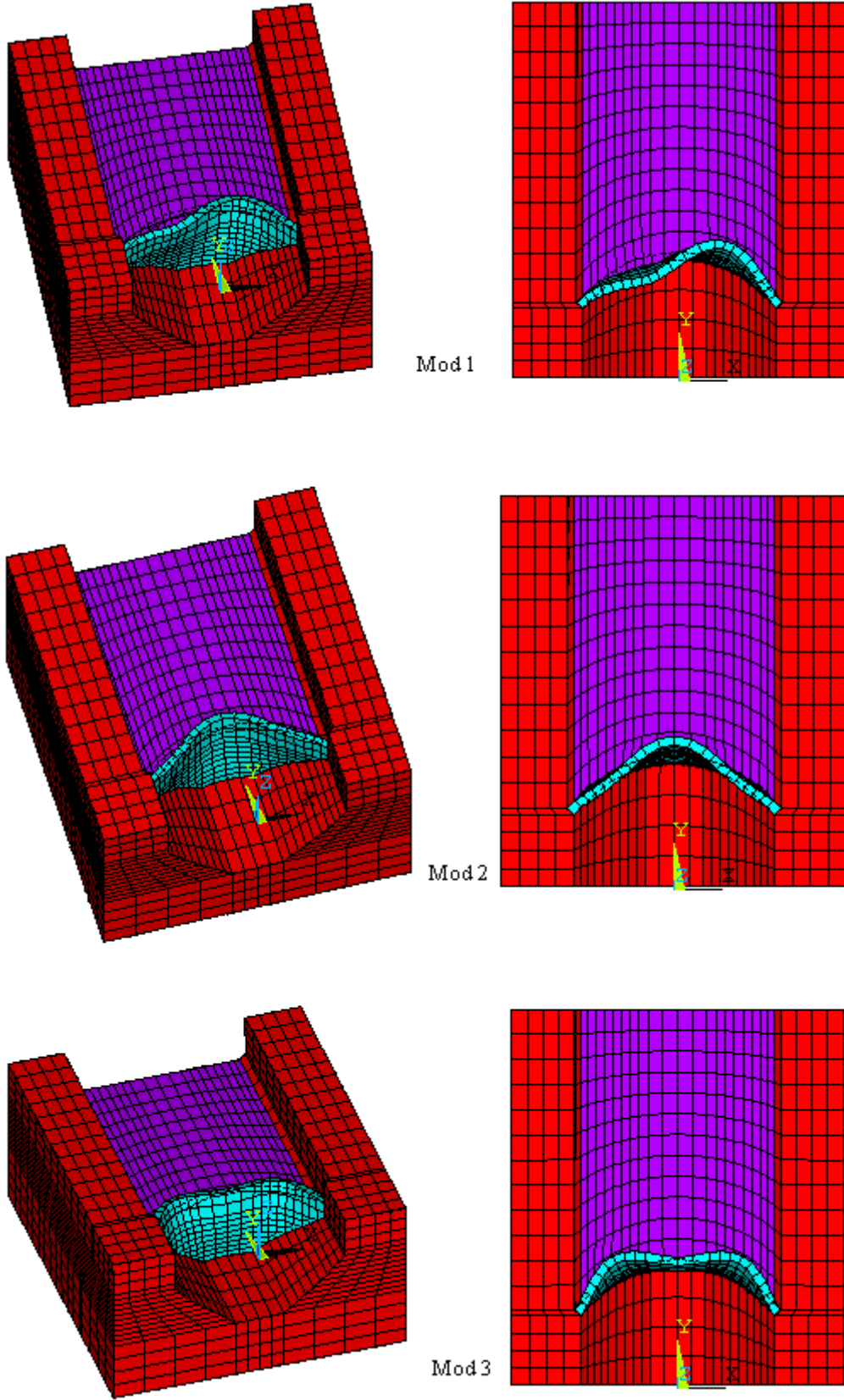


Mod 8



Mod 9

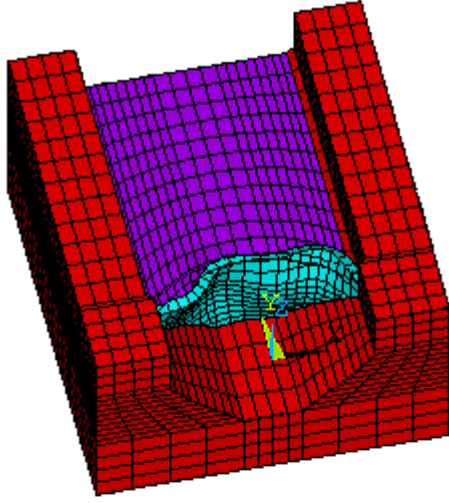




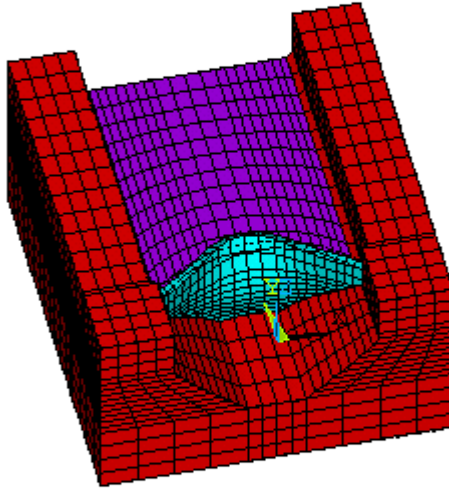
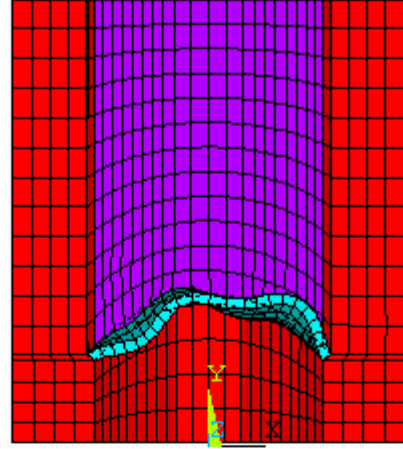
Şekil 39. Tip-1 kemer barajının  $H_a4$  durumu için elde edilen mod şekilleri



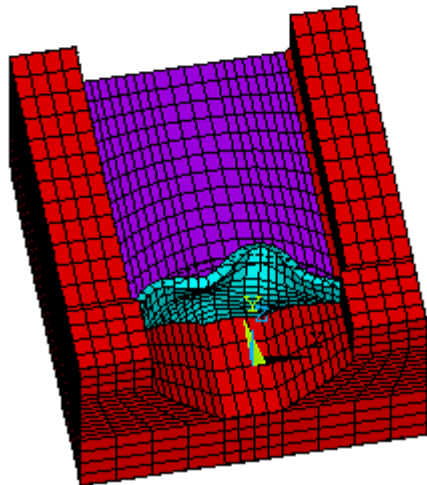
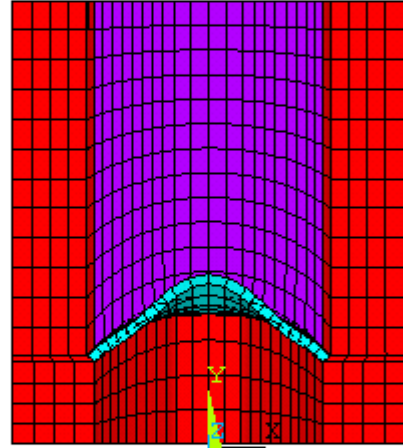
Şekil 39'un devamı



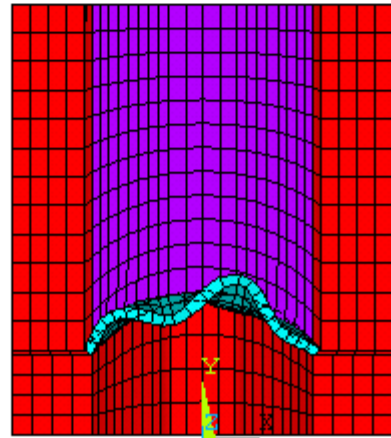
Mod 4



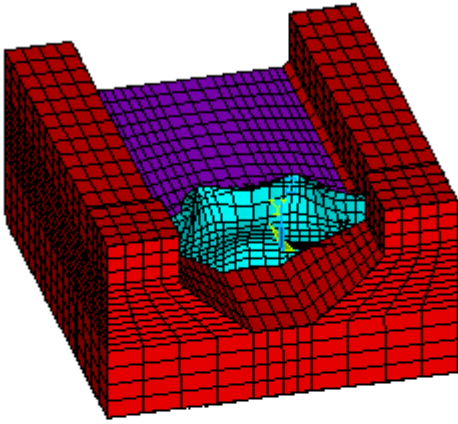
Mod 5



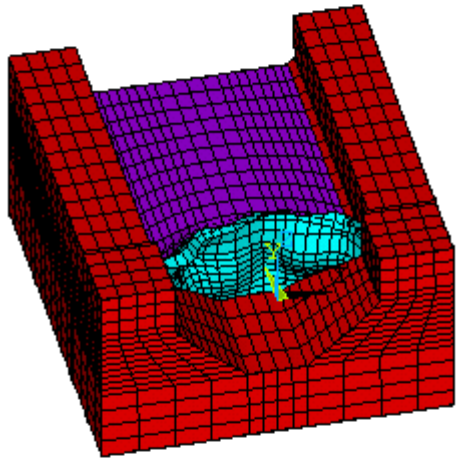
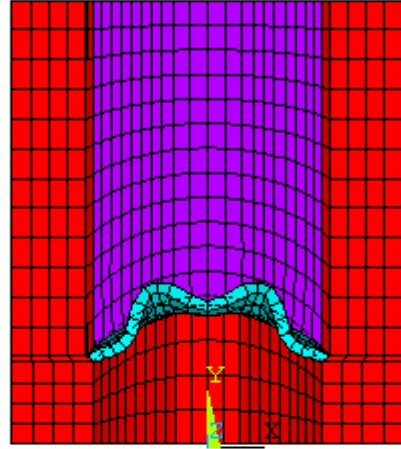
Mod 6



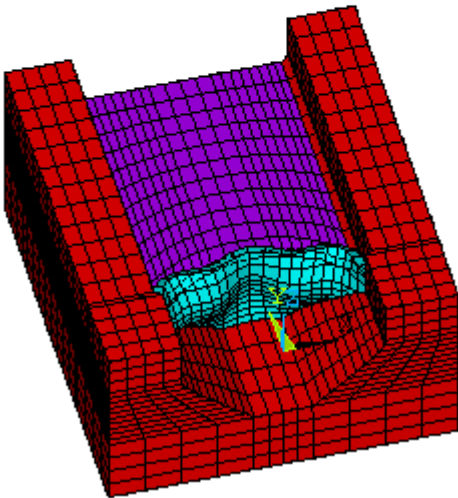
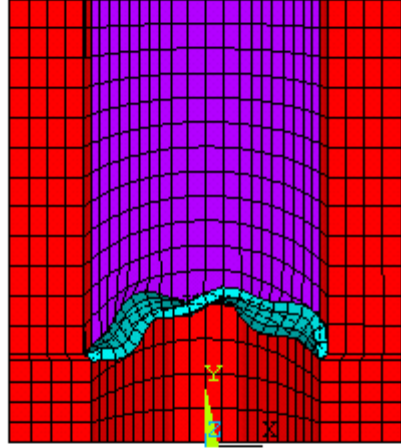
Şekil 39'un devamı



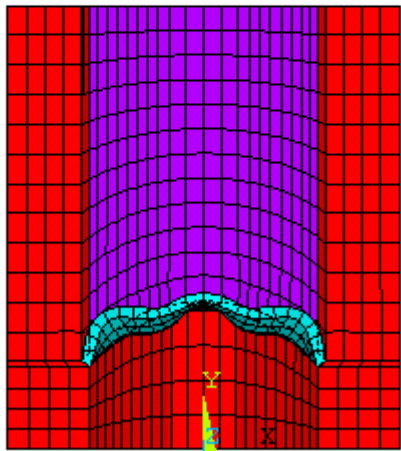
Mod 7



Mod 8



Mod 9



Tip-1 kemer barajının  $H_{a5}$  ve  $H_{a6}$  durumları için gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen ilk dokuz mod şekli sırasıyla Şekil 40 ve 41’de verilmektedir. Şekil 40 ve 41 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik, anti-simetrik ve düşey eğilme modları olduğu görülmektedir.

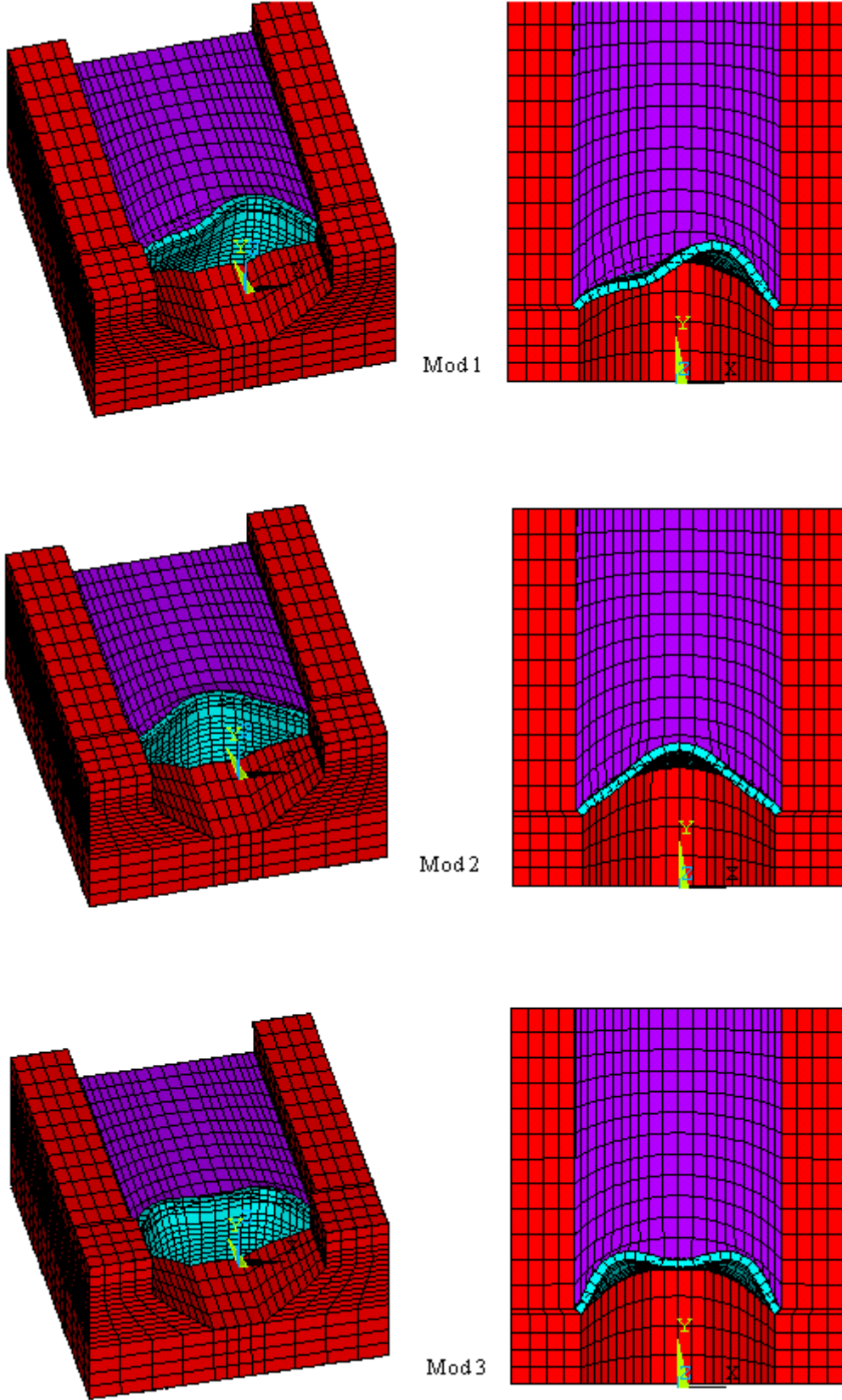
Tip-1 kemer barajının  $H_{a5}$  ve  $H_{a6}$  durumları için gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen ilk dokuz moda ait doğal frekans, doğal periyot ve mod şekli sırasıyla Tablo 23 ve 24’te verilmektedir. Tablo 23 ve 24’te görüldüğü gibi, Tip-1 kemer barajının ilk dokuz doğal frekansı  $H_{a5}$  durumu için 293-763 Hz arasında,  $H_{a6}$  durumu için ise 253-724 Hz arasında değişmektedir.

Tablo 23.  $H_{a5}$  durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	292.85	0.00341	Anti-Simetrik Eğilme
2	295.47	0.00338	Simetrik Eğilme
3	448.60	0.00223	Simetrik Eğilme
4	530.06	0.00189	Anti-Simetrik Eğilme
5	561.58	0.00178	Düşey Eğilme
6	616.82	0.00162	Düşey Eğilme
7	649.56	0.00154	Simetrik Eğilme
8	701.02	0.00143	Düşey Eğilme
9	762.93	0.00131	Simetrik Eğilme

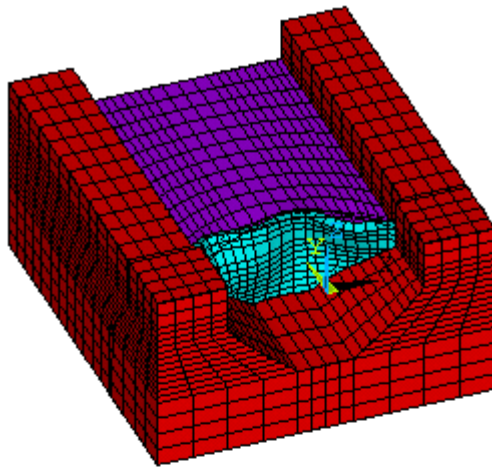
Tablo 24.  $H_{a6}$  durumu için elde edilen doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	252.85	0.00395	Anti-Simetrik Eğilme
2	254.94	0.00392	Simetrik Eğilme
3	374.47	0.00267	Simetrik Eğilme
4	477.69	0.00209	Anti-Simetrik Eğilme
5	486.07	0.00206	Düşey Eğilme
6	524.85	0.00191	Düşey Eğilme
7	598.43	0.00167	Simetrik Eğilme
8	663.49	0.00151	Düşey Eğilme
9	723.86	0.00138	Simetrik Eğilme

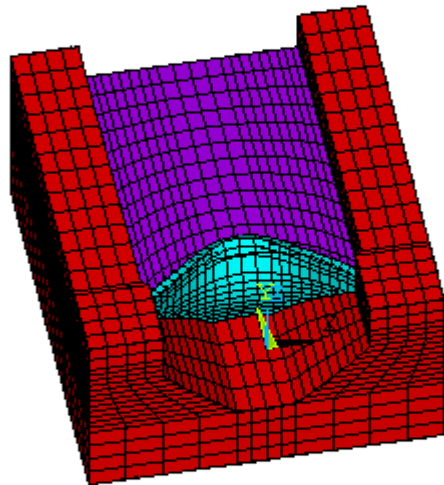
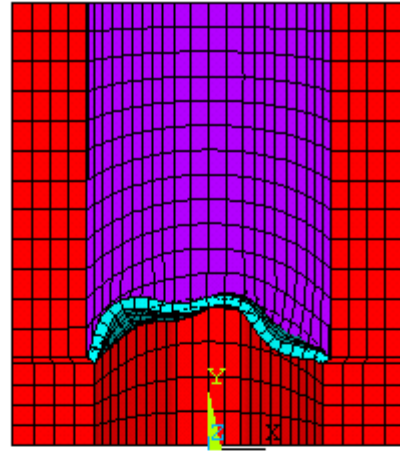


Şekil 40. Tip-1 kemer barajının  $H_a5$  durumu için elde edilen mod şekilleri

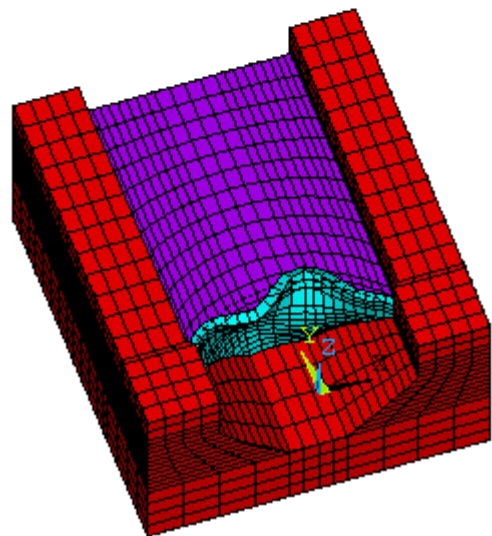
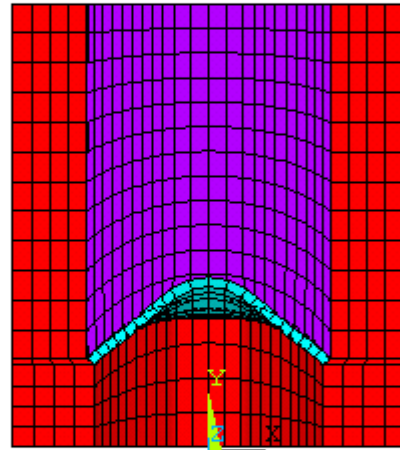
Şekil 40'in devamı



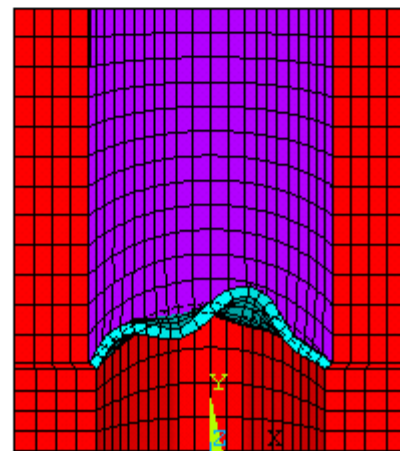
Mod 4



Mod 5

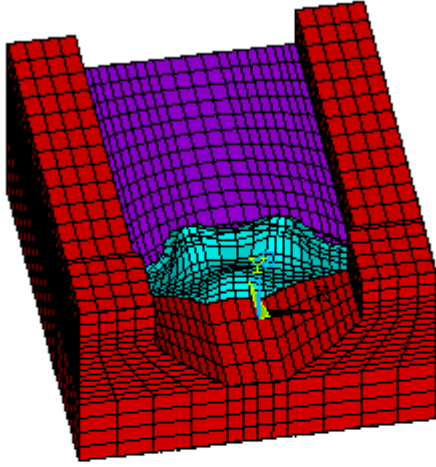


Mod 6

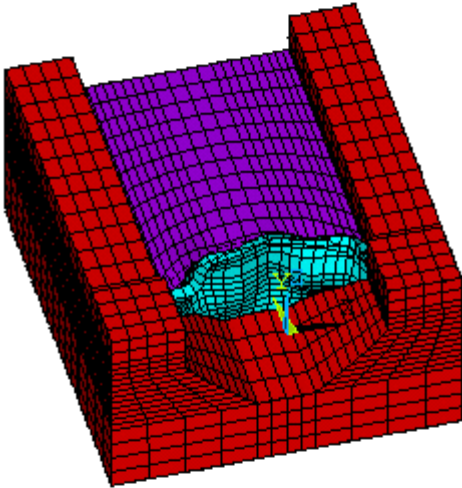
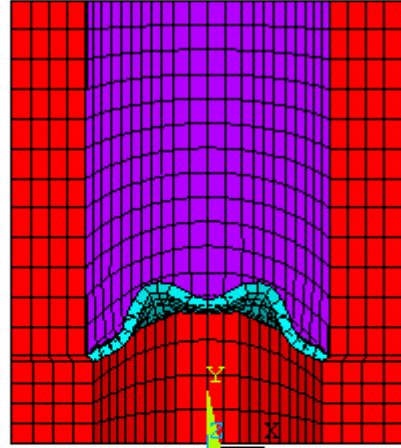




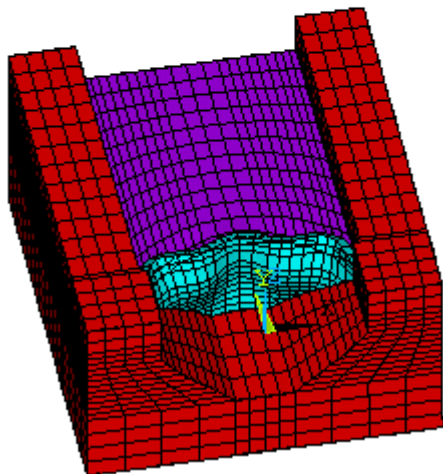
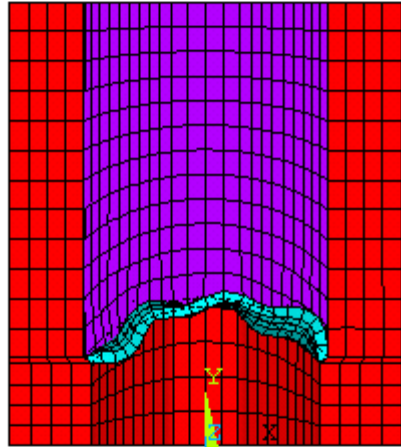
Şekil 40'in devamı



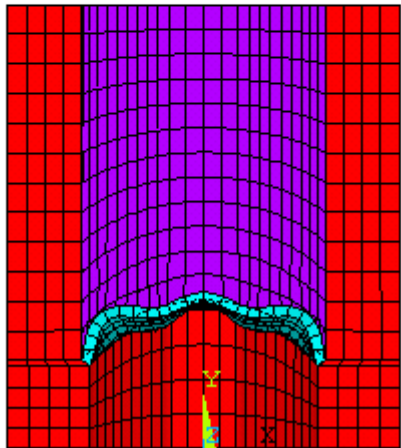
Mod 7

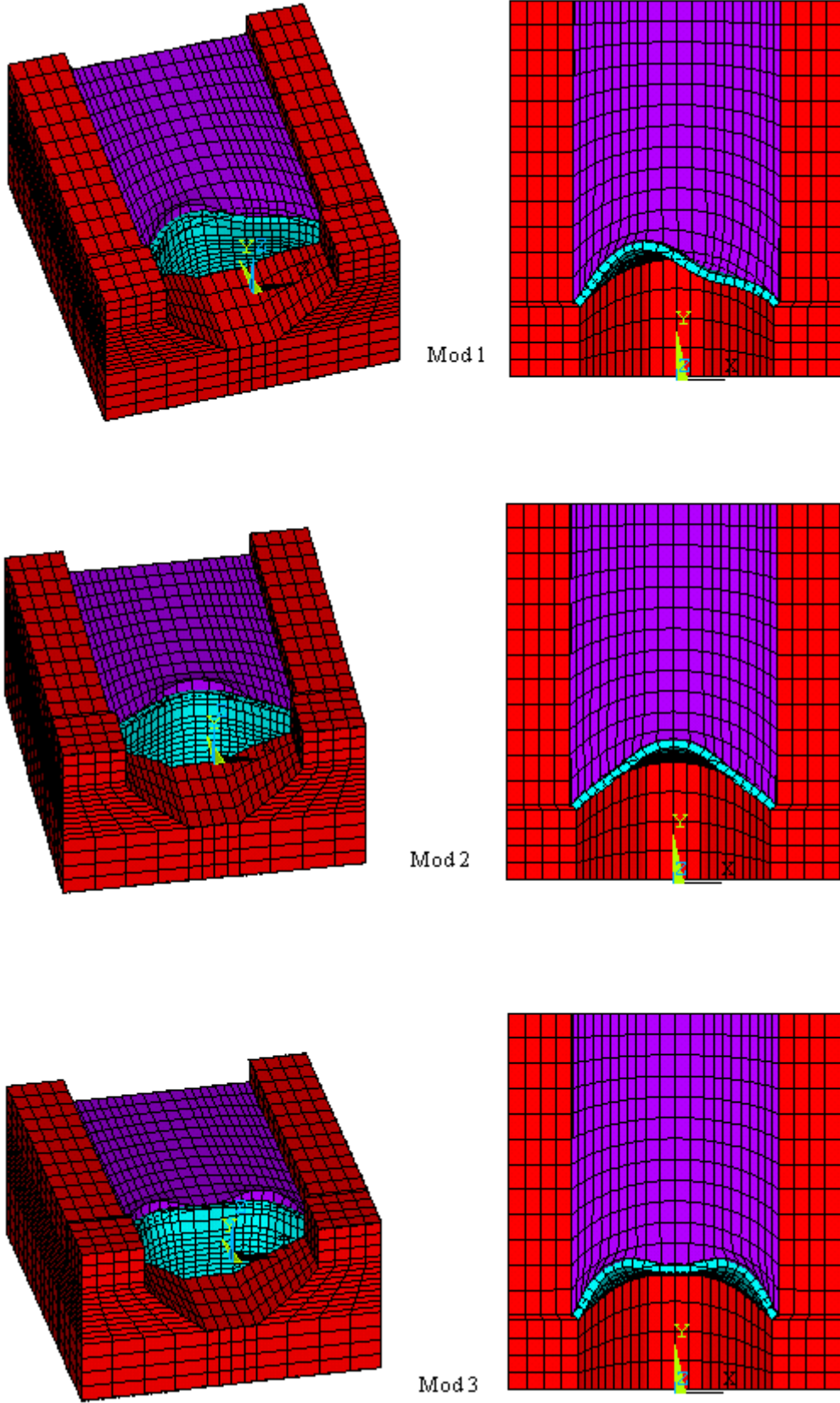


Mod 8



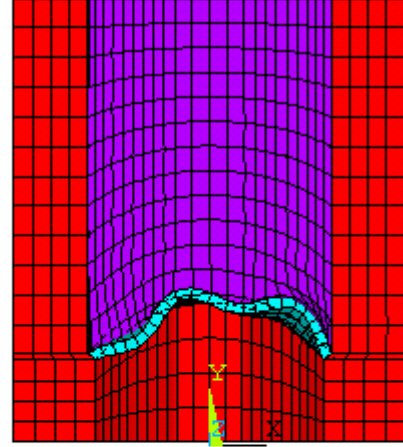
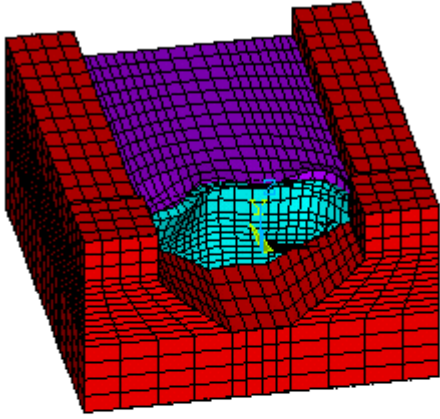
Mod 9



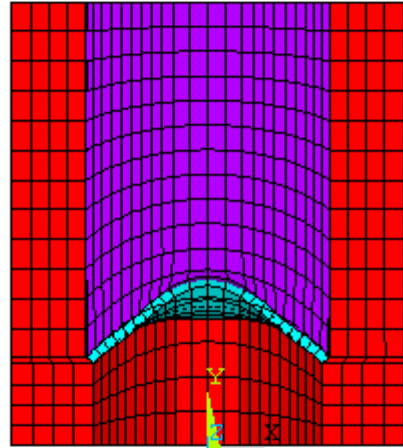
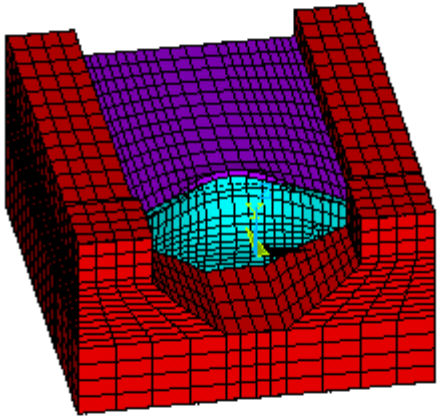


Şekil 41. Tip-1 kemer barajının  $H_a6$  durumu için elde edilen mod şekilleri

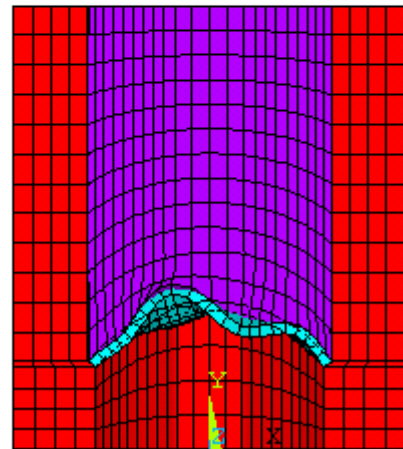
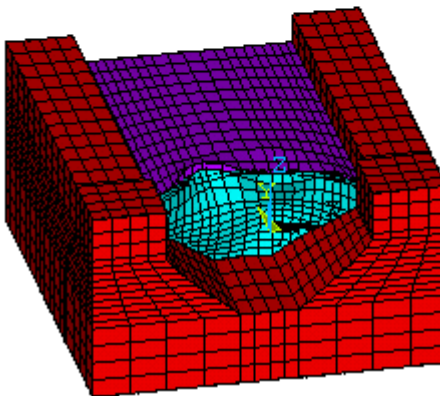
Şekil 41'in devamı



Mod 4



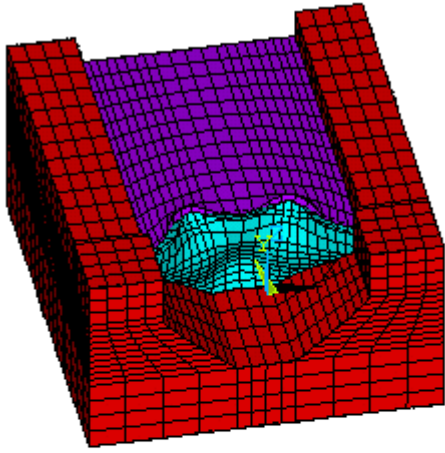
Mod 5



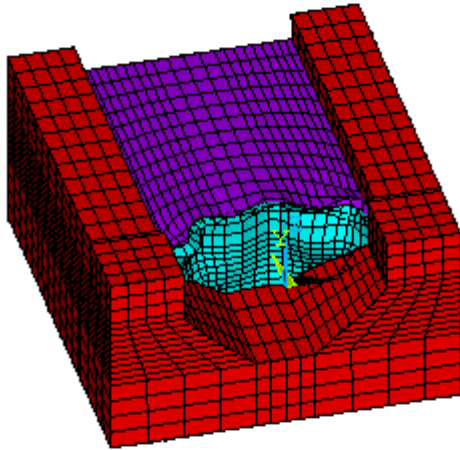
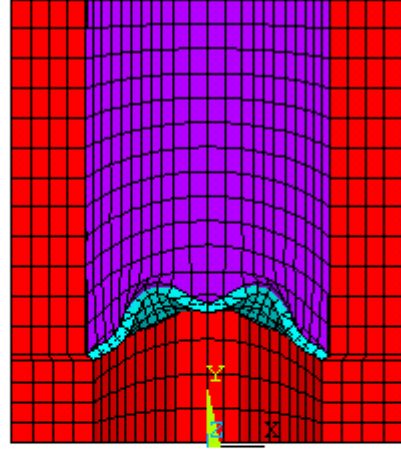
Mod 6



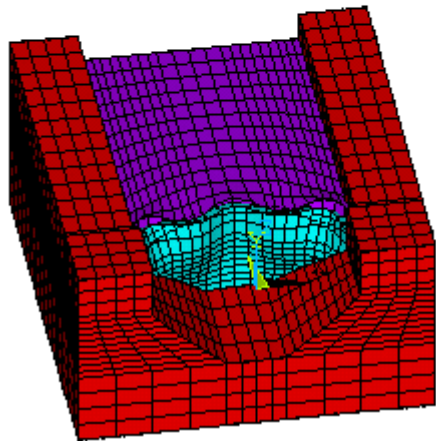
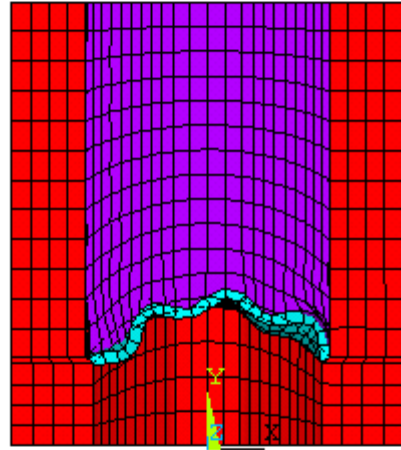
Şekil 41'in devamı



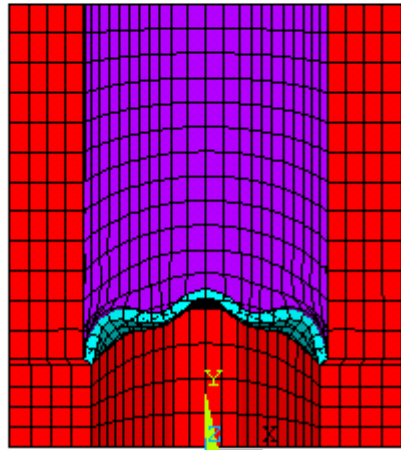
Mod7



Mod8



Mod9



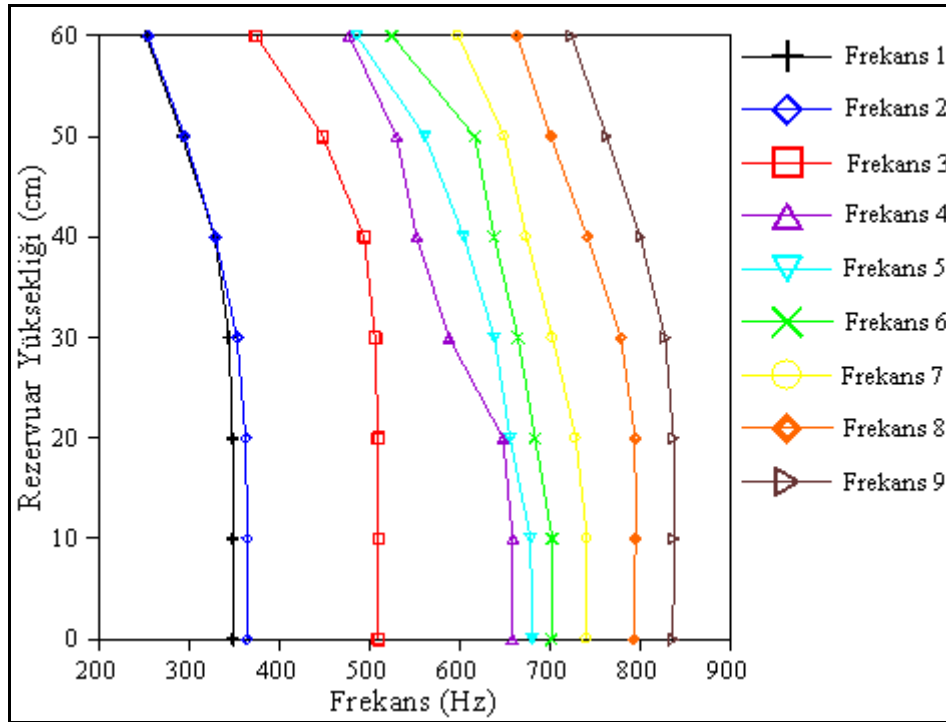
Şekil 35-41 incelendiğinde, Tip-1 kemer barajının rezervuar yüksekliğine bağlı her bir sonlu eleman modelinden elde edilen mod şekillerinin simetrik, anti-simetrik ve düşey eğilme modları olduğu görülmektedir. Ayrıca her bir sonlu eleman modelinden elde edilen mod şekli sıralamasının aynı olduğu gözlenmiştir. Buradan farklı rezervuar yüksekliklerinin Tip-1 kemer barajının mod şekillerini değiştirmedeği anlaşılmaktadır. Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar yüksekliğine sahip sonlu eleman modelleri için gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen doğal frekanslar Tablo 25'te, rezervuar yüksekliğine bağlı olarak elde edilen doğal frekansların değişimi Şekil 42'de verilmektedir.

Tablo 25 ve Şekil 42'de görüldüğü gibi özellikle  $H_{a4}$ ,  $H_{a5}$  ve  $H_{a6}$  durumları için elde edilen ilk iki frekansın birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla buradan, anti-simetrik ve simetrik olarak elde edilen ilk iki modun yer değiştirebileceği sonucunu çıkarmak mümkündür. Tablo 25 ve Şekil 42 incelendiğinde,  $H_{a0}$  durumu için elde edilen doğal frekanslar  $H_{a1}$  durumu için çok az artmaktadır. Buradan rezervuarda 10 cm su olması durumunda, Tip-1 kemer barajının rijitliğinin az da olsa arttığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte,  $H_{a0}$ ,  $H_{a1}$ ,  $H_{a2}$  ve  $H_{a3}$  durumları için elde edilen doğal frekansların birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, Tip-1 kemer barajının rezervuar yüksekliğinin yarısına kadar su olması durumunda doğal frekansların pek değişmediği ve bu yükseklikteki suyun davranışa pek etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, Tip-1 kemer barajının dar-V tipi bir vadiye (Şekil 11) oturmasının sonucudur. Tip-1 kemer barajının  $H_{a4}$ ,  $H_{a5}$  ve  $H_{a6}$  durumları için elde edilen doğal frekansların ilk dört duruma göre giderek azaldığı gözlenmiştir. Buradan, su yüksekliği arttıkça, sistemin toplam kütesinin arttığı ve buna bağlı olarak sistem kütle matrisinin Tip-1 kemer barajı davranışını belirlemede sistem rijitlik matrisine göre daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 25 ve Şekil 42'den genel bir ifadeyle, rezervuarın yarısına kadar dolu olması, Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını fazla değiştirmedeği, rezervuar yarı yüksekliğinden sonra artan yükseklikler için ise Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarında gözle görülür bir biçimde azalma olduğu sonucunu çıkartmak mümkündür.

Tablo 25 incelendiğinde, Tip-1 kemer barajının rezervuarında su olmaması ve rezervuarının tam dolu olması durumunda elde edilen doğal frekanslardaki değişim; 1. frekans için %27.5, 2. frekans için %30.1, 3. frekans için %26.6, 4. frekans için %27.5, 5. frekans için %28.7, 6. frekans için %25.2, 7. frekans için %19.2, 8. frekans için %9.6 ve 9. frekans için %13.5 olmaktadır.

Tablo 25. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinden elde edilen doğal frekanslar

Frekans (Hz)	Sonlu Eleman Modelleri						
	H <sub>a0</sub>	H <sub>a1</sub>	H <sub>a2</sub>	H <sub>a3</sub>	H <sub>a4</sub>	H <sub>a5</sub>	H <sub>a6</sub>
1	348.87	349.08	348.60	344.67	328.89	292.85	252.85
2	364.81	364.96	363.16	353.57	329.31	295.47	254.94
3	510.22	510.51	509.82	506.50	494.36	448.60	374.47
4	658.45	658.92	648.13	588.40	552.64	530.06	477.69
5	680.42	678.69	656.03	638.61	604.80	561.58	486.07
6	701.66	702.71	683.71	664.63	638.24	616.82	524.85
7	740.70	741.38	728.83	703.05	674.22	649.56	598.43
8	793.32	794.82	794.61	778.87	741.68	701.02	663.49
9	836.73	837.03	836.84	827.74	800.17	762.93	723.86



Şekil 42. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinden elde edilen ilk dokuz doğal frekansın değişimi

### 2.2.5.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

60 cm yüksekliğe sahip Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm oranlarını belirlemek için rezervuarın boş olması ve rezervuarda sırasıyla 10, 20, 30, 40, 50, 60 cm yüksekliğinde su bulunması durumları için baraja çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Her bir rezervuar yüksekliği durumunda uygulanan çevresel titreşim testini belirtmek için aşağıdaki kısaltmalar kullanılmaktadır:

- H<sub>ç0</sub>: Rezervuarın boş olması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,
- H<sub>ç1</sub>: Rezervuarda 10 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,
- H<sub>ç2</sub>: Rezervuarda 20 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,
- H<sub>ç3</sub>: Rezervuarda 30 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,
- H<sub>ç4</sub>: Rezervuarda 40 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,
- H<sub>ç5</sub>: Rezervuarda 50 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,
- H<sub>ç6</sub>: Rezervuarda 60 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi.

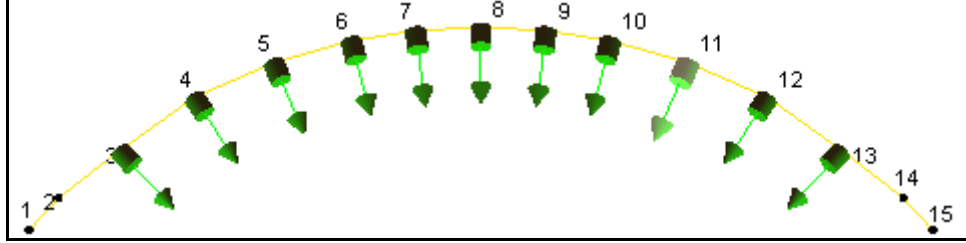
Tip-1 kemer barajının çevresel titreşim testlerinde kullanılan deneysel ölçüm sistemi Bölüm 1.7'deki anlatıma uygun olarak seçilmiştir. Buna göre, B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesi ve B&K 4507-B005 tipi tek eksenli ivmeölçerler, PULSE (2006) ve OMA (2006) yazılımları Çevresel Titreşim Yöntemi'nde kullanılmıştır. Laboratuarda inşa edilen Tip-1 kemer barajının ölçümlerinde ortamda rüzgar, taşıt, deprem vs., gibi herhangi bir çevresel etki olmadığından barajı titreştirmek için APS 400 tipi titreştirici, B&K 8206 ve 8210 tipi darbe çekiçleri kullanılmıştır. Uygulamada zorlanmış titreşim testi için kullanılan bu sarsıcılar, Tip-1 kemer barajının çevresel titreşim testlerinde veri toplama sistemine tanıtılmamış, dolayısıyla değeri ölçülmeyen doğal bir etki gibi dikkate alınmıştır. Tip-1 kemer barajının ölçümlerinde kullanılan ölçüm sistemi ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 1.7.1'de mevcuttur. Çevresel titreşim testlerinde kullanılan ölçüm sistemine ait bazı fotoğraflar Şekil 43'te verilmektedir.



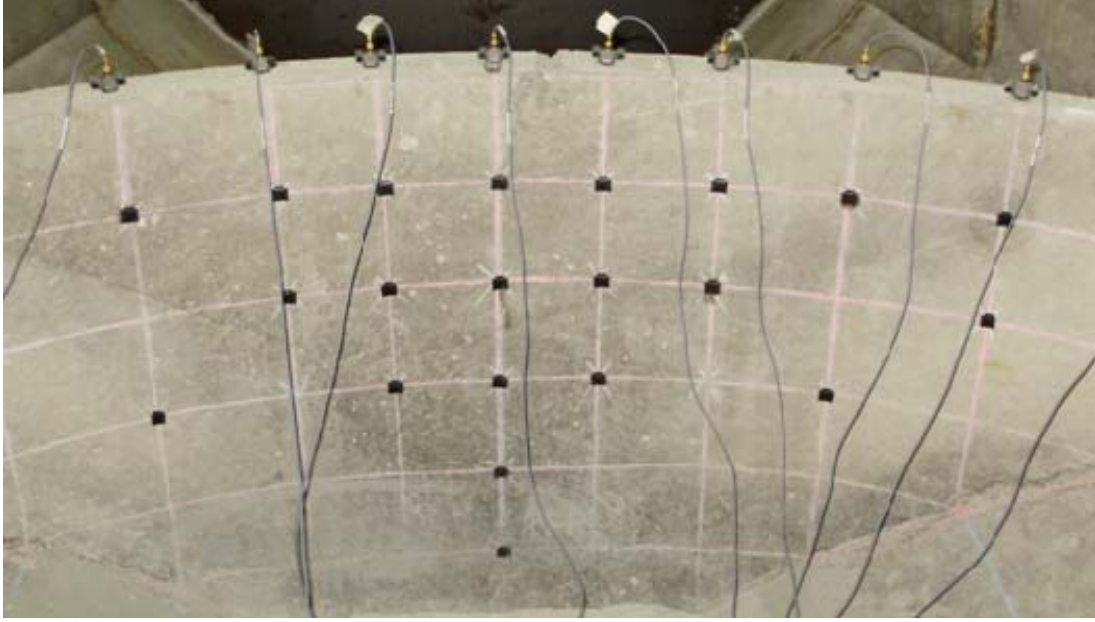
Şekil 43. Tip-1 kemer barajının çevresel titreşim testlerinde kullanılan ölçüm sistemi

Tip-1 kemer barajına farklı rezervuar yüksekliği durumları için uygulanan çevresel titreşim testleri, beton dökümünden 45 gün sonra gerçekleştirilmiştir. Barajdan gelen titreşim sinyallerini toplamak için 11 adet ivmeölçer baraj kretine, kret eksenine normal doğrultuda yerleştirilmiştir (Şekil 44). Baraj düşey doğrultuda daha rijit ve OMA (2006) yazılımında barajın üç boyutlu modelini yapmak zor olduğu için bu doğrultuda ivmeölçer yerleştirilmemiştir. Çünkü yapılan deneme ölçümlerinde düşey doğrultuda modlar istenilen doğrulukta elde edilememiştir. Her bir çevresel titreşim testinde ölçülmesi planlanan frekans aralığı analitik modellerden elde edilen doğal frekanslara göre 0-1600 Hz arası seçilmiş ve her test için 5 dk ölçüm alınarak sinyaller toplanmıştır. Testlerde, ivmeölçerlerle veri toplama ünitesi arasındaki sinyal transferi tek eksenli sinyal kabloları ile sağlanmıştır. Veri toplama ünitesine alınan ham sinyalleri dijital ortama göndermek için veri toplama ünitesi ile bilgisayar arasında ara kablo kullanılmış ve PULSE (2006) yazılımı ile ham sinyaller işlenebilir hale getirilmiştir. PULSE (2006) yazılımındaki sinyaller OMA (2006) yazılımına aktararak işlenmiştir. İşlenen sinyaller Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemleri'ne göre ayrıştırılarak Tip-1 kemer barajının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları

farklı rezervuar yüksekliği durumları için elde edilmiştir. Her bir rezervuar yüksekliği durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sırasında çekilen fotoğraflar Şekil 45-51'de verilmektedir.



Şekil 44. Tip 1 kemer barajının çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivme ölçerlerin yerleşim planı

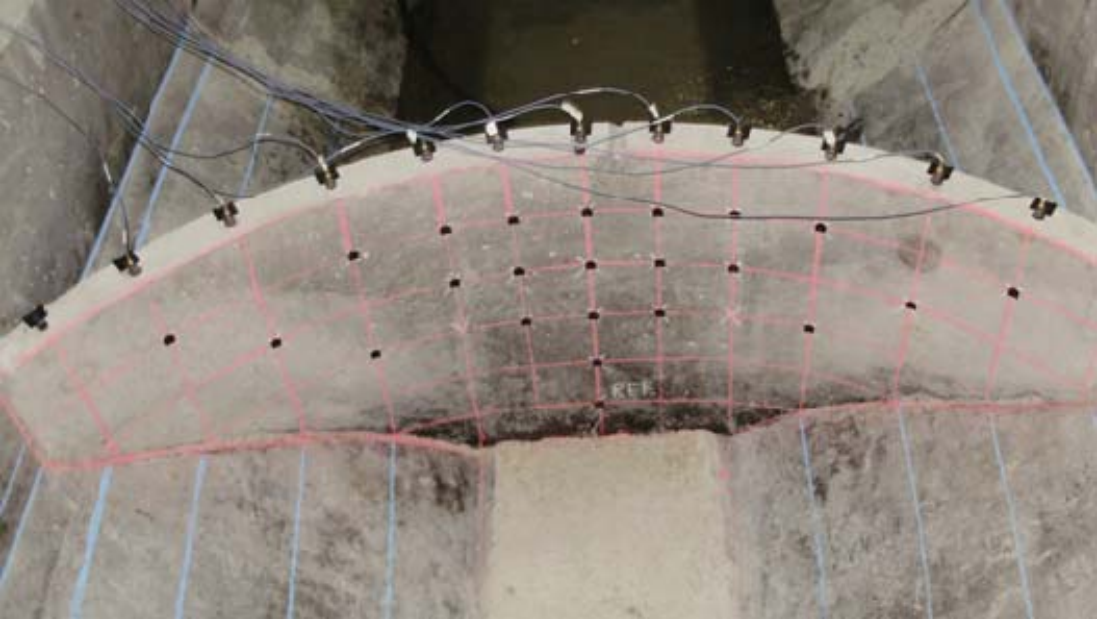


Şekil 45. Tip-1 kemer barajında H0 durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi

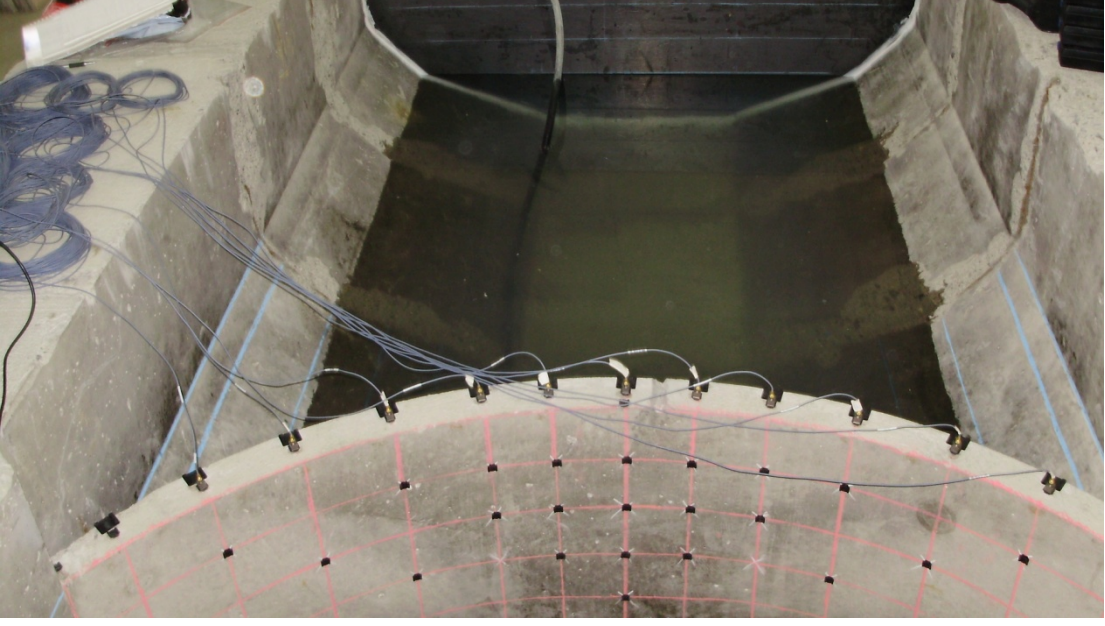




Şekil 46. Tip-1 kemer barajında Hç1 durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi



Şekil 47. Tip-1 kemer barajında Hç2 durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi

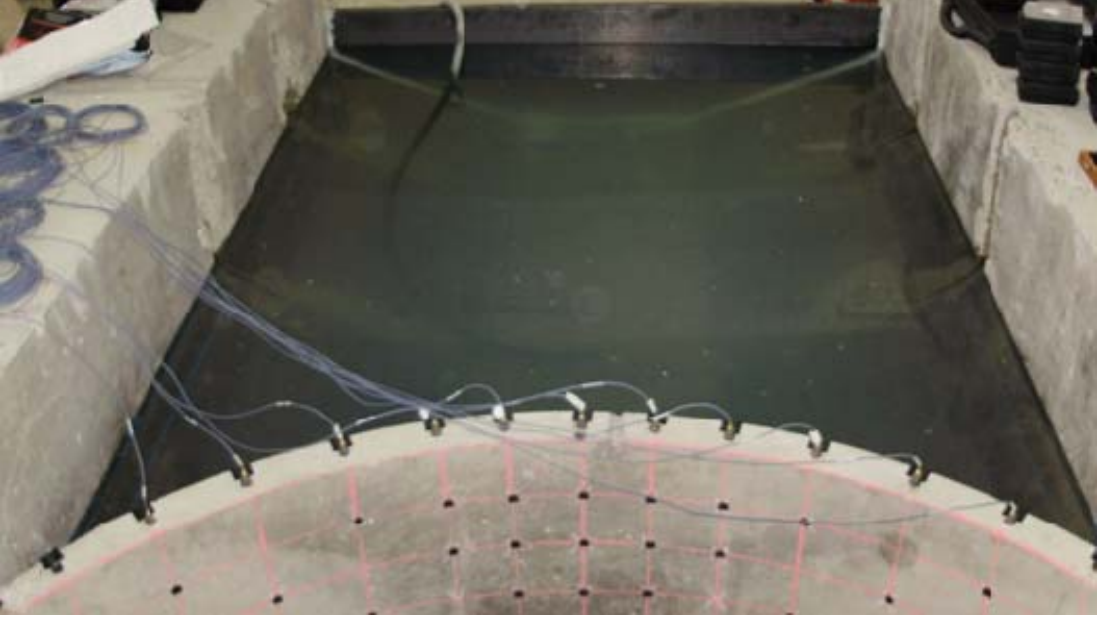


Şekil 48. Tip-1 kemer barajında Hç3 durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi



Şekil 49. Tip-1 kemer barajında Hç4 durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi





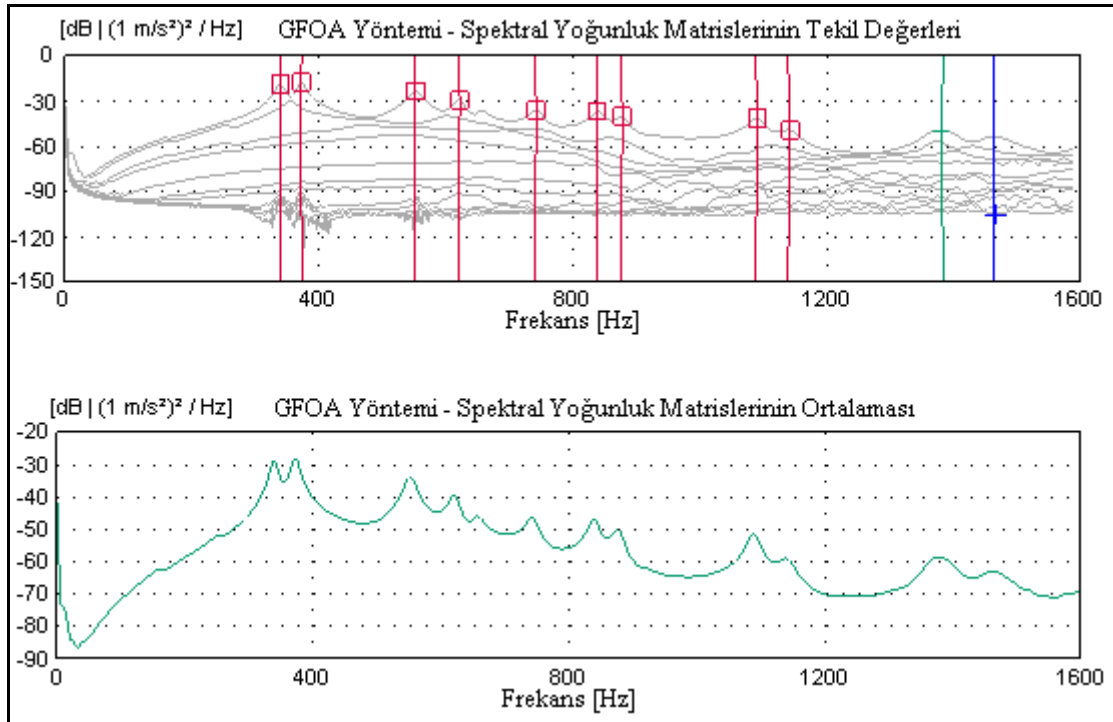
Şekil 50. Tip-1 kemer barajında Hç5 durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi



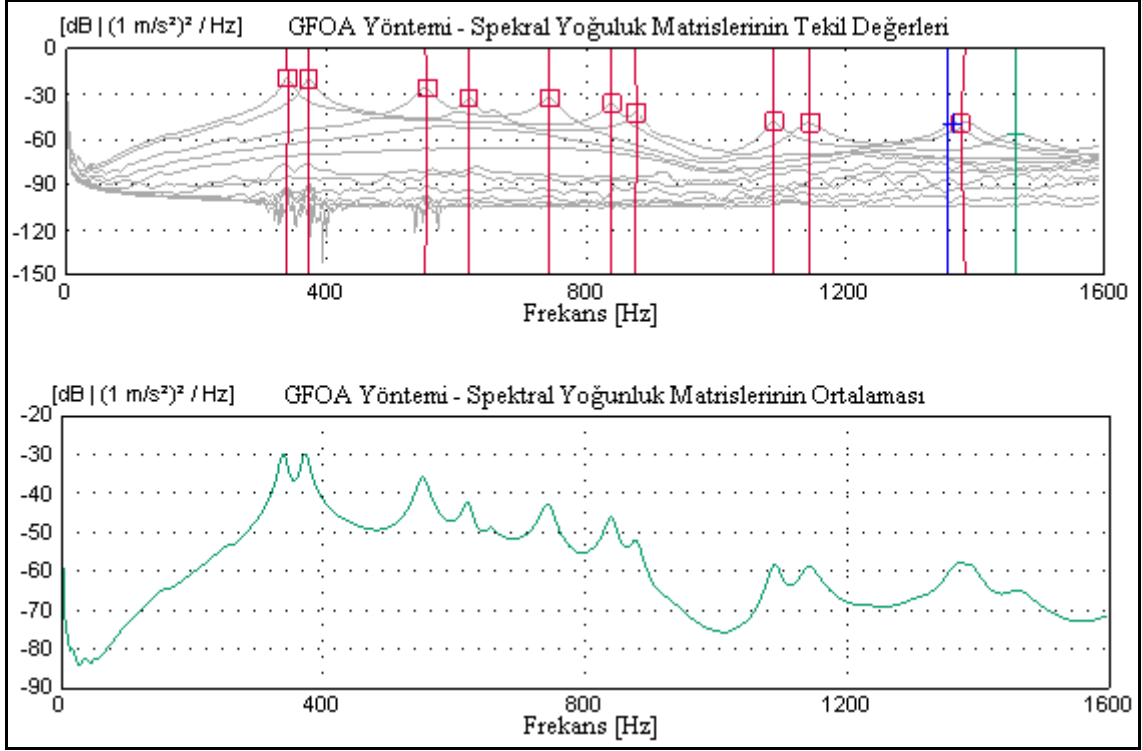
Şekil 51. Tip-1 kemer barajında Hç6 durumu için gerçekleştirilen çevresel titreşim testi

### 2.2.5.2.1. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) Yöntemine Göre Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

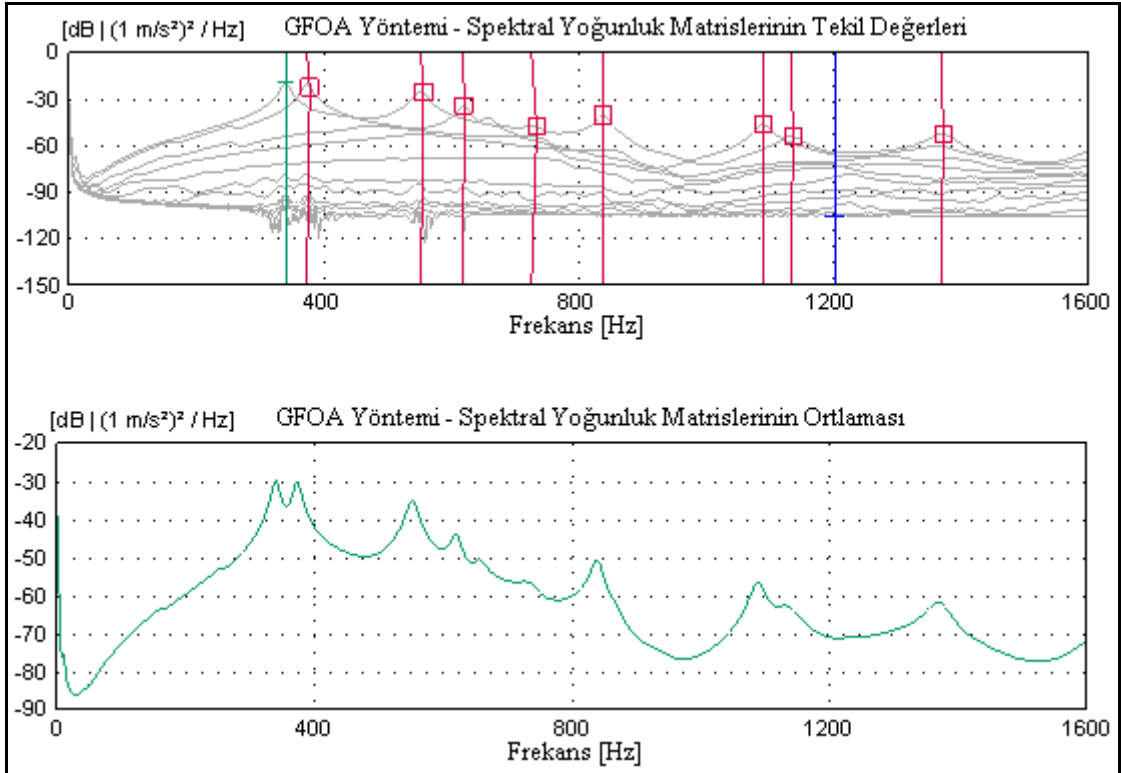
$H_{\zeta 0}$ ,  $H_{\zeta 1}$ ,  $H_{\zeta 2}$ ,  $H_{\zeta 3}$ ,  $H_{\zeta 4}$ ,  $H_{\zeta 5}$ ,  $H_{\zeta 6}$  durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerinin ortalaması sırasıyla Şekil 52-58'de verilmektedir. Şekil 52-58'de görülen sinyallerin pik yapan değerleri yapısal modlara karşılık gelmekte ve bu piklerin seçilmesiyle Tip-1 kemer barajının doğal frekansları belirlenmektedir. Şekil 52-58 incelendiğinde,  $H_{\zeta 0}$ ,  $H_{\zeta 1}$ ,  $H_{\zeta 2}$  ve  $H_{\zeta 3}$  durumları için 8-10 mod elde edilirken,  $H_{\zeta 4}$ ,  $H_{\zeta 5}$  ve  $H_{\zeta 6}$  durumları için 4-5 mod elde edilmiştir. Buradan, rezervuardaki su yüksekliği arttıkça Tip-1 kemer barajının dinamik davranışının etkilendiği sonucunu çıkartmak mümkündür.



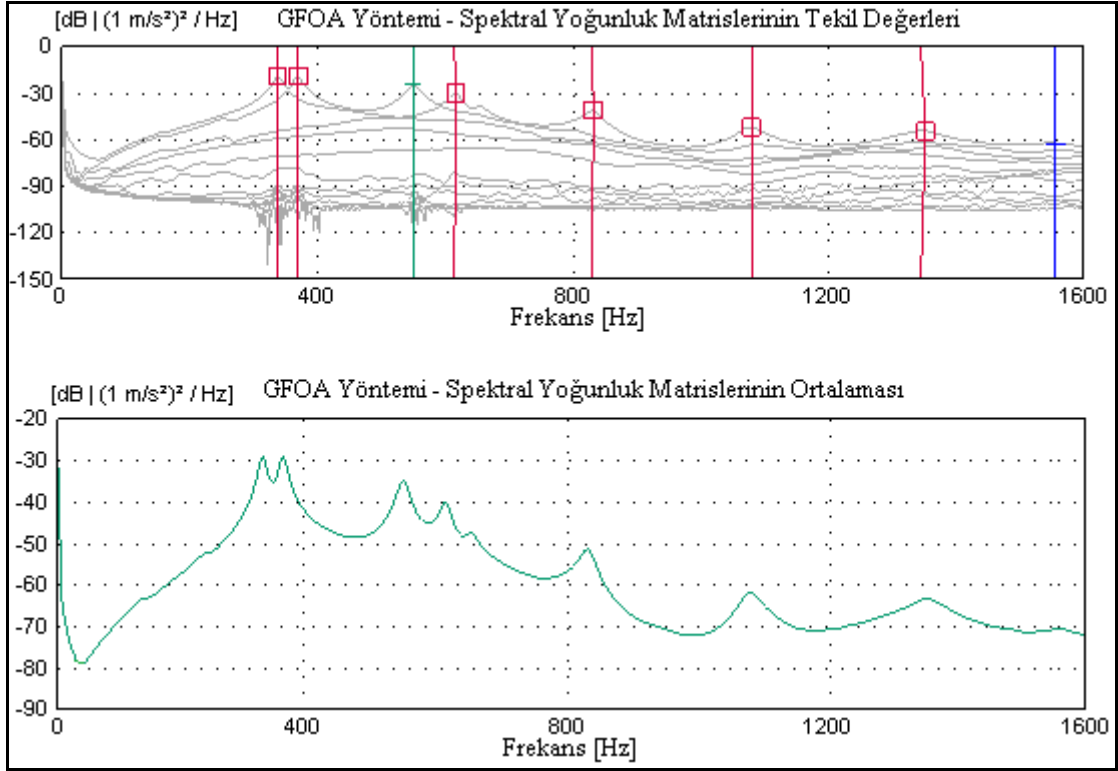
Şekil 52.  $H_{\zeta 0}$  durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri



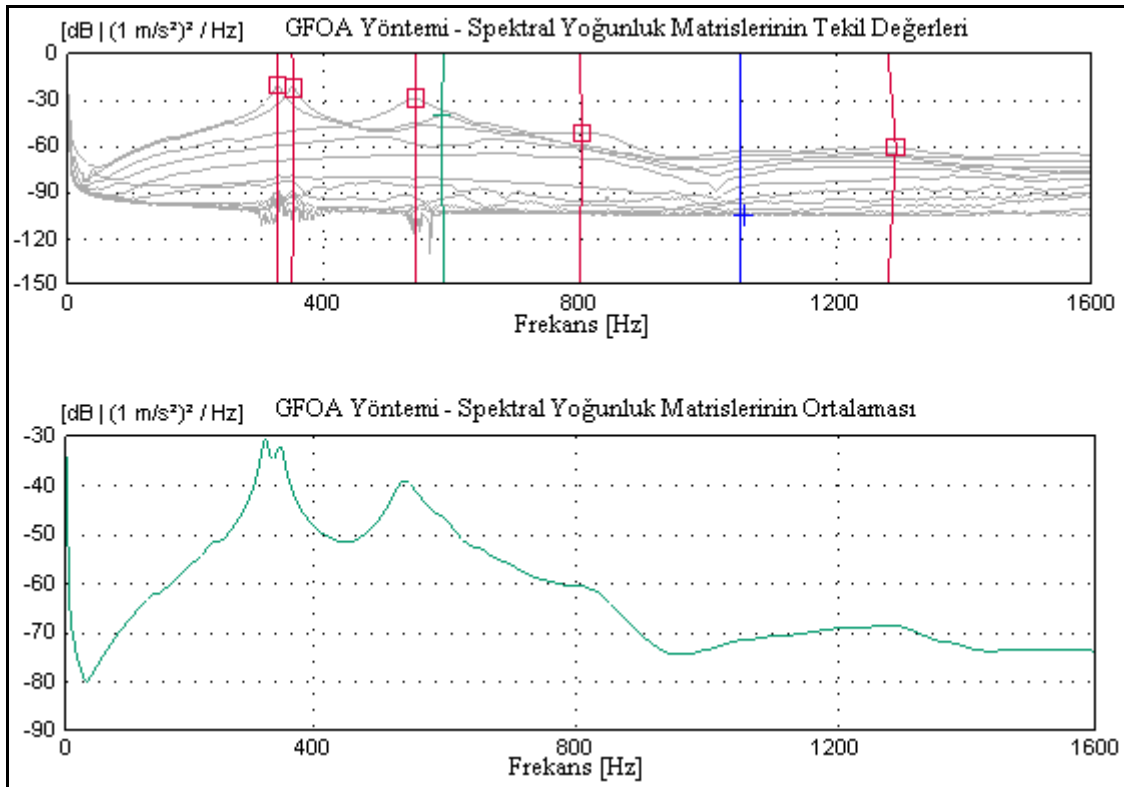
Şekil 53. H<sub>ç1</sub> durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri



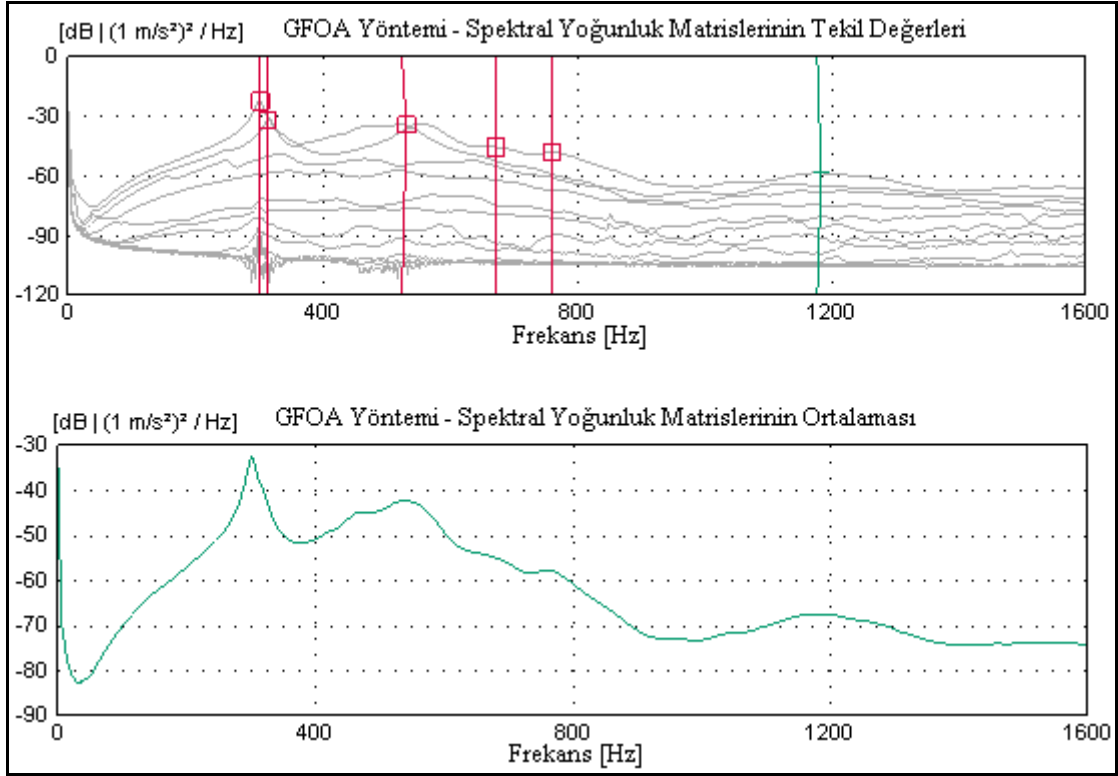
Şekil 54. H<sub>ç2</sub> durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri



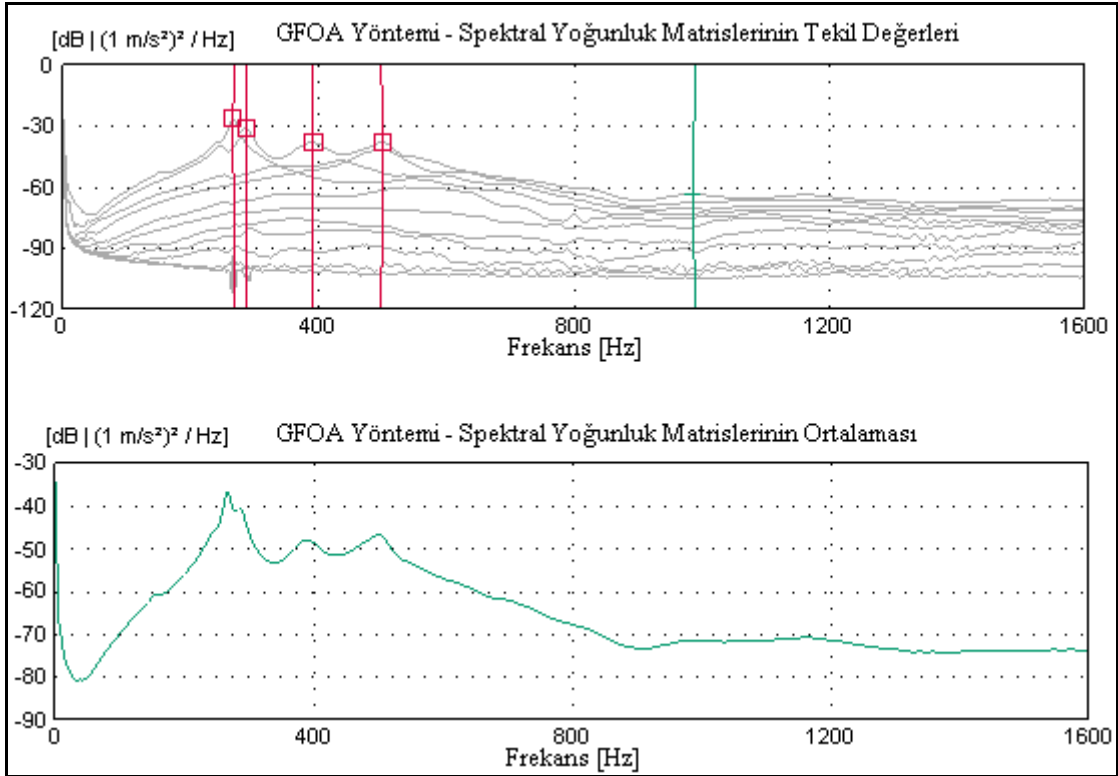
Şekil 55. Hç3 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri



Şekil 56. Hç4 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri

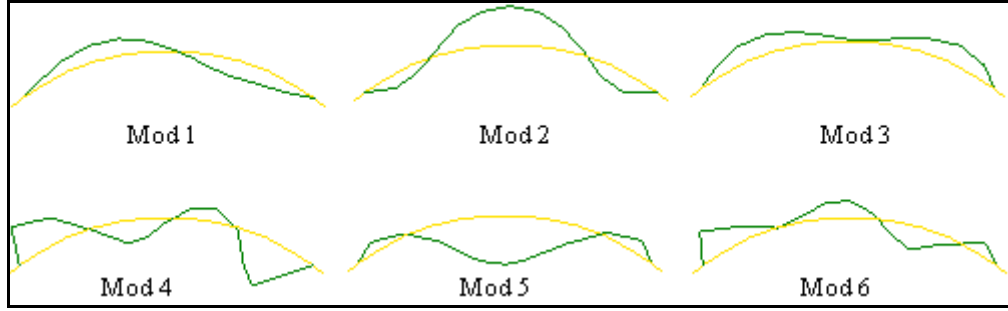


Şekil 57. Hç5 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri



Şekil 58. Hç6 durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri

H<sub>ç0</sub> durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk altı mod şekli Şekil 59'da verilmektedir. Şekil 59 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir. İvmeölçerler kret ekseninin normali doğrultusunda yerleştirildikleri için düşey mod şekilleri elde edilememiştir.



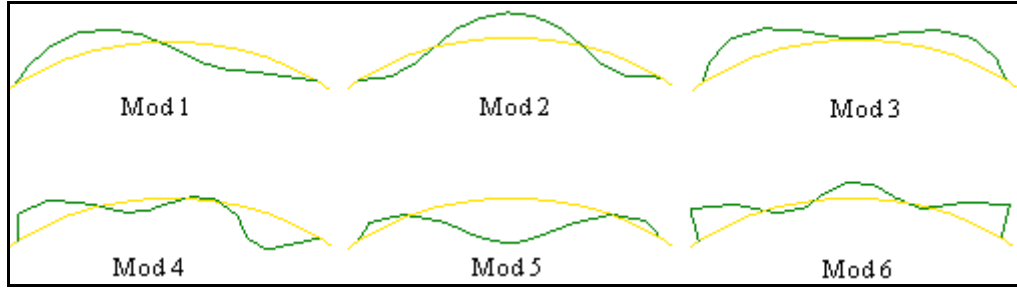
Şekil 59. H<sub>ç0</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç0</sub> durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 26'da verilmektedir. Tablo 26'da görüldüğü gibi ilk altı doğal frekans 339-839 Hz arasında, sönüm oranları ise %0.7-1.9 arasında değişmektedir.

Tablo 26. H<sub>ç0</sub> durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	339.2	0.00295	Anti-Simetrik Eğilme	1.712
2	372.6	0.00268	Simetrik Eğilme	1.670
3	552.3	0.00181	Simetrik Eğilme	1.921
4	619.8	0.00161	Anti-Simetrik Eğilme	1.202
5	741.1	0.00135	Simetrik Eğilme	1.185
6	839.0	0.00119	Simetrik Eğilme	0.713

H<sub>ç1</sub> durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk altı mod şekli Şekil 60'ta verilmektedir. Şekil 60 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.



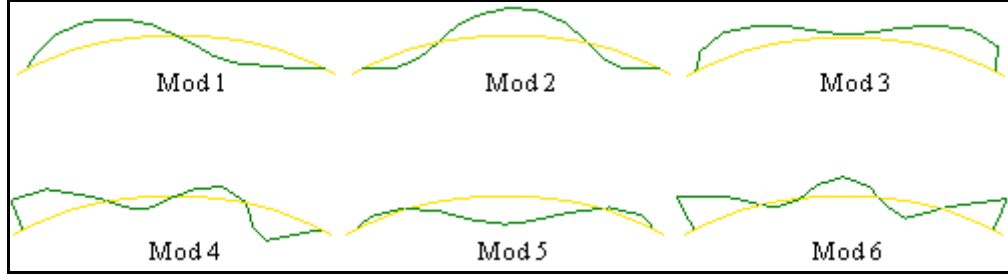
Şekil 60. Hç1 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Hç1 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 27’de verilmektedir. Tablo 27’de görüldüğü gibi ilk altı doğal frekans 340-839 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.0-1.9 arasında değişmektedir.

Tablo 27. Hç1 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	339.5	0.00295	Anti-Simetrik Eğilme	1.858
2	373.1	0.00268	Simetrik Eğilme	1.765
3	552.3	0.00181	Simetrik Eğilme	1.676
4	619.9	0.00161	Anti-Simetrik Eğilme	1.190
5	743.9	0.00134	Simetrik Eğilme	1.592
6	839.1	0.00119	Simetrik Eğilme	0.993

Hç2 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk altı mod şekli Şekil 61’de verilmektedir. Şekil 61 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.



Şekil 61. Hç2 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

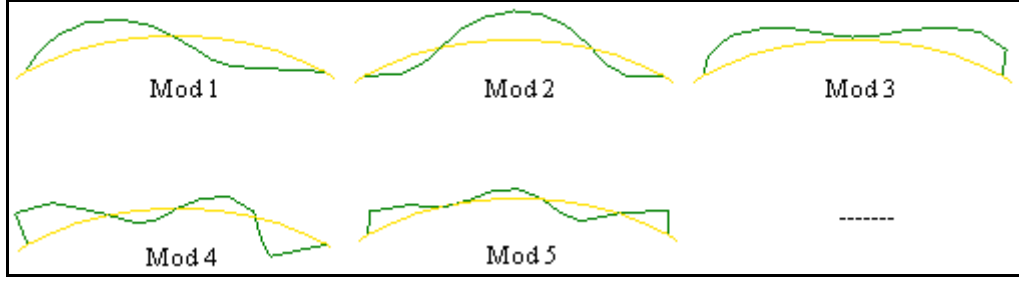
Hç2 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 28’de verilmektedir. Tablo 28’de görüldüğü gibi ilk altı doğal frekans 340-839 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.1-1.8 arasında değişmektedir.

Tablo 28. Hç2 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	339.6	0.00295	Anti-Simetrik Eğilme	1.701
2	373.0	0.00268	Simetrik Eğilme	1.641
3	552.2	0.00181	Simetrik Eğilme	1.587
4	618.5	0.00162	Anti-Simetrik Eğilme	1.078
5	725.6	0.00138	Simetrik Eğilme	1.787
6	838.4	0.00119	Simetrik Eğilme	1.157

Hç3 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk beş mod şekli Şekil 62’de verilmektedir. Şekil 62 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.





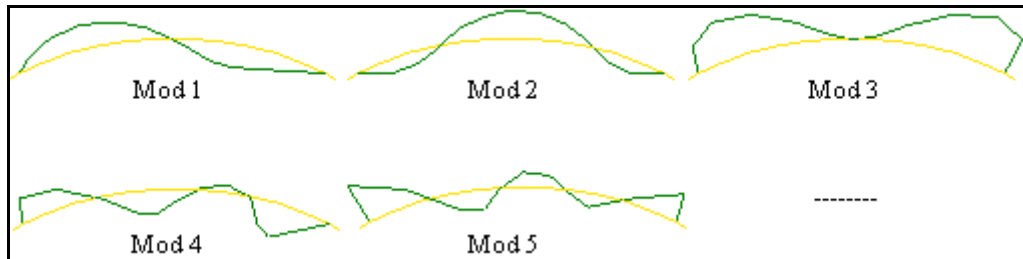
Şekil 62. Hç3 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Hç3 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk beş moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 29'da verilmektedir. Tablo 29'da görüldüğü gibi ilk beş doğal frekans 339-830 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.5-1.9 arasında değişmektedir.

Tablo 29. Hç3 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	338.5	0.00295	Anti-Simetrik Eğilme	1.857
2	369.3	0.00271	Simetrik Eğilme	1.536
3	551.6	0.00181	Simetrik Eğilme	1.846
4	614.6	0.00163	Anti-Simetrik Eğilme	1.512
5	830.1	0.00121	Simetrik Eğilme	1.916

Hç4 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk beş mod şekli Şekil 63'te verilmektedir. Şekil 63 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.



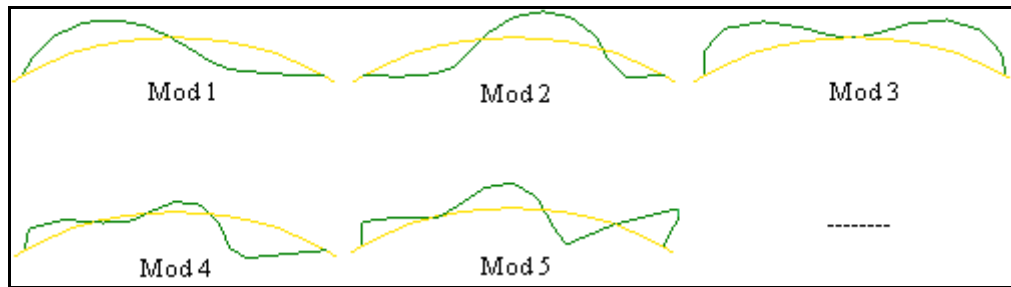
Şekil 63. Hç4 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç</sub>4 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk beş moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 30'da verilmektedir. Tablo 30'da görüldüğü gibi ilk beş doğal frekans 328-799 Hz arasında, sönüm oranları ise %0.4-4.2 arasında değişmektedir.

Tablo 30. H<sub>ç</sub>4 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	328.2	0.00304	Anti-Simetrik Eğilme	1.740
2	350.6	0.00285	Simetrik Eğilme	1.946
3	542.6	0.00184	Simetrik Eğilme	3.500
4	587.0	0.00170	Anti-Simetrik Eğilme	0.406
5	799.2	0.00125	Simetrik Eğilme	4.193

H<sub>ç</sub>5 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk beş mod şekli Şekil 64'te verilmektedir. Şekil 64 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.



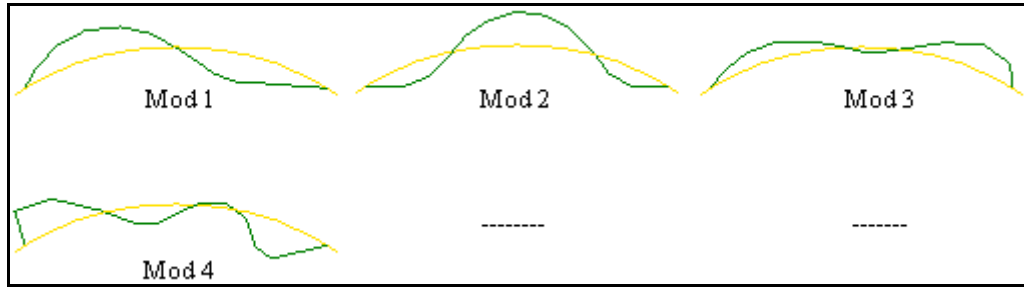
Şekil 64. H<sub>ç</sub>5 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç</sub>5 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk beş moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 31'de verilmektedir. Tablo 31'de görüldüğü gibi ilk beş doğal frekans 301-770 Hz arasında, sönüm oranları ise %0.4-2.6 arasında değişmektedir.

Tablo 31. H<sub>ç</sub>5 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	301.0	0.00332	Anti-Simetrik Eğilme	1.999
2	315.0	0.00318	Simetrik Eğilme	0.359
3	525.0	0.00191	Simetrik Eğilme	1.386
4	554.0	0.00181	Anti-Simetrik Eğilme	1.662
5	770.2	0.00130	Simetrik Eğilme	2.624

H<sub>ç</sub>6 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk dört mod şekli Şekil 65'te verilmektedir. Şekil 65 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.

Şekil 65. H<sub>ç</sub>6 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç</sub>6 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk dört moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 32'de verilmektedir. Tablo 32'de görüldüğü gibi ilk dört doğal frekans 269-499 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.4-5.6 arasında değişmektedir.

Tablo 32. H<sub>ç</sub>6 durumu için GFOA yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

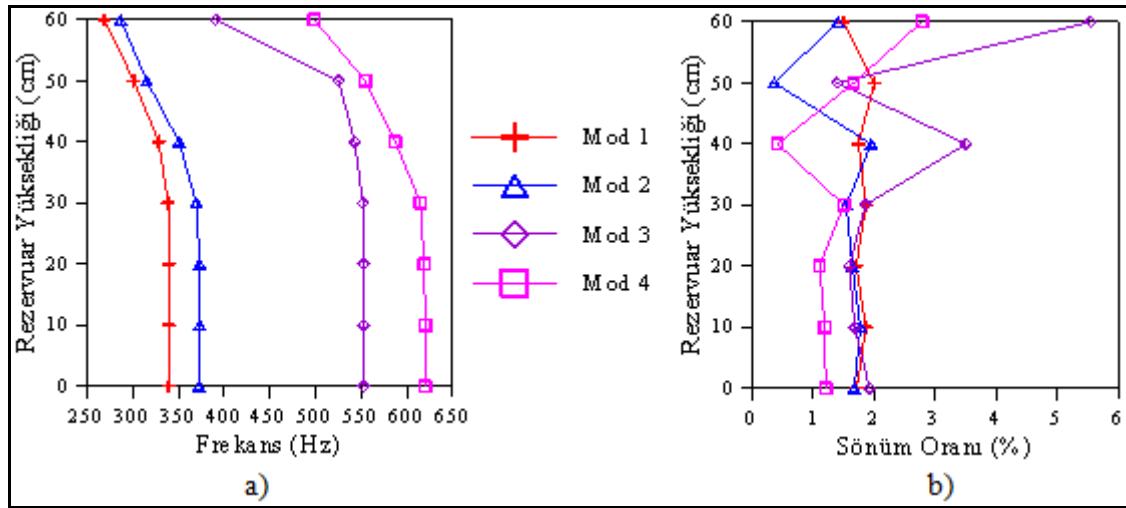
Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	268.8	0.00372	Anti-Simetrik Eğilme	1.486
2	286.4	0.00349	Simetrik Eğilme	1.412
3	390.3	0.00256	Simetrik Eğilme	5.550
4	498.5	0.00201	Anti-Simetrik Eğilme	2.757

Şekil 59-65 incelendiğinde, her bir rezervuar yüksekliği için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemine göre elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir. Tip-1 kemer barajının kretine düşey doğrultuda ivmeölçer yerleştirilmediği için düşey eğilme modları elde edilememiştir. Her bir çevresel titreşim testinden elde edilen mod şekli sıralamasının aynı olduğu gözlenmiştir. Buradan, farklı rezervuar yüksekliklerinin Tip-1 kemer barajının mod şekillerini değiştirmedeği anlaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 59-65 incelendiğinde, H<sub>ç</sub>0, H<sub>ç</sub>1, H<sub>ç</sub>2 ve H<sub>ç</sub>3 durumları için altıdan fazla, H<sub>ç</sub>4, H<sub>ç</sub>5 ve H<sub>ç</sub>6 durumları için ise beş ve daha az mod elde edilmiştir. Genel olarak, Tip-1 kemer barajında rezervuar yüksekliği arttıkça elde edilen mod sayısı azalmaktadır. Burada yüksekliğe bağlı su miktarının; baraj titreşimlerini sönümlediği, toplanan sinyal kalitesini düşürdüğü, dolayısıyla yüksek frekanslı modların kaybolmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk dört doğal frekans ve sönüm oranı Tablo 33'te, rezervuar yüksekliğine bağlı olarak elde edilen ilk dört doğal frekansın ve sönüm oranının değişimini içeren grafik Şekil 66'da verilmektedir.

Tablo 33 ve Şekil 66a incelendiğinde, H<sub>ç</sub>0 durumu için elde edilen doğal frekansların H<sub>ç</sub>1 durumu için çok az arttığı görülmektedir. Buradan rezervuarda 10 cm su olması durumunda, Tip-1 kemer barajının rijitliğinin az da olsa arttığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, H<sub>ç</sub>0, H<sub>ç</sub>1, H<sub>ç</sub>2 ve H<sub>ç</sub>3 durumları için elde edilen doğal frekansların birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, Tip-1 kemer barajının rezervuar yüksekliğinin yarısına kadar su olması durumunda doğal frekansların pek değişmediği ve bu yükseklikteki suyun davranışa pek etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, Tip-1 kemer barajının dar-V tipi bir vadiye (Şekil 11) oturmasının sonucudur. Tip-1 kemer barajının H<sub>ç</sub>4, H<sub>ç</sub>5 ve H<sub>ç</sub>6 durumları için elde edilen doğal frekanslarının ilk dört duruma göre giderek azaldığı gözlenmiştir. Buradan, su yüksekliği arttıkça, sistemin toplam külesinin arttığı ve buna bağlı olarak sistem kütle matrisinin Tip-1 kemer barajı davranışını belirlemede sistem rijitlik matrisine göre daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 33 ve Şekil 66a'dan genel bir ifadeyle, rezervuar yüksekliğinin yarısına kadar dolu olması Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını değiştirmedeği, rezervuar yarı yüksekliğinden sonra artan yükseklikler için ise Tip-1 kemer barajın doğal frekanslarında gözle görülür bir biçimde azalma olduğu sonucunu çıkartmak mümkündür. Şekil 66b incelendiğinde ilk dört

moda karşılık gelen sönüm oranları  $H_{ç0}$ ,  $H_{ç1}$ ,  $H_{ç2}$  ve  $H_{ç3}$  durumları için %1-2 civarında,  $H_{ç4}$ ,  $H_{ç5}$  ve  $H_{ç6}$  durumları için ise %0.4-5.6 gibi daha değişken olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, Tip-1 kemer barajının taban seviyesinden yarı yüksekliğe kadar olan kısımda sönüm oranlarının pek değişmediği, yarı yükseklikten krete kadar olan kısımda ise sönüm oranlarının karmaşık ve değişken bir hal aldığı anlaşılmaktadır.

Tablo 33 incelendiğinde, Tip-1 kemer barajının rezervuarında su olmaması ve rezervuarının tam dolu olması durumunda elde edilen doğal frekanslardaki değişim; 1. frekans için %20.8, 2. frekans için %23.1, 3. frekans için %29.3 ve 4. Frekans için %19.6 olmaktadır.



Şekil 66. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının GFOA yöntemine göre elde edilen ilk dört a) doğal frekansın b) sönüm oranının değişimi

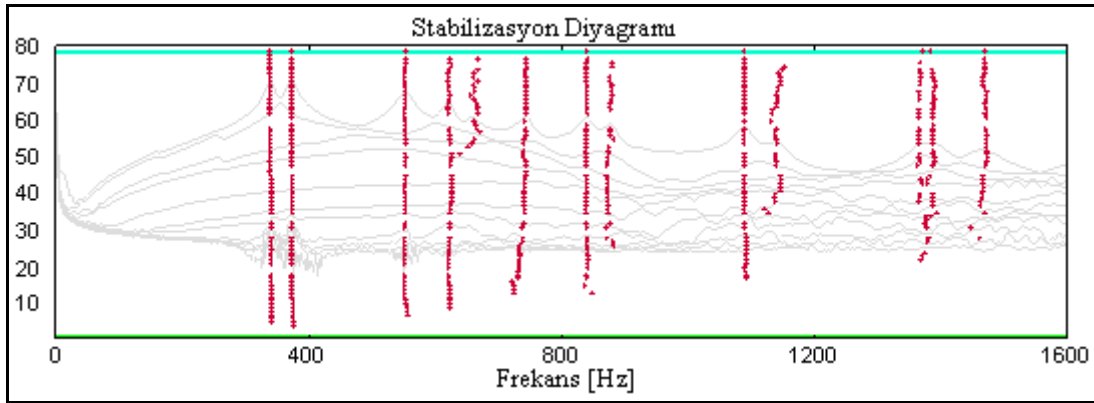
Tablo 33. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk dört doğal frekans ve sönüm oranı

Modlar (Hz)	Çevresel Titreşim Testleri													
	H <sub>ç0</sub>		H <sub>ç1</sub>		H <sub>ç2</sub>		H <sub>ç3</sub>		H <sub>ç4</sub>		H <sub>ç5</sub>		H <sub>ç6</sub>	
	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)
1	339.2	1.712	339.5	1.858	339.6	1.701	338.5	1.857	328.2	1.740	301.0	1.999	268.8	1.486
2	372.6	1.670	373.1	1.765	373.0	1.641	369.3	1.536	350.6	1.946	315.0	0.359	286.4	1.412
3	552.3	1.921	552.3	1.676	552.2	1.587	551.6	1.846	542.6	3.500	525.0	1.386	390.3	5.550
4	619.8	1.202	619.9	1.190	618.5	1.078	614.6	1.512	587.0	0.406	554.0	1.662	498.5	2.757

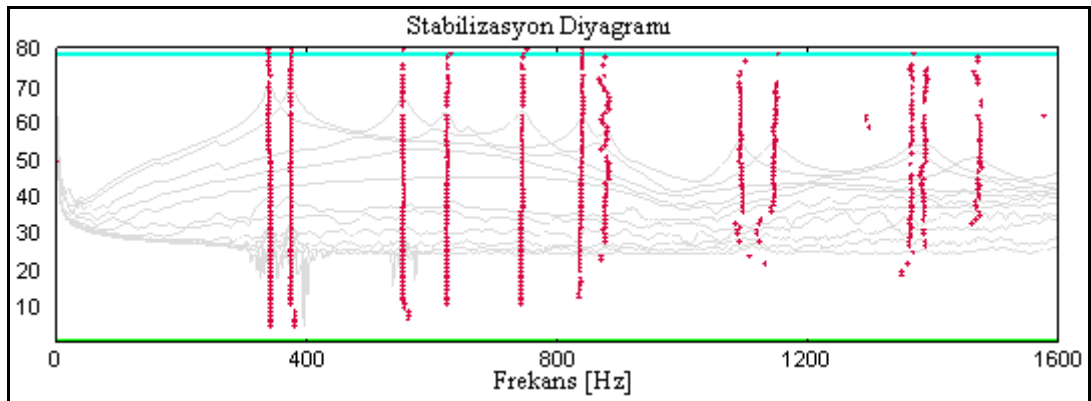
Frkns\* : Frekans      SO\* : Sönüm Oranı

### 2.2.5.2.2. Stokastik Altalan Belirleme (SAB) Yöntemine Göre Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

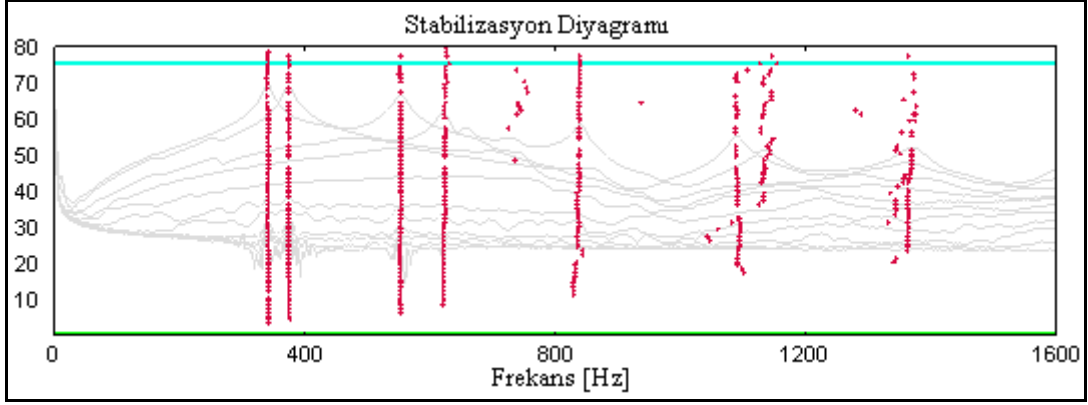
$H_{\zeta 0}$ ,  $H_{\zeta 1}$ ,  $H_{\zeta 2}$ ,  $H_{\zeta 3}$ ,  $H_{\zeta 4}$ ,  $H_{\zeta 5}$ ,  $H_{\zeta 6}$  durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin SAB yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen stabilizasyon diyagramları sırasıyla Şekil 67-73'te verilmektedir. Şekil 67-73'te görünen, genellikle sinyallerin pik noktalarında + şeklinde ince bir şerit oluşturan kısımlar yapısal modlara karşılık gelmekte ve bu kısımların seçilmesiyle Tip-1 kemer barajının doğal frekansları belirlenmektedir. Şekil 67-73 incelendiğinde,  $H_{\zeta 0}$ ,  $H_{\zeta 1}$ ,  $H_{\zeta 2}$  ve  $H_{\zeta 3}$  durumları için 8-10 mod elde edilirken,  $H_{\zeta 4}$ ,  $H_{\zeta 5}$  ve  $H_{\zeta 6}$  durumları için 4-5 mod elde edilmiştir. Buradan, rezervuardaki su yüksekliği arttıkça Tip-1 kemer barajının dinamik davranışının etkilendiği sonucunu çıkartmak mümkündür.



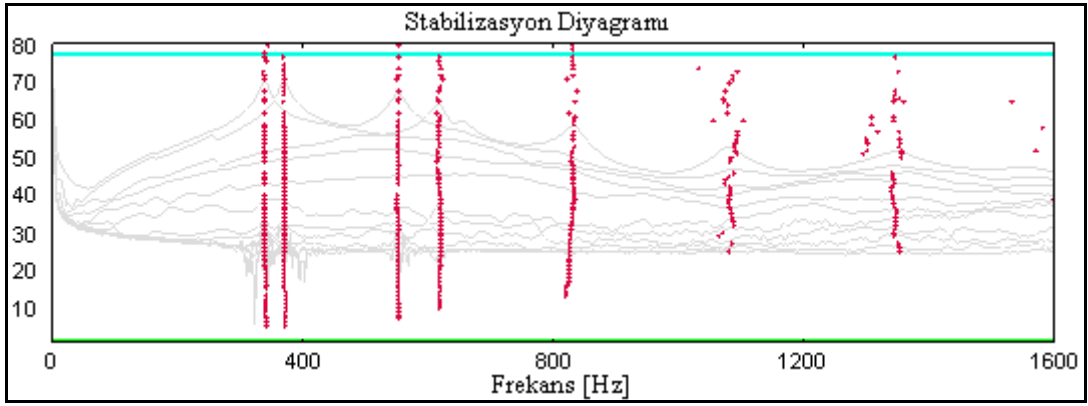
Şekil 67.  $H_{\zeta 0}$  durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı



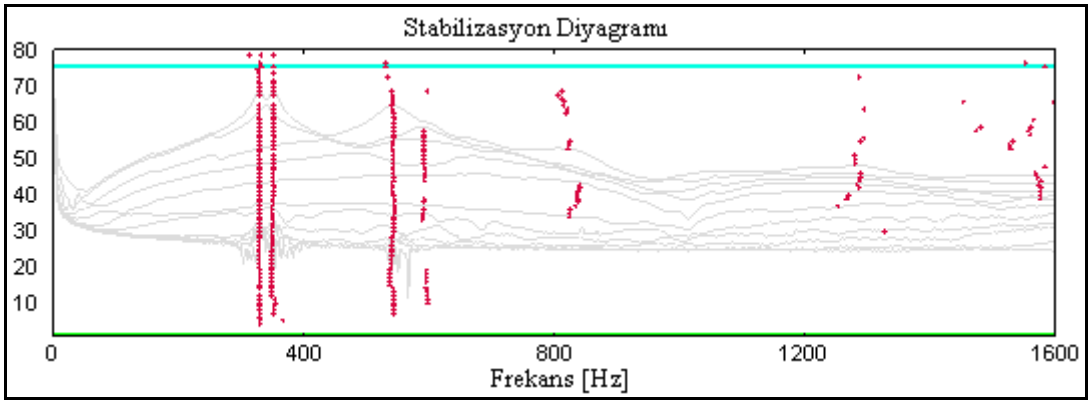
Şekil 68.  $H_{\zeta 1}$  durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı



Şekil 69. H<sub>ç2</sub> durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı

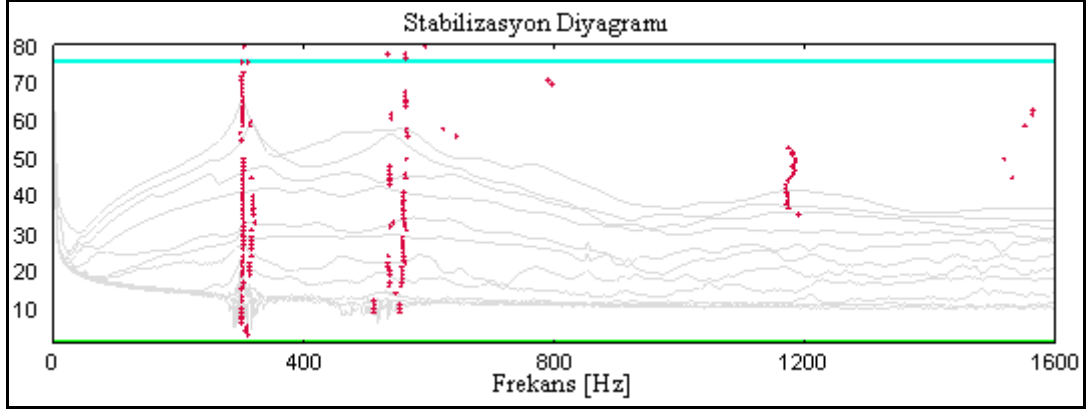


Şekil 70. H<sub>ç3</sub> durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı

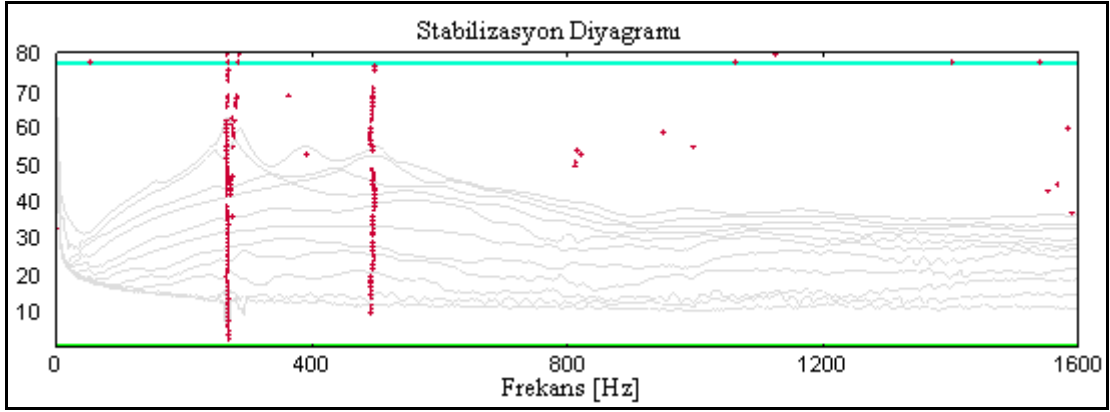


Şekil 71. H<sub>ç4</sub> durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı



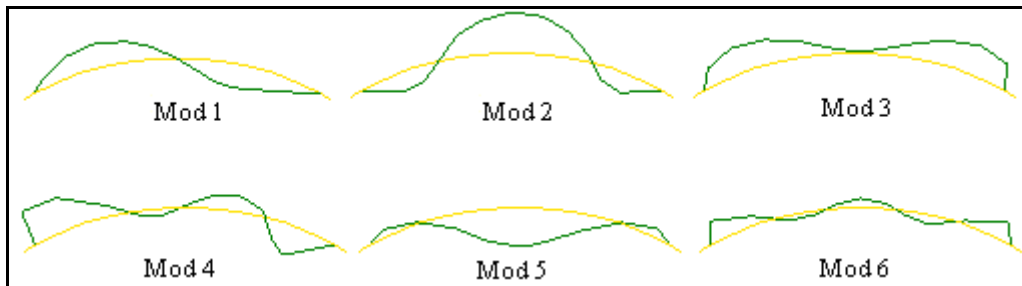


Şekil 72. Hç5 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı



Şekil 73. Hç6 durumu için Tip-1 kemer barajının stabilizasyon diyagramı

Hç0 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk altı mod şekli Şekil 74'te verilmektedir. Şekil 74 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir. İvmeölçerler kret ekseninin normali doğrultusunda yerleştirildikleri için düşey mod şekilleri elde edilememiştir.



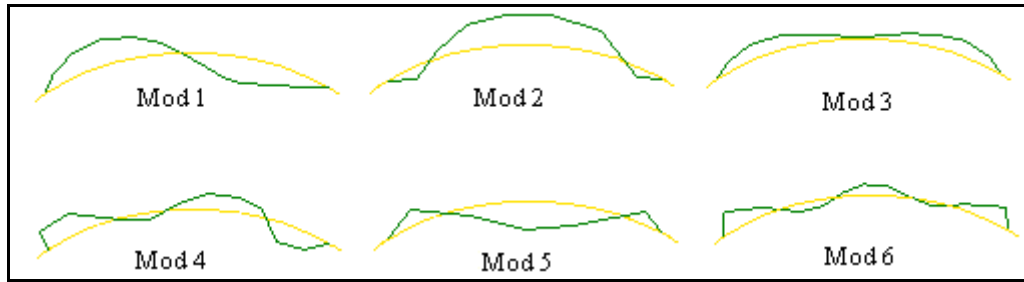
Şekil 74. Hç0 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç0</sub> durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 34’te verilmektedir. Tablo 34’te görüldüğü gibi ilk altı doğal frekans 338-839 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.1-2.1 arasında değişmektedir.

Tablo 34. H<sub>ç0</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	338.3	0.00296	Anti-Simetrik Eğilme	1.659
2	372.3	0.00269	Simetrik Eğilme	1.500
3	552.7	0.00181	Simetrik Eğilme	1.800
4	611.2	0.00164	Anti-Simetrik Eğilme	2.123
5	742.7	0.00135	Simetrik Eğilme	1.075
6	839.2	0.00119	Simetrik Eğilme	1.152

H<sub>ç1</sub> durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk altı mod şekli Şekil 75’te verilmektedir. Şekil 75 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.



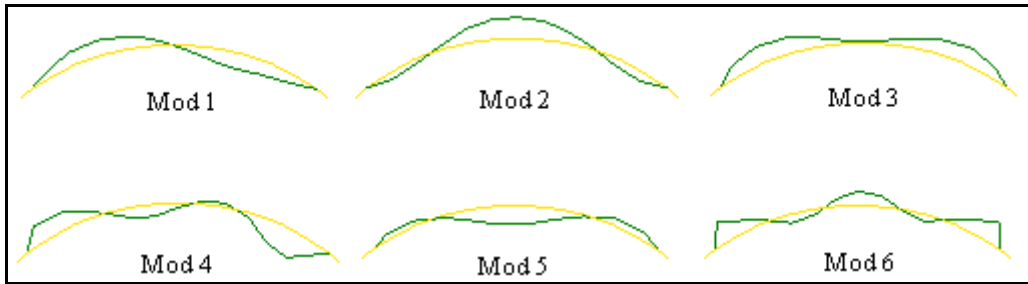
Şekil 75. H<sub>ç1</sub> durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç1</sub> durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 35’te verilmektedir. Tablo 35’te görüldüğü gibi ilk altı doğal frekans 339-839 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.1-2.1 arasında değişmektedir.

Tablo 35. H<sub>ç</sub>1 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	338.5	0.00295	Anti-Simetrik Eğilme	1.675
2	374.4	0.00267	Simetrik Eğilme	1.621
3	551.5	0.00181	Simetrik Eğilme	1.921
4	629.1	0.00159	Anti-Simetrik Eğilme	2.073
5	745.3	0.00134	Simetrik Eğilme	1.673
6	838.9	0.00139	Simetrik Eğilme	1.138

H<sub>ç</sub>2 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk altı mod şekli Şekil 76'da verilmektedir. Şekil 76 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.

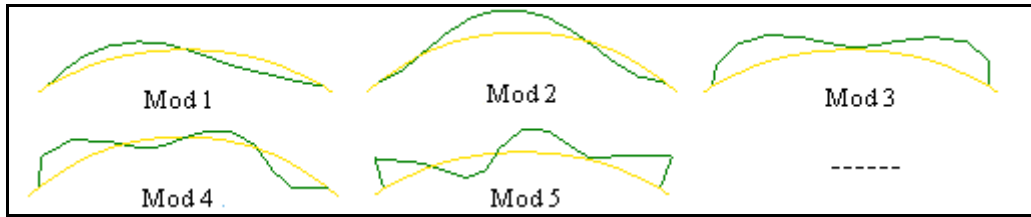
Şekil 76. H<sub>ç</sub>2 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç</sub>2 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk altı moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 36'da verilmektedir. Tablo 36'da görüldüğü gibi ilk altı doğal frekans 340-839 Hz arasında, sönüm oranları ise %0.8-2.4 arasında değişmektedir.

Tablo 36. H<sub>ç</sub>2 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	339.8	0.00294	Anti-Simetrik Eğilme	1.584
2	374.2	0.00267	Simetrik Eğilme	1.472
3	550.0	0.00182	Simetrik Eğilme	1.113
4	630.0	0.00159	Anti-Simetrik Eğilme	2.367
5	743.5	0.00135	Simetrik Eğilme	0.829
6	839.1	0.00119	Simetrik Eğilme	1.121

H<sub>ç</sub>3 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk beş mod şekli Şekil 77’de verilmektedir. Şekil 77 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.

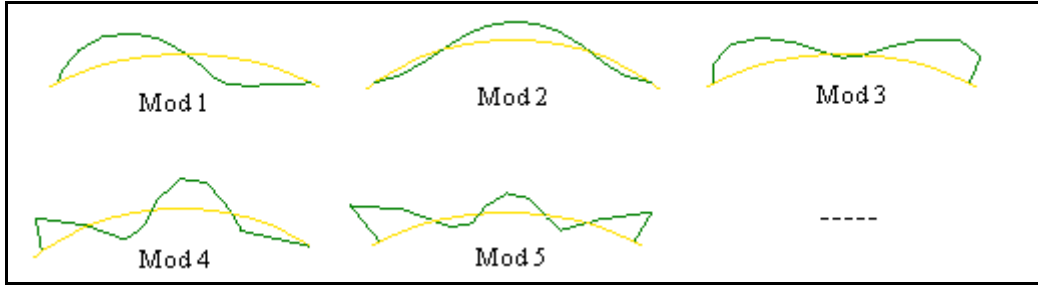
Şekil 77. H<sub>ç</sub>3 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç</sub>3 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk beş moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 37’de verilmektedir. Tablo 37’de görüldüğü gibi ilk beş doğal frekans 337-833 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.5-2.5 arasında değişmektedir.

Tablo 37. H<sub>ç</sub>3 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	337.1	0.00297	Anti-Simetrik Eğilme	2.543
2	368.8	0.00271	Simetrik Eğilme	1.609
3	550.9	0.00182	Simetrik Eğilme	1.875
4	616.5	0.00162	Anti-Simetrik Eğilme	1.894
5	833.2	0.00120	Simetrik Eğilme	1.541

H<sub>ç</sub>4 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk beş mod şekli Şekil 78’de verilmektedir. Şekil 78 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.



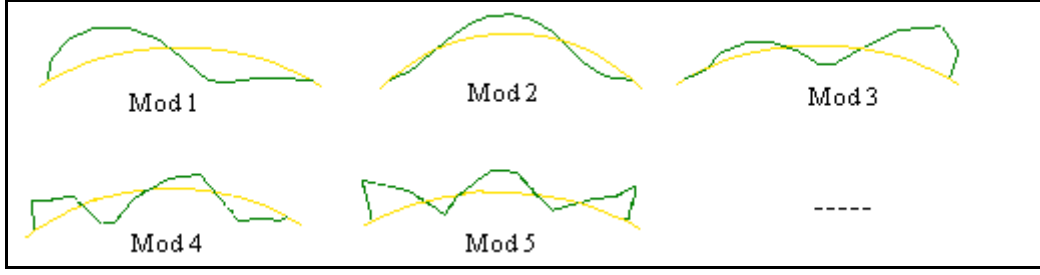
Şekil 78. H<sub>ç</sub>4 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç</sub>4 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk beş moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 38’de verilmektedir. Tablo 38’de görüldüğü gibi ilk altı doğal frekans 331-807 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.1-5.3 arasında değişmektedir.

Tablo 38. H<sub>ç</sub>4 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	330.9	0.00302	Anti-Simetrik Eğilme	1.783
2	350.8	0.00285	Simetrik Eğilme	1.081
3	529.6	0.00189	Simetrik Eğilme	2.029
4	588.3	0.00170	Anti-Simetrik Eğilme	2.764
5	806.7	0.00124	Simetrik Eğilme	5.316

H<sub>ç</sub>5 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk beş mod şekli Şekil 79’da verilmektedir. Şekil 79 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.



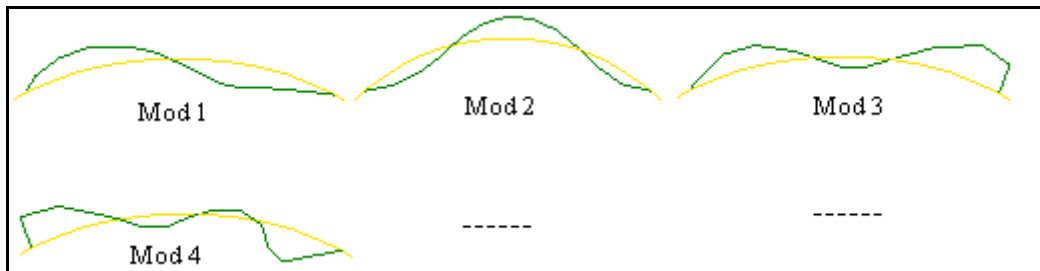
Şekil 79. Hç5 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

Hç5 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk beş moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 39'da verilmektedir. Tablo 39'da görüldüğü gibi ilk altı doğal frekans 300-676 Hz arasında, sönüm oranları ise %0.5-5.4 arasında değişmektedir.

Tablo 39. Hç5 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	300.3	0.00333	Anti-Simetrik Eğilme	0.456
2	310.0	0.00323	Simetrik Eğilme	4.176
3	470.2	0.00213	Simetrik Eğilme	5.407
4	531.1	0.00188	Anti-Simetrik Eğilme	2.669
5	676.3	0.00148	Simetrik Eğilme	1.554

Hç6 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk dört mod şekli Şekil 80'de verilmektedir. Şekil 80 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir.



Şekil 80. Hç6 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen mod şekilleri

H<sub>ç</sub>6 durumu için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk dört moda ait doğal frekans, doğal periyot, mod şekli ve sönüm oranı Tablo 40'ta verilmektedir. Tablo 40'ta görüldüğü gibi ilk dört doğal frekans 267-497 Hz arasında, sönüm oranları ise %1.3-8.5 arasında değişmektedir.

Tablo 40. H<sub>ç</sub>6 durumu için SAB yöntemine göre elde edilen dinamik karakteristikler

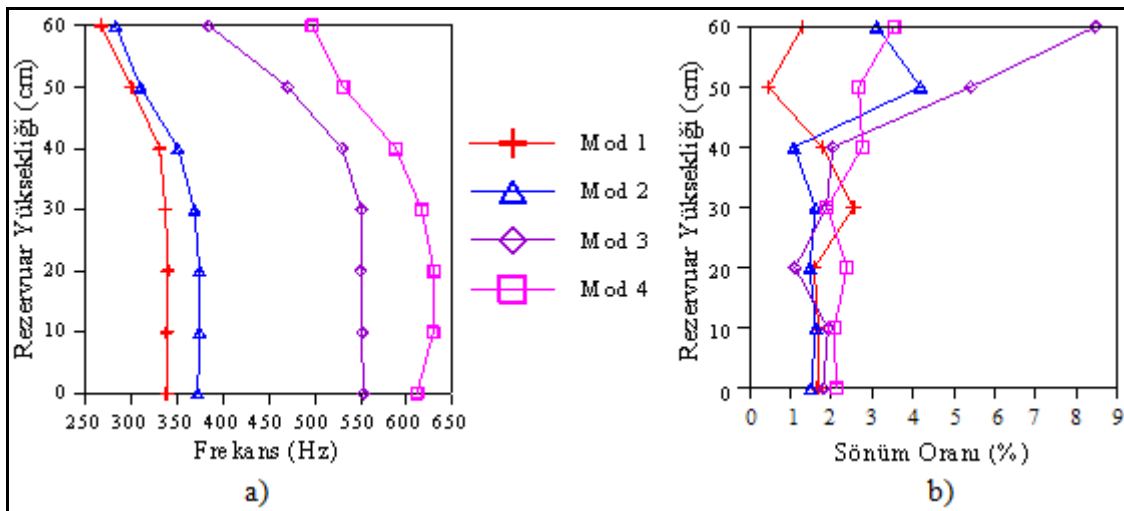
Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli	Sönüm Oranı (%)
1	267.1	0.00374	Anti-Simetrik Eğilme	1.288
2	282.9	0.00355	Simetrik Eğilme	3.109
3	384.7	0.00260	Simetrik Eğilme	8.464
4	497.4	0.00201	Anti-Simetrik Eğilme	3.532

Şekil 74-80 incelendiğinde, her bir rezervuar yüksekliği için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemine göre elde edilen mod şekillerinin simetrik ve anti-simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir. Her bir çevresel titreşim testinden elde edilen mod şekli sıralamasının aynı olduğu gözlenmiştir. Buradan, farklı rezervuar yüksekliklerinin Tip-1 kemer barajının mod şekillerini değiştirmedeği anlaşılmaktadır. Ayrıca Şekil 74-80 incelendiğinde, H<sub>ç</sub>0, H<sub>ç</sub>1, H<sub>ç</sub>2 ve H<sub>ç</sub>3 durumları için altıdan fazla, H<sub>ç</sub>4, H<sub>ç</sub>5 ve H<sub>ç</sub>6 durumları için ise beş ve daha az mod elde edilmiştir. Genel olarak, Tip-1 kemer barajında rezervuar yüksekliği arttıkça elde edilen mod sayısı azalmaktadır. Burada, yüksekliğe bağlı su miktarının, baraj titreşimlerini sönümlediği ve toplanan sinyal kalitesini düşürdüğü; dolayısıyla yüksek frekanslı modların kaybolmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk dört doğal frekans ve sönüm oranı Tablo 41'de, rezervuar yüksekliğine bağlı olarak elde edilen ilk dört doğal frekansın ve sönüm oranının değişimini içeren grafik Şekil 81'de verilmektedir.

Tablo 41 ve Şekil 81a incelendiğinde, H<sub>ç</sub>0 durumu için elde edilen doğal frekansların H<sub>ç</sub>1 durumu için çok az arttığı görülmektedir. Buradan rezervuarda 10 cm su olması durumunda, Tip-1 kemer barajının rijitliğinin az da olsa arttığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, H<sub>ç</sub>0, H<sub>ç</sub>1, H<sub>ç</sub>2 ve H<sub>ç</sub>3 durumları için elde edilen doğal frekansların birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Diğer bir ifadeyle, Tip-1 kemer barajının rezervuar yüksekliğinin yarısına kadar su olması durumunda doğal frekansların pek değişmediği ve bu

yükseklikteki suyun davranışa pek etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum, Tip-1 kemer barajının dar-V tipi bir vadiye (Şekil 11) oturmasının sonucudur. Tip-1 kemer barajının H<sub>ç4</sub>, H<sub>ç5</sub> ve H<sub>ç6</sub> durumları için elde edilen doğal frekansların ilk dört duruma göre giderek azaldığı gözlenmiştir. Buradan, su yüksekliği arttıkça, sistemin toplam kütesinin arttığı ve buna bağlı olarak sistem kütle matrisinin Tip-1 kemer barajı davranışını belirlemede sistem rijitlik matrisine göre daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 41 ve Şekil 81a'dan genel bir ifadeyle, rezervuar yüksekliğinin yarısına kadar dolu olması Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını değiştirmede, rezervuar yarı yüksekliğinden sonra artan yükseklikler için ise Tip-1 kemer barajın doğal frekanslarında gözle görülür bir biçimde azalma olduğu sonucunu çıkartmak mümkündür. Şekil 81b incelendiğinde ilk dört moda karşılık gelen sönüm oranları H<sub>ç0</sub>, H<sub>ç1</sub>, H<sub>ç2</sub> ve H<sub>ç3</sub> durumları için %1.5-2.5 civarında, H<sub>ç4</sub>, H<sub>ç5</sub> ve H<sub>ç6</sub> durumları için ise %0.5-8.5 gibi daha değişken olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, Tip-1 kemer barajının taban seviyesinden yarı yüksekliğe kadar olan kısımda sönüm oranlarının pek değişmediği yarı yükseklikten krete kadar olan kısımda ise sönüm oranlarının karmaşık ve değişken bir hal aldığı anlaşılmaktadır.

Tablo 41 incelendiğinde, Tip-1 kemer barajının rezervuarında su olmaması ve rezervuarının tam dolu olması durumunda elde edilen doğal frekanslardaki değişim; 1. frekans için %21.1, 2. frekans için %24.0, 3. frekans için %30.0 ve 4. Frekans için %18.6 olmaktadır.



Şekil 81. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının SAB yöntemine göre elde edilen ilk dört a) doğal frekansın b) sönüm oranının değişimi



Tablo 41. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden SAB yöntemine göre elde edilen ilk dört doğal frekans ve sönüm oranı

Modlar (Hz)	Çevresel Titreşim Testleri													
	H <sub>ç0</sub>		H <sub>ç1</sub>		H <sub>ç2</sub>		H <sub>ç3</sub>		H <sub>ç4</sub>		H <sub>ç5</sub>		H <sub>ç6</sub>	
	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)	Frkns* (Hz)	SO* (%)
1	338.3	1.659	338.5	1.675	339.8	1.584	337.1	2.543	330.9	1.783	300.3	0.456	267.1	1.288
2	372.3	1.500	374.4	1.621	374.2	1.472	368.8	1.609	350.8	1.081	310.0	4.176	282.9	3.109
3	552.7	1.800	551.5	1.921	550.0	1.113	550.9	1.875	529.6	2.029	470.2	5.407	384.7	8.464
4	611.2	2.123	629.1	2.073	630.0	2.367	616.5	1.894	588.3	2.764	531.1	2.669	497.4	3.532

Frkns\*: Frekans      SO\*: Sönüm Oranı

GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen dinamik karakteristikler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, doğal frekansların ve mod şekillerinin hemen hemen örtüştüğü, sönüm oranları arasında ise farklılık olmasına karşın yine de uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Tip-1 kemer barajının GFOA ve SAB yöntemlerine göre H<sub>ç0</sub> durumunda elde edilen doğal frekansları, H<sub>ç6</sub> durumunda %19-30 civarında azalmıştır. Ayrıca her iki yönteme göre elde edilen sönüm oranları H<sub>ç0</sub> durumunda %1-2 civarında olurken, bu oran H<sub>ç6</sub> durumunda ise %1-8 civarında elde edilmiştir. Her iki yöntemden, rezervuar yüksekliği boyunca elde edilen modlara ait mod şekilleri hemen hemen birbirinin aynısı elde edilmiştir. Bu kısmı daha iyi ifade edebilmek için, Tip-1 kemer barajının H<sub>ç0</sub> ve H<sub>ç6</sub> durumları için GFOA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen ilk dört doğal frekans ve modlar arasındaki uyumu gösteren Modal Güvence Kriteri (MGK) değerleri Tablo 42’de verilmektedir. Tablo 42’de görüldüğü gibi iki yöntemden elde edilen doğal frekanslar arasındaki en büyük fark %1.4’tür. Ayrıca, ilk üç mod şekli için MGK değeri 1’dir. Buradan GFOA ve SAB yöntemlerinden elde edilen modların birbirine çok benzediği anlaşılmaktadır.

Diğer taraftan, her bir rezervuar yüksekliği durumunda GFOA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen 2. modlar arasındaki uyumu gösteren MGK değerleri Tablo 43’te verilmektedir. Tablo 43’te görüldüğü gibi MGK değerleri farklı rezervuar yüksekliği durumları için 1’e yakın elde edilmiştir. Buradan, Hem GFOA hem de SAB yöntemlerinden farklı rezervuar yüksekliği durumları için elde edilen 2. mod şeklinin neredeyse hiç değişmediği anlaşılmaktadır.

Tablo 42. GFOA ve SAB yöntemine göre elde edilen modların karşılaştırılması

Mod	Boş Rezervuar-H <sub>ç0</sub>				Dolu Rezervuar-H <sub>ç6</sub>			
	GFOA (Hz)	SAB (Hz)	Fark(%)	MGK	GFOA (Hz)	SAB (Hz)	Fark(%)	MGK
1	339.2	338.3	0.3	0.997	268.8	267.1	0.4	0.990
2	372.6	372.3	0.1	1.000	286.4	282.9	1.2	0.997
3	552.3	552.7	0.1	0.998	390.3	384.7	1.4	0.990
4	619.8	611.2	1.4	0.895	498.5	497.4	0.2	0.833

Tablo 43. GFOA ve SAB yöntemine göre elde edilen 2. modun MGK değerleri

Mod	GFOA Yöntemi-MGK							SAB Yöntemi-MGK						
	H <sub>ç0</sub>	H <sub>ç1</sub>	H <sub>ç2</sub>	H <sub>ç3</sub>	H <sub>ç4</sub>	H <sub>ç5</sub>	H <sub>ç6</sub>	H <sub>ç0</sub>	H <sub>ç1</sub>	H <sub>ç2</sub>	H <sub>ç3</sub>	H <sub>ç4</sub>	H <sub>ç5</sub>	H <sub>ç6</sub>
2														
H <sub>ç0</sub>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	0.91	0.87
H <sub>ç1</sub>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	0.90	0.90
H <sub>ç2</sub>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	0.88	0.92	0.83
H <sub>ç3</sub>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.84	0.87
H <sub>ç4</sub>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	0.97	0.92	0.97	0.88	0.99	1.00	0.98	0.95
H <sub>ç5</sub>	0.96	0.94	0.95	0.94	0.96	1.00	0.93	0.91	0.90	0.92	0.84	0.98	1.00	0.94
H <sub>ç6</sub>	0.96	0.96	0.97	0.97	0.97	0.93	1.00	0.87	0.90	0.83	0.87	0.95	0.94	1.00

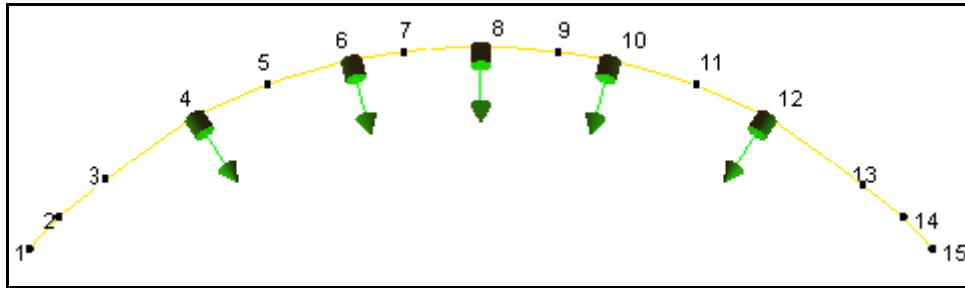
### 2.2.5.3. Zorlanmış Titreşim Yöntemiyle (ZTY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

60 cm yüksekliğe sahip Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını belirlemek için rezervuarın boş olması ve rezervuarda sırasıyla 10, 20, 30, 40, 50, 60 cm yüksekliğinde su bulunması durumları için baraşa zorlanmış titreşim testleri uygulanmıştır. Her bir rezervuar yüksekliği durumunda uygulanan zorlanmış titreşim testini belirtmek için aşağıdaki kısaltmalar kullanılmaktadır:

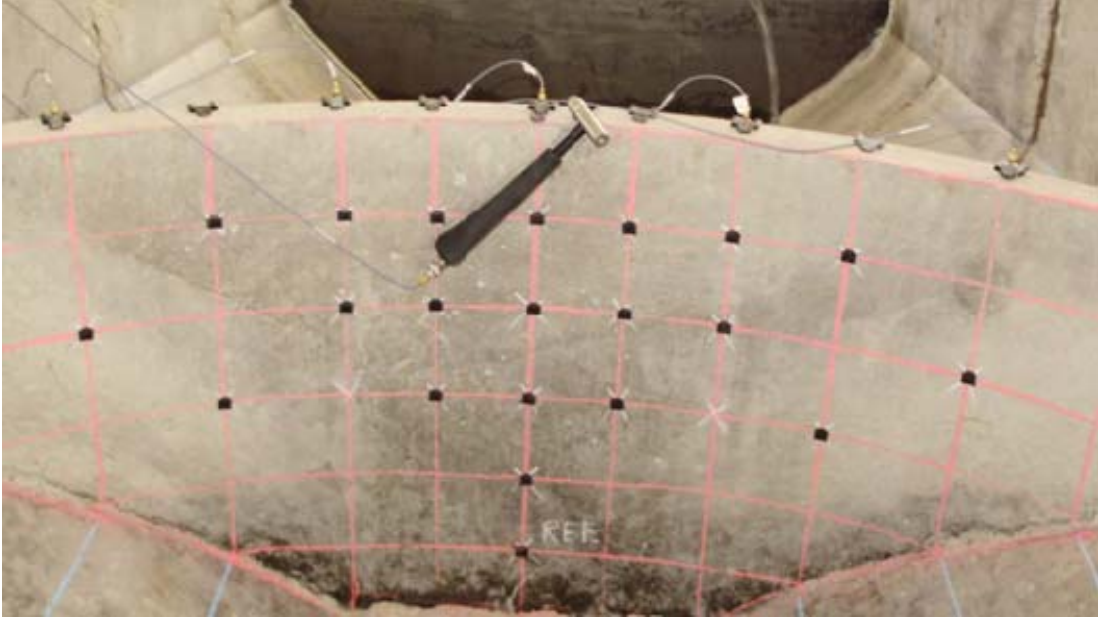
- H<sub>z0</sub>: Rezervuarın boş olması durumu için uygulanan zorlanmış titreşim testi,
- H<sub>z1</sub>: Rezervuarda 10 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan zorlanmış titreşim testi,
- H<sub>z2</sub>: Rezervuarda 20 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan zorlanmış titreşim testi,
- H<sub>z3</sub>: Rezervuarda 30 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan zorlanmış titreşim testi,
- H<sub>z4</sub>: Rezervuarda 40 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan zorlanmış titreşim testi,
- H<sub>z5</sub>: Rezervuarda 50 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan zorlanmış titreşim testi,
- H<sub>z6</sub>: Rezervuarda 60 cm su yüksekliği bulunması durumu için uygulanan zorlanmış titreşim testi.

Tip-1 kemer barajının zorlanmış titreşim testlerinde kullanılan deneysel ölçüm sistemi Bölüm 1.7'deki anlatıma uygun olarak seçilmiştir. Buna göre, B&K 3560 tipi 17

kanallı veri toplama ünitesi ve B&K 4507-B005 tipi tek eksenli ivmeölçerler ve PULSE (2006) yazılımı Zorlanmış Titreşim Yöntemi'nde kullanılmıştır. Tip-1 kemer barajını değeri ölçülebilen bir etki ile titreştirmek için B&K 8206 tipi darbe çekici kullanılmıştır. Tip-1 kemer barajında, farklı rezervuar yüksekliği durumları için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testlerinde barajdan gelen titreşim sinyallerini toplamak için 5 adet ivmeölçer baraj kretine, kret eksenine normal doğrultuda yerleştirilmiştir (Şekil 82). Her bir zorlanmış titreşim testinde ölçülmesi planlanan frekans aralığı analitik modellerden elde edilen doğal frekanslara göre 0-1600 Hz arası seçilmiş ve her test için darbe çekiciyle ortalama 5 darbe yapılarak sinyaller toplanmıştır. Testlerde, ivmeölçerlerle veri toplama ünitesi arasındaki sinyal transferi tek eksenli sinyal kabloları ile sağlanmıştır. Veri toplama ünitesine alınan ham sinyalleri dijital ortama göndermek için veri toplama ünitesi ile bilgisayar arasında ara kablo kullanılmış ve PULSE (2006) yazılımı ile ham sinyaller işlenebilir hale getirilmiştir. Zorlanmış titreşim testlerinde toplanan sinyalleri işleyebilecek bir paket program ölçüm sistemine dâhil edilmediğinden, Tip-1 kemer barajının dinamik karakteristikleri belirlenememiştir. Bunun yerine barajın doğal frekanslarını içeren Frekans Davranış Fonksiyonları (FDF) PULSE (2006) yazılımından elde edilmiştir. Her bir rezervuar yüksekliği durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testleri sırasında çekilen fotoğraflar Şekil 83-89'da verilmektedir.



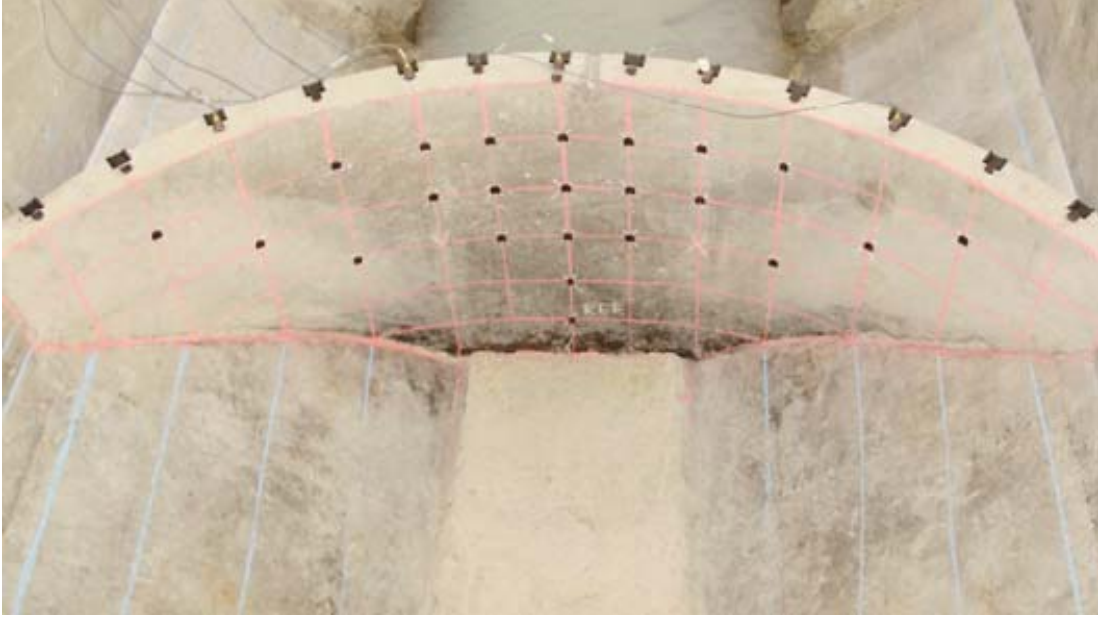
Şekil 82. Tip-1 kemer barajının zorlanmış titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı



Şekil 83. Tip-1 kemer barajında  $H_z0$  durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi



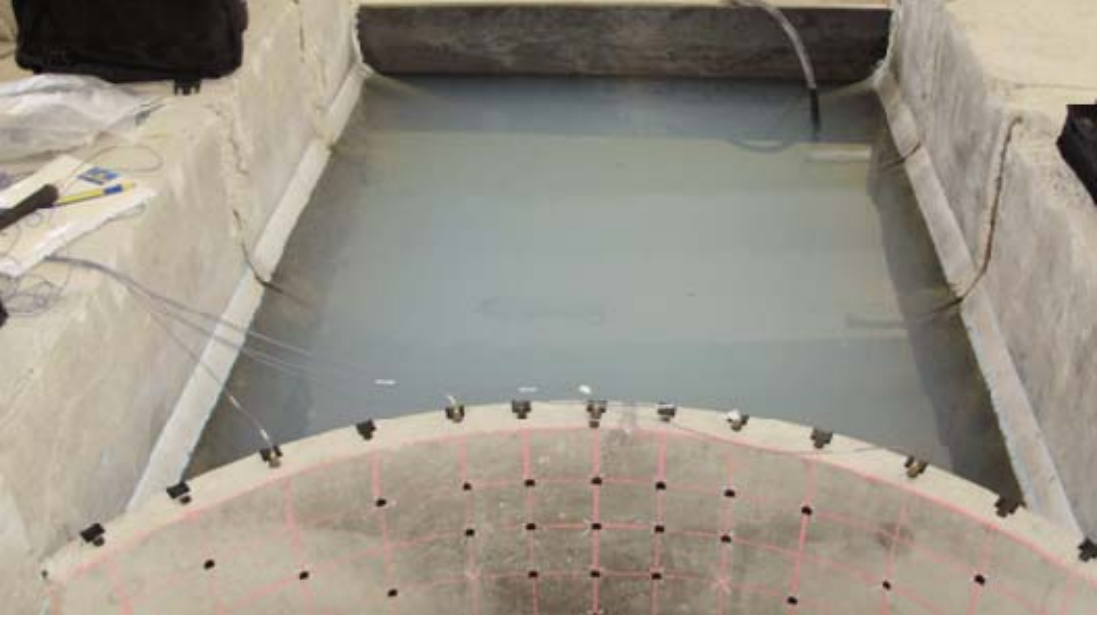
Şekil 84. Tip-1 kemer barajında  $H_z1$  durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi



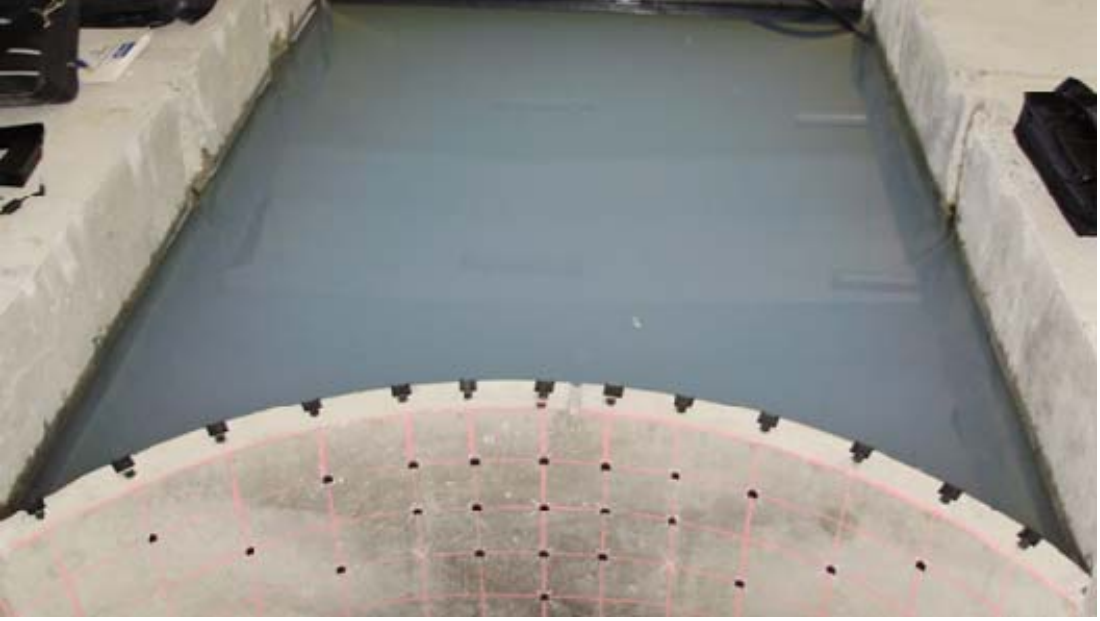
Şekil 85. Tip-1 kemer barajında  $H_2$  durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi



Şekil 86. Tip-1 kemer barajında  $H_3$  durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi



Şekil 87. Tip-1 kemer barajında  $H_{z4}$  durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi



Şekil 88. Tip-1 kemer barajında  $H_{z5}$  durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi

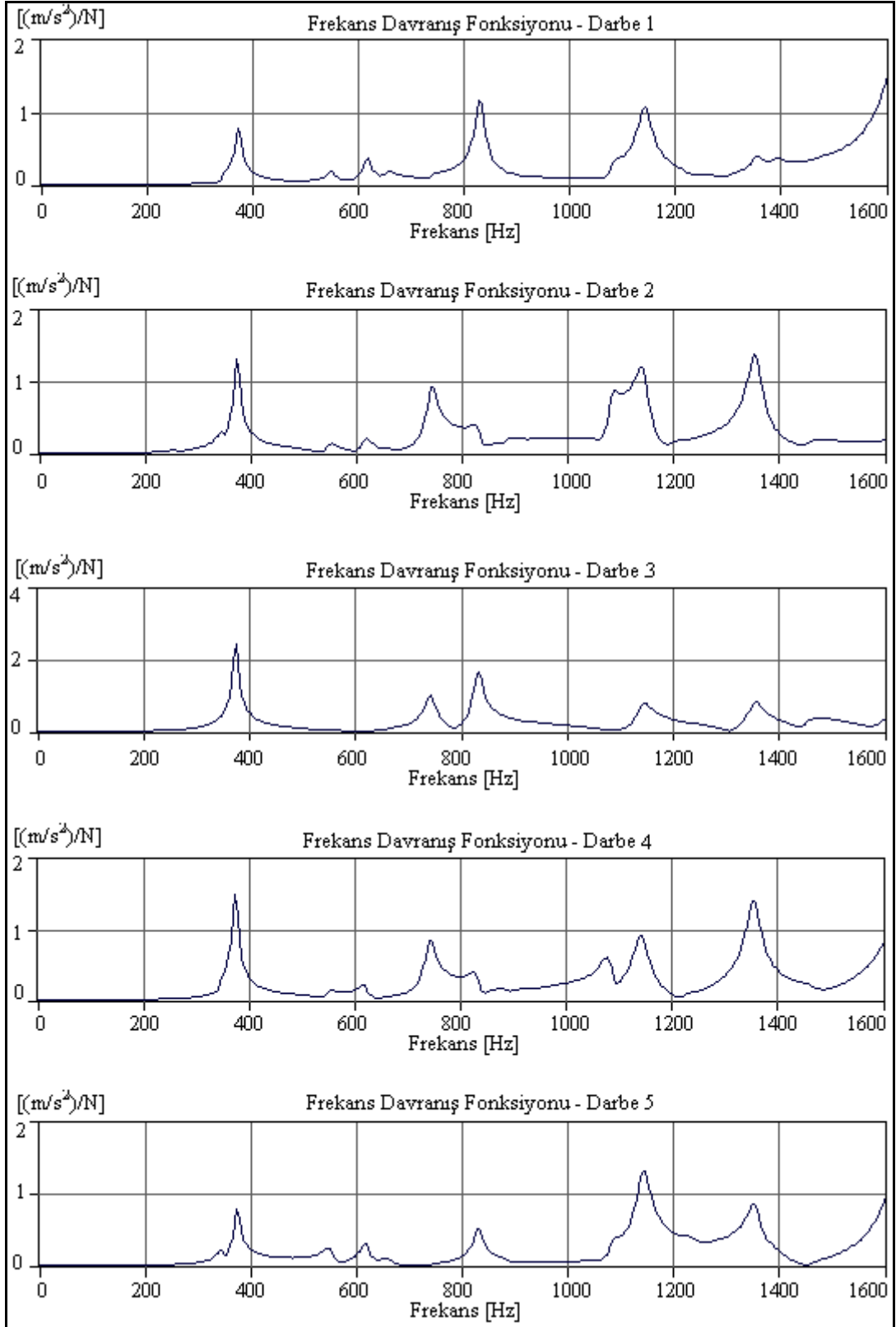




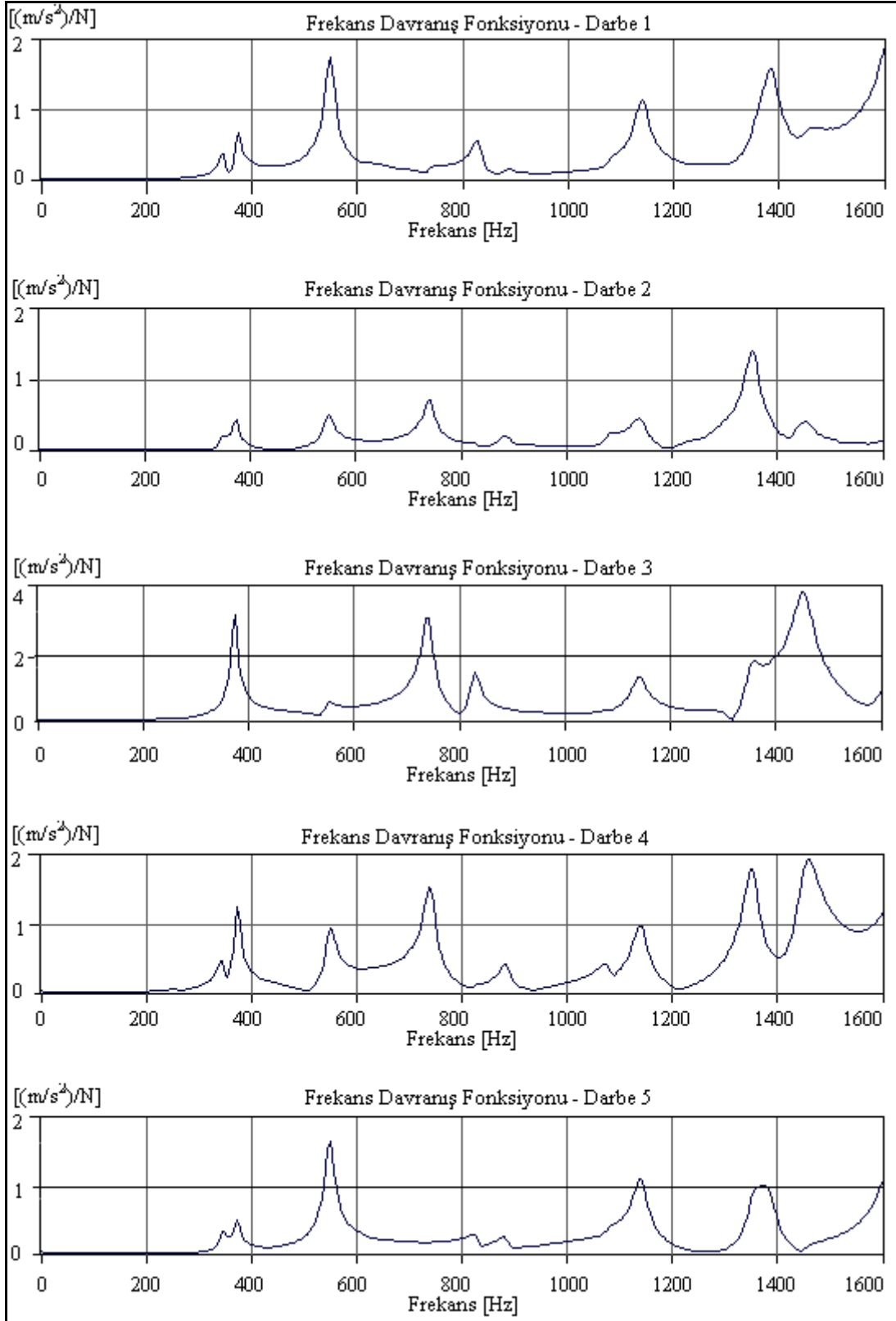
Şekil 89. Tip-1 kemer barajında  $H_z6$  durumu için gerçekleştirilen zorlanmış titreşim testi

$H_z0$ ,  $H_z1$ ,  $H_z2$ ,  $H_z3$ ,  $H_z4$ ,  $H_z5$ ,  $H_z6$  durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan zorlanmış testlerinden elde edilen Frekans Davranış Fonksiyonları (FDF) Şekil 90-96'da verilmektedir. Şekil 90-96 ayrı ayrı incelendiğinde, her bir darbe için elde edilen FDF benzerlik göstermektedir. FDF'lerde görünen pikler, doğal frekanslara karşılık gelmektedir.

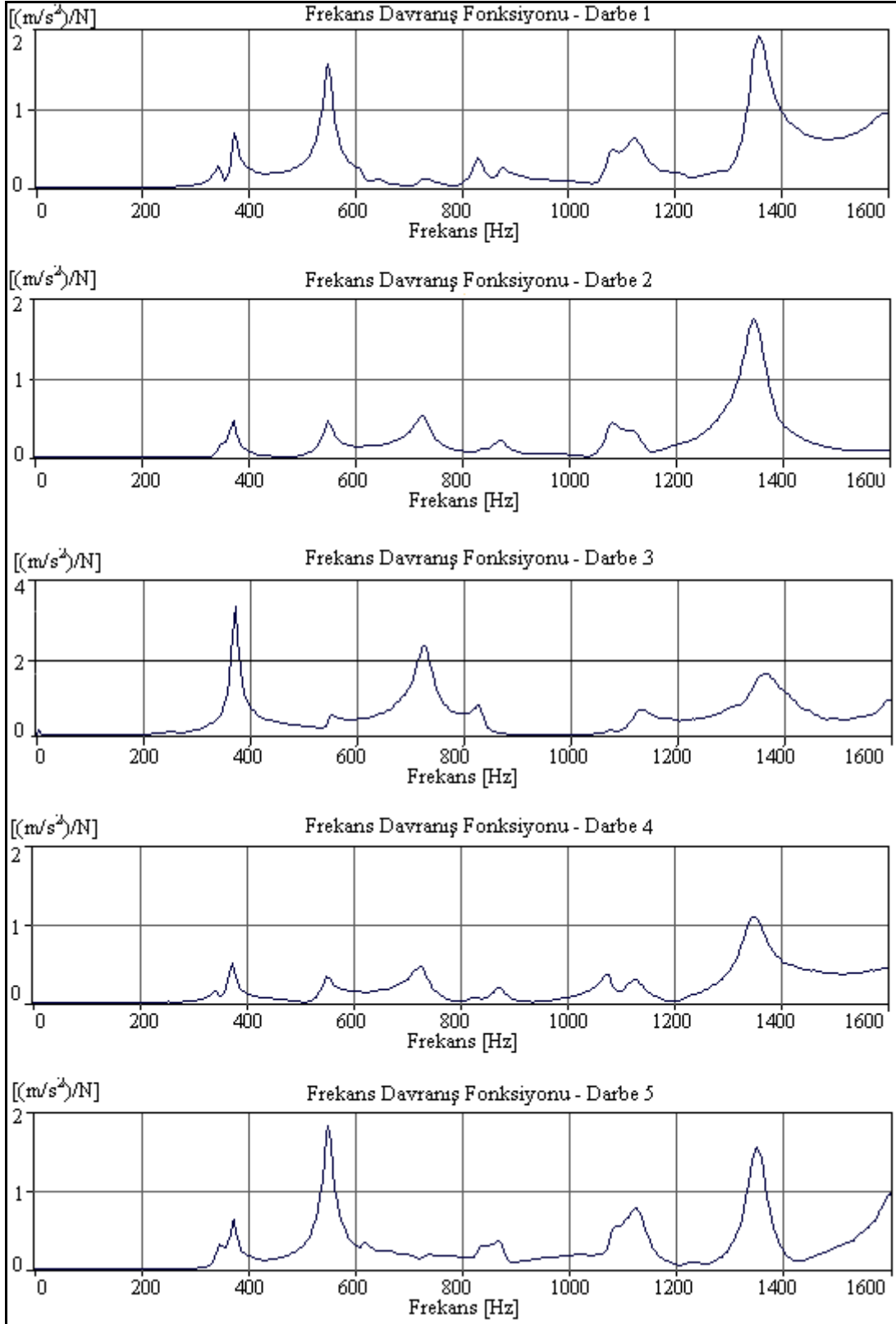




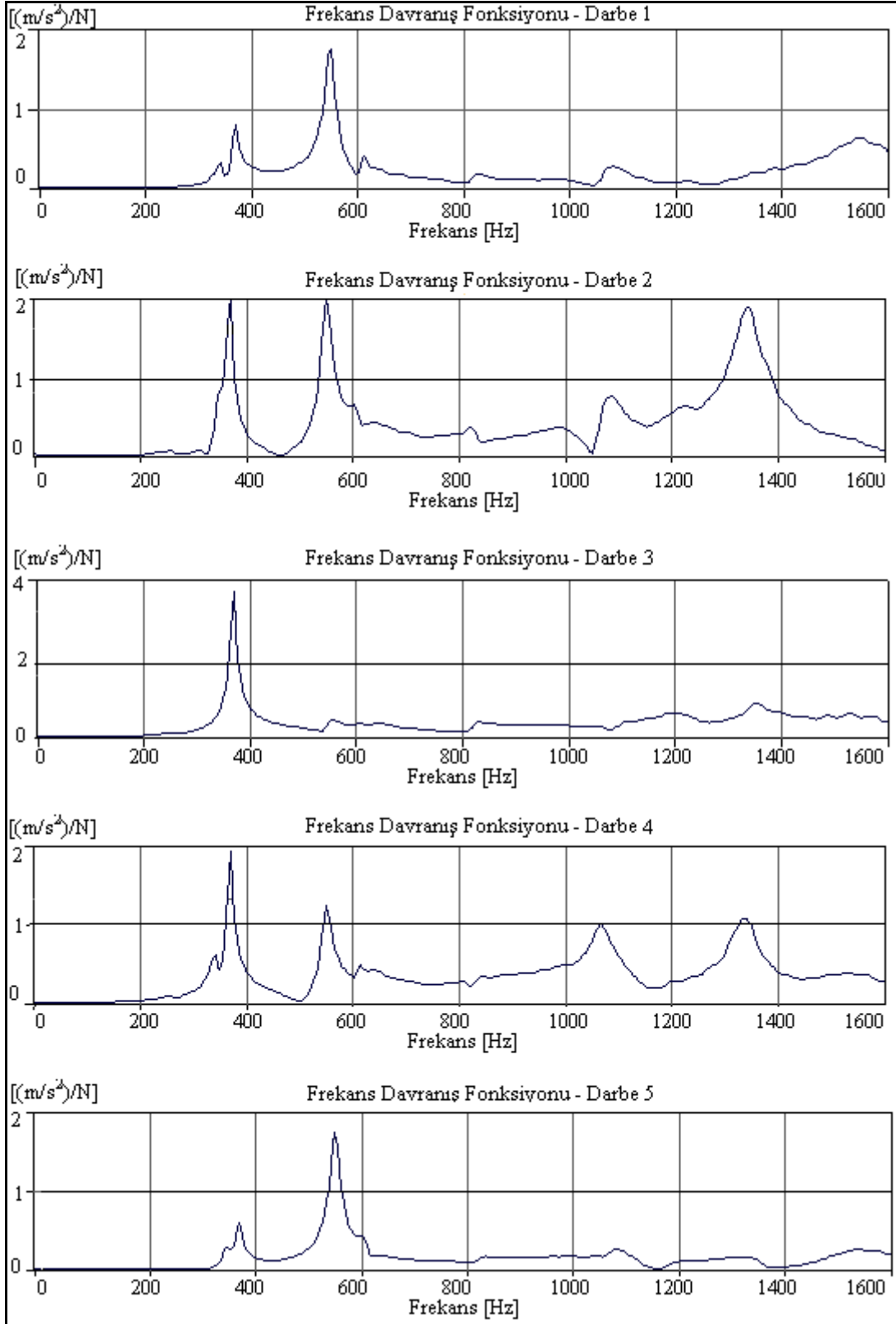
Şekil 90. H<sub>2</sub>O durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları



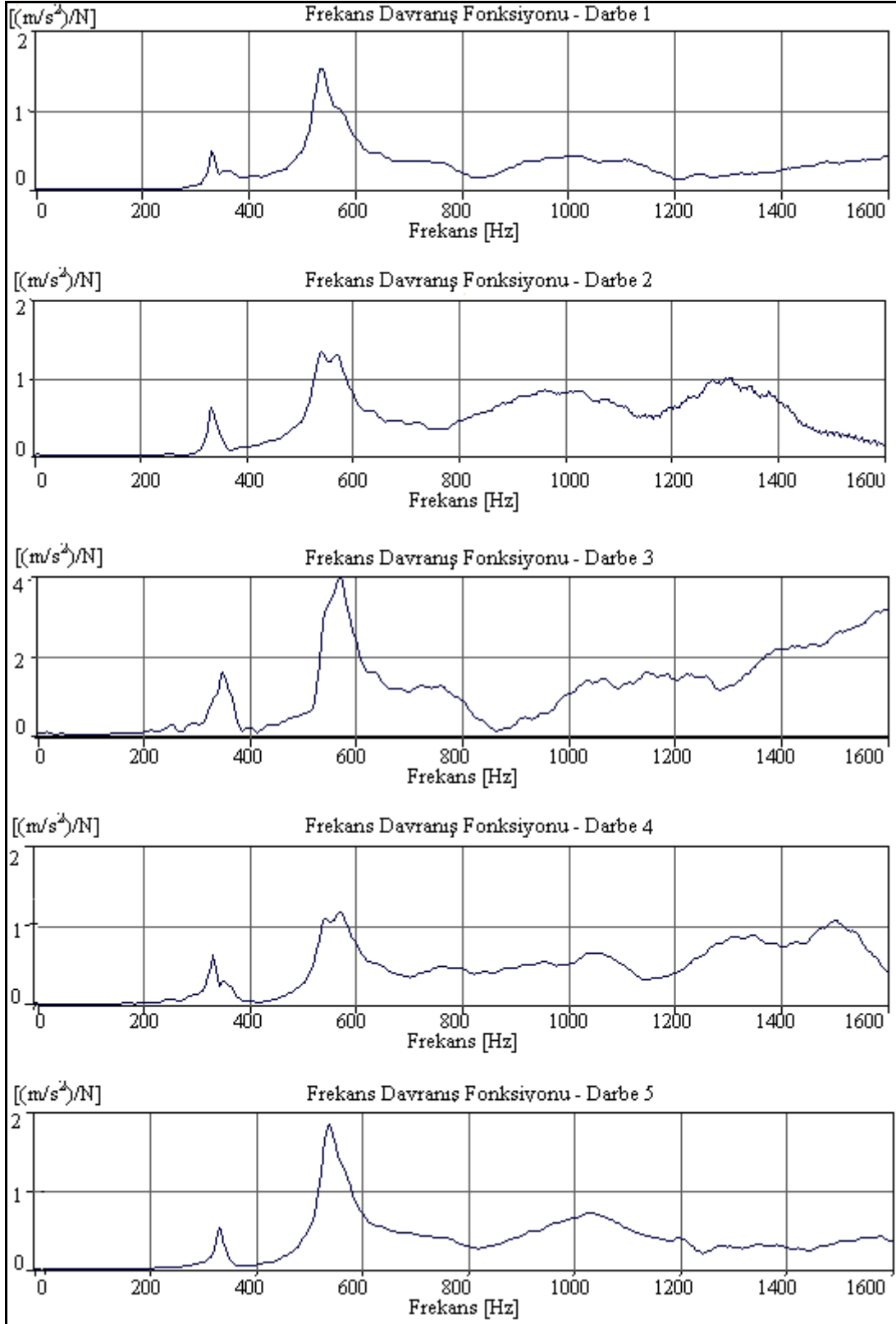
Şekil 91.  $H_{21}$  durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları



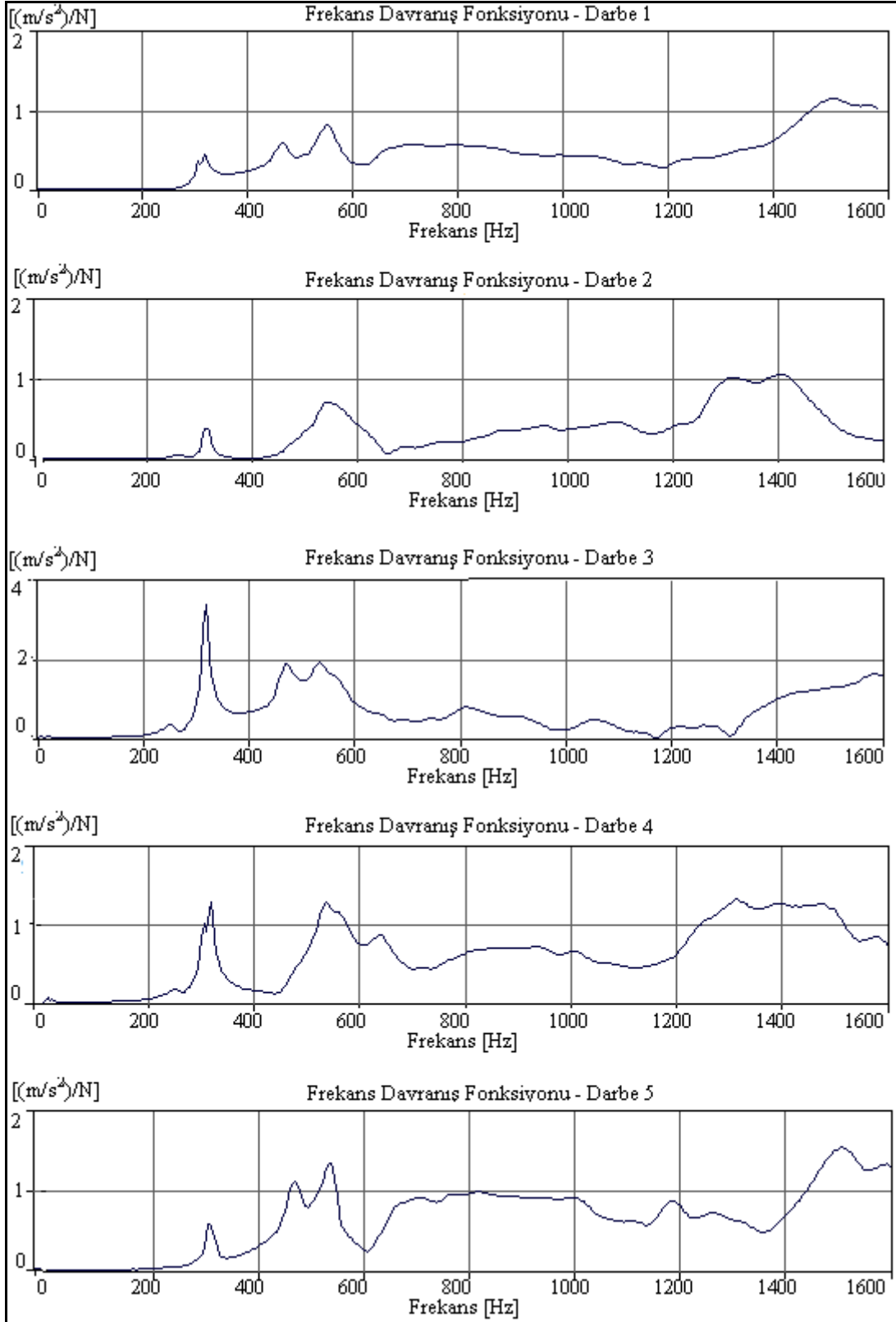
Şekil 92.  $H_z2$  durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları



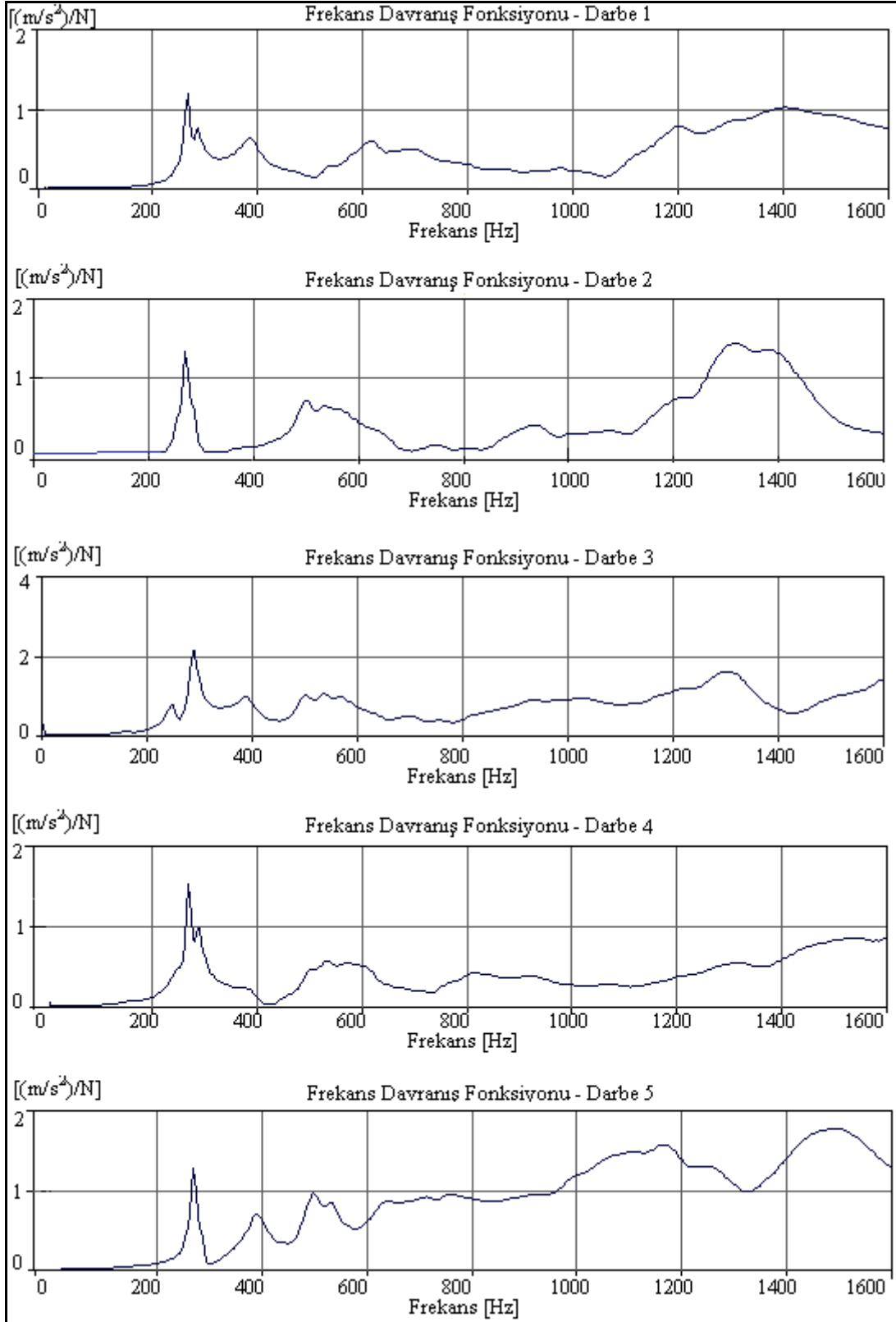
Şekil 93. H<sub>2</sub>3 durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları



Şekil 94.  $H_24$  durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları



Şekil 95. H<sub>2</sub>5 durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları



Şekil 96. H<sub>2</sub>6 durumu için Tip-1 kemer barajının frekans davranış fonksiyonları

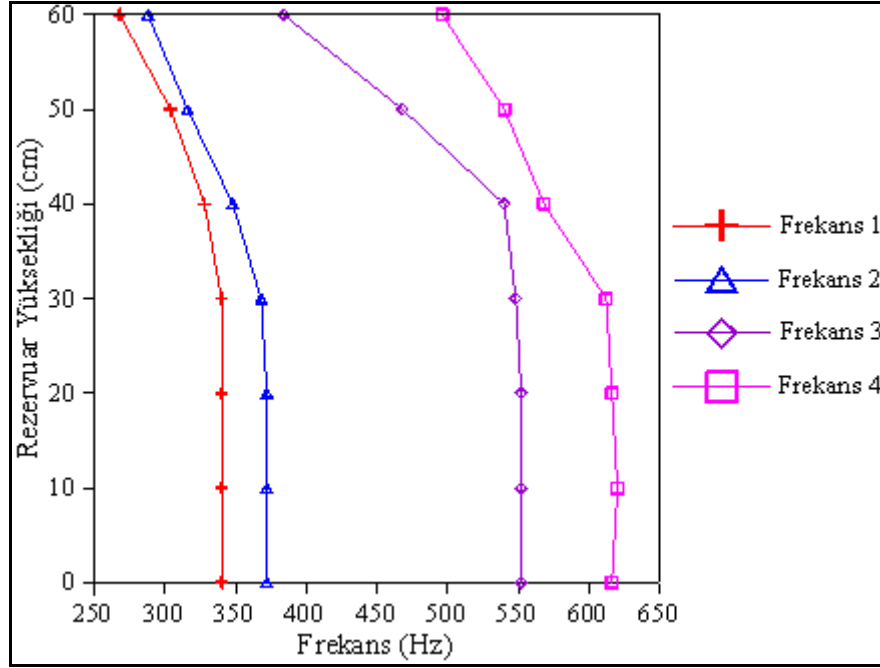
Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan zorlanmış titreşim testlerinden her bir darbe için elde edilen frekans davranış fonksiyonlarından yararlanılarak belirlenen doğal frekanslar Tablo 44'te verilmektedir. Tablo 44'te görüldüğü gibi Tip-1 kemer barajının;  $H_{z0}$ ,  $H_{z1}$ , ve  $H_{z2}$  durumları için altışar doğal frekansı,  $H_{z3}$ ,  $H_{z4}$  ve  $H_{z5}$  durumları için beşer doğal frekansı ve  $H_{z6}$  durumu için ise dört doğal frekansı elde edilebilmiştir. Buradan, barajdaki su seviyesi arttıkça barajda oluşan titreşimlerin sönümlendiği, dolayısıyla yüksek modların etkisini kaybettiği anlaşılmaktadır. Tablo 44 incelendiğinde, Tip-1 kemer barajının rezervuarında su olmaması ve rezervuarının tam dolu olması durumunda elde edilen doğal frekanslardaki değişim; 1. frekans için %21.2, 2. frekans için %22.6, 3. frekans için %30.4 ve 4. frekans için %19.5 olmaktadır.

Rezervuar yüksekliğine bağlı olarak elde edilen ilk dört doğal frekansın değişimini içeren grafik Şekil 97'de verilmektedir. Şekil 97 incelendiğinde, baraj yüksekliğinin yarsına kadar, rezervuar suyunun baraj davranışı üzerinde fazla etkisi olmadığı; barajın yarı yüksekliğinden sonra ise barajın doğal frekanslarında önemli bir azalma olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 44. Farklı rezervuar yükseklikleri için Tip-1 kemer barajına uygulanan zorlanmış titreşim testlerinden elde edilen doğal frekanslar

Frekans (Hz)	Zorlanmış Titreşim Testleri						
	$H_{z0}$	$H_{z1}$	$H_{z2}$	$H_{z3}$	$H_{z4}$	$H_{z5}$	$H_{z6}$
1	340	340	340	340	328	304	268
2	372	372	372	368	348	316	288
3	552	552	552	548	540	468	384
4	616	620	616	612	568	540	496
5	740	736	724	-	-	-	-
6	828	828	828	828	800	772	-

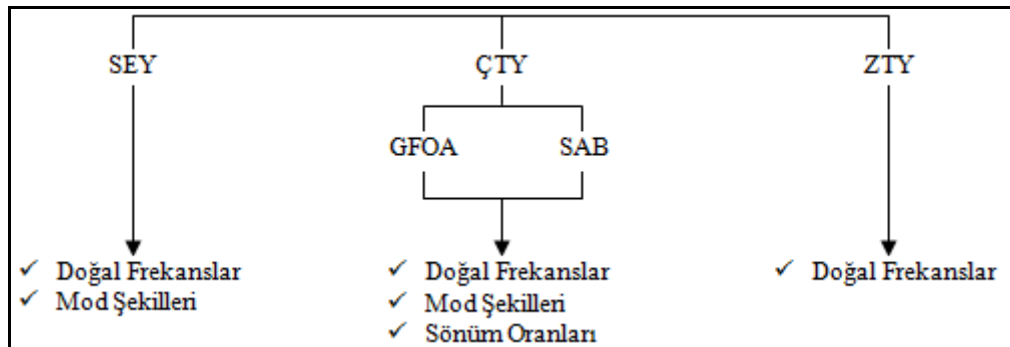




Şekil 97. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan zorlanmış titreşim testlerinden elde edilen ilk dört doğal frekansın değişimi

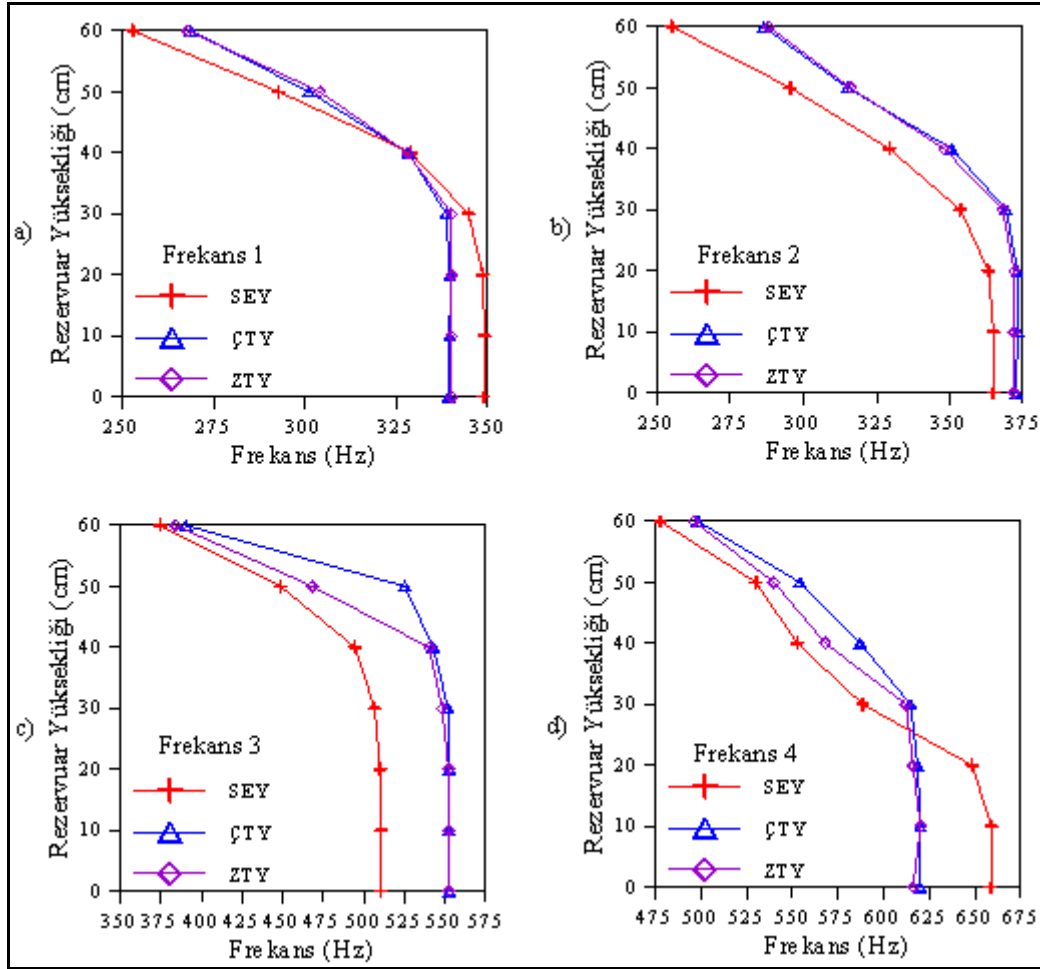
#### 2.2.5.4. Tip-1 Kemer Barajının Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

Tip-1 kemer barajının rezervuar yüksekliğine bağlı olarak gerçekleştirilen, sonlu eleman, çevresel titreşim ve zorlanmış titreşim yöntemlerinden elde edilen dinamik karakteristiklere ait akış şeması Şekil 98’de verilmektedir. Şekil 98’de görüldüğü gibi, doğal frekansları, mod şekillerini ve sönüm oranları içeren dinamik karakteristikler sadece GFOA ve SAB yöntemlerini içeren ÇTY’de elde edilmiştir.



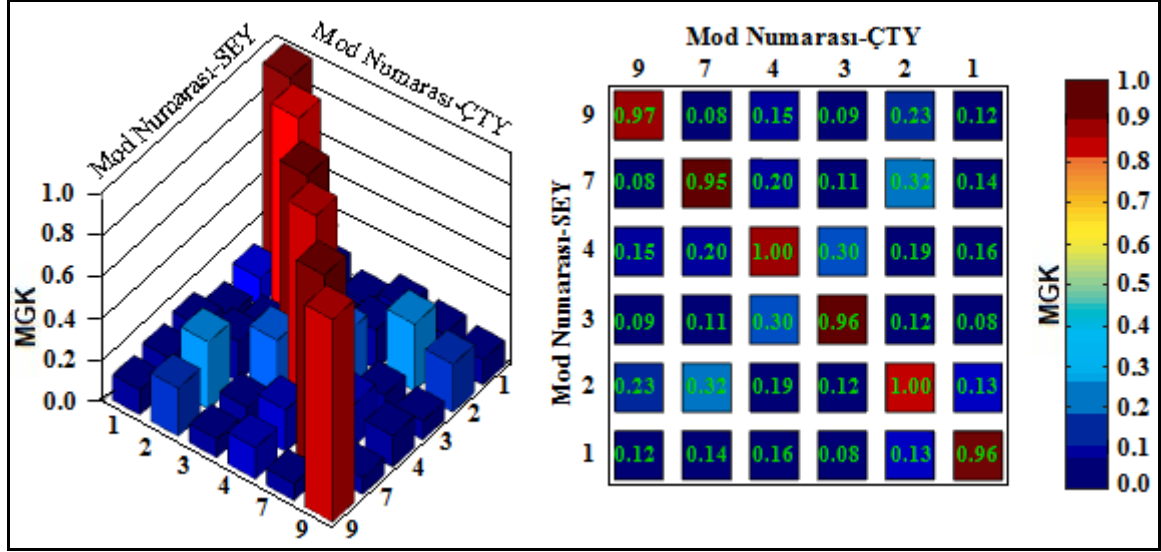
Şekil 98. Tip-1 kemer barajının SEY, ÇTY ve ZTY’den elde edilen dinamik karakteristiklere ait akış şeması

SEY, ÇTY-GFOA ve ZTY'den rezervuar yüksekliği boyunca elde edilen doğal frekanslar Tablo 45'te, doğal frekansların değişimi ise Şekil 99'da verilmektedir. Tablo 45 ve Şekil 99'da görüldüğü gibi her üç yönteme göre elde edilen doğal frekansların birbiriyle uyumlu olduğu ve rezervuar yüksekliğine bağlı olarak azaldığı sonucunu çıkartmak mümkündür.

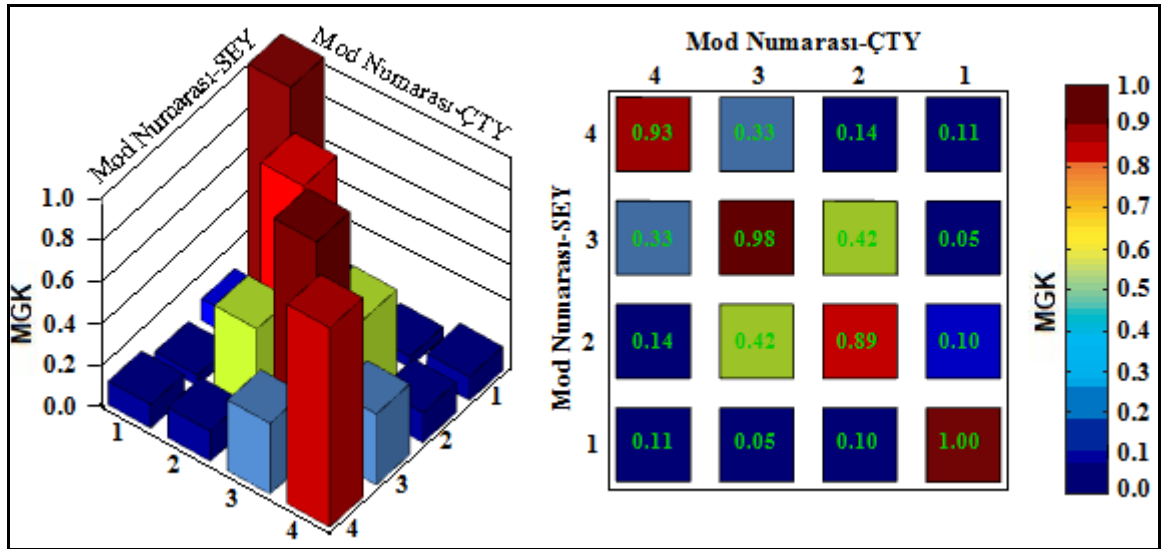


Şekil 99. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının SEY, ÇTY-GFOA ve ZTY'e göre elde edilen a) 1. Frekansın, b) 2. Frekansın, c) 3. Frekansın ve d) 4. Frekansın değişimi

SEY ve ÇTY'den rezervuarın boş (H0) ve rezervuarın tam dolu (H6) durumları için elde edilen mod şekilleri arasındaki uyumu gösteren MGK grafikleri sırasıyla Şekil 100 ve Şekil 101'de verilmektedir. Şekil 100 ve 101'de görüldüğü gibi, analitik ve deneysel modlar birbiriyle uyum içerisindedir.



Şekil 100. H0 durumu için SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği



Şekil 101. H6 durumu için SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği

Tablo 45. Farklı rezervuar yüksekliği durumları için Tip-1 kemer barajının SEY, ÇTY-GFOA ve ZTY'e göre elde edilen doğal frekanslar

Mod	H0			H1			H2			H3			H4			H5			H6		
	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY	SEY	ÇTY	ZTY
1	348	339	340	349	339	340	348	339	340	344	338	340	328	328	328	292	301	304	252	268	268
2	364	372	372	364	373	372	363	373	372	353	369	368	329	350	348	295	315	316	254	286	288
3	510	552	552	510	552	552	509	552	552	506	551	548	494	542	540	448	525	468	374	390	384
4	658	619	616	658	619	620	648	618	616	588	614	612	552	587	568	530	554	540	477	498	496
5	680	-	-	678	-	-	656	-	-	638	-	-	604	-	-	561	-	-	486	-	-
6	701	-	-	702	-	-	683	-	-	664	-	-	638	-	-	616	-	-	524	-	-
7	740	741	740	741	743	736	728	725	724	703	-	-	674	-	-	649	-	-	598	-	-
8	793	-	-	794	-	-	794	-	-	778	-	-	741	-	-	701	-	-	663	-	-
9	836	839	828	837	839	828	836	838	828	827	830	828	800	799	800	762	770	772	723	-	-

### 2.2.6. Rezervuar Uzunluğu Değişiminin Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristikleri Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi

Tez çalışmasının bu kısmında, Tip-1 kemer barajının rezervuarındaki su uzunluğunun barajın dinamik karakteristikleri üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalar detaylıca anlatılmaktadır.

#### 2.2.6.1. Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

60 cm yüksekliğe sahip Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için rezervuarın boş olması, rezervuarın tam dolu ve sırasıyla 60, 120 ve 180 cm uzunluğuna sahip olması durumları için barajın sonlu eleman modelleri ANSYS (2008) yazılımıyla oluşturulmuştur. Her bir rezervuar uzunluğu durumunda oluşturulan sonlu eleman modelini belirtmek için aşağıdaki kısaltmalar kullanılmaktadır:

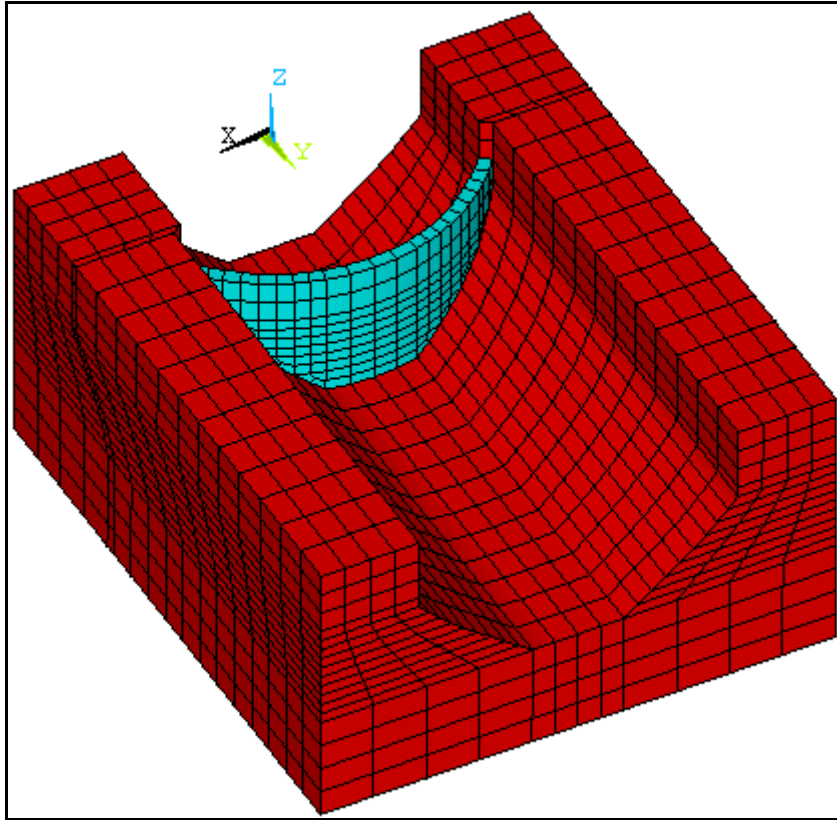
- $L_a0$ : Rezervuarın boş olması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $L_aH$ : Rezervuarda 60 cm su uzunluğu bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $L_a2H$ : Rezervuarda 120 cm su uzunluğu bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli,
- $L_a3H$ : Rezervuarda 180 cm su uzunluğu bulunması durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli.

Her bir su uzunluğu durumuna ait sonlu eleman modeli Bölüm 2.2.5.1.'deki anlatıma uygun olarak oluşturulmuştur. Diğer bir ifadeyle, baraj-rezervuar-temel etkileşimi Lagrange yaklaşımına göre temsil edilmiş, üç boyutlu modellemelerde katı elemanlar için SOLID 45, sıvı elemanlar için ise FLUID80 kullanılmıştır (ANSYS, 2008). Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar uzunlukları için oluşturulan her bir sonlu eleman modelinde kullanılan eleman tipleri ve sayıları Tablo 46'da verilmektedir. Tablo 46'da görüldüğü gibi, Tip-1 kemer barajı; rezervuarın boş olması durumunda toplam 2732 sonlu eleman, rezervuarın tam dolu ve 3H uzunluğuna sahip olması durumunda ise toplam 4508 sonlu eleman kullanılarak temsil edilmektedir. Tip-1 kemer barajının;  $L_a0$ ,  $H_a1$ ,  $L_aH$ ,  $L_a2H$  ve  $L_a3H$  durumları için oluşturulan sonlu eleman modelleri sırasıyla Şekil 102-105'te

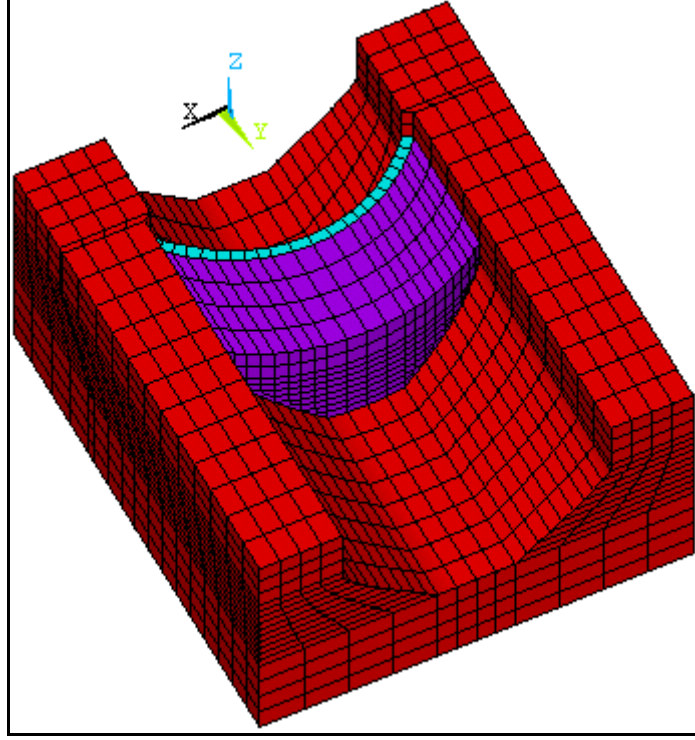
verilmektedir. Her bir modelin sonlu eleman analizinde kullanılan malzeme özellikleri Bölüm 2.2.5.1.'de verilen Tablo 17'deki gibi dikkate alınmıştır.

Tablo 46. Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar uzunluğu için oluşturulan sonlu eleman modellerine ait eleman tipleri ve sayıları

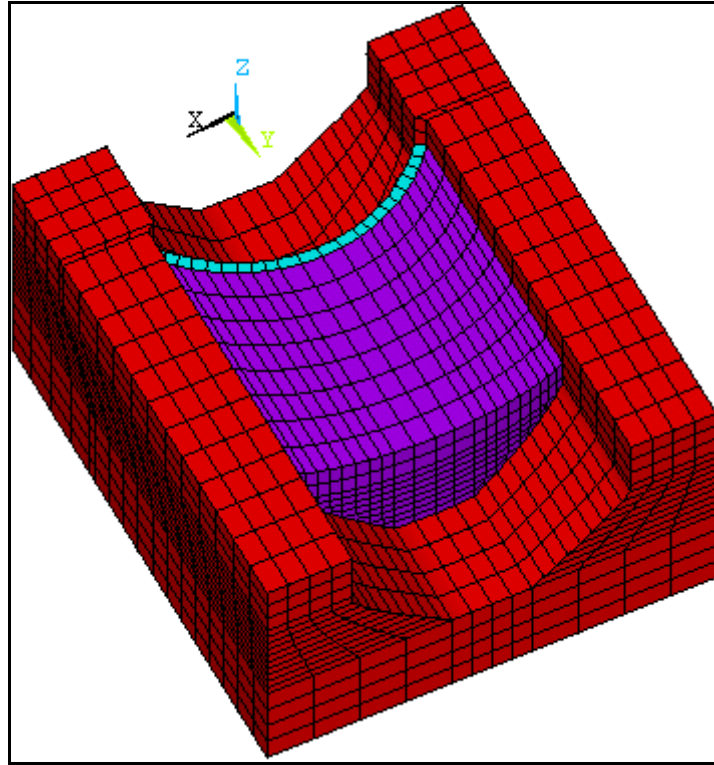
ANSYS Eleman Tipi	Sonlu Eleman Modeli	Eleman Sayısı			
		$L_a0$	$L_aH$	$L_a2H$	$L_a3H$
SOLID45	Kemer	148	148	148	148
FLUID80	Rezervuar	-	592	1184	1776
SOLID45	Temel	2584	2584	2584	2584
Toplam		2732	3324	3916	4508



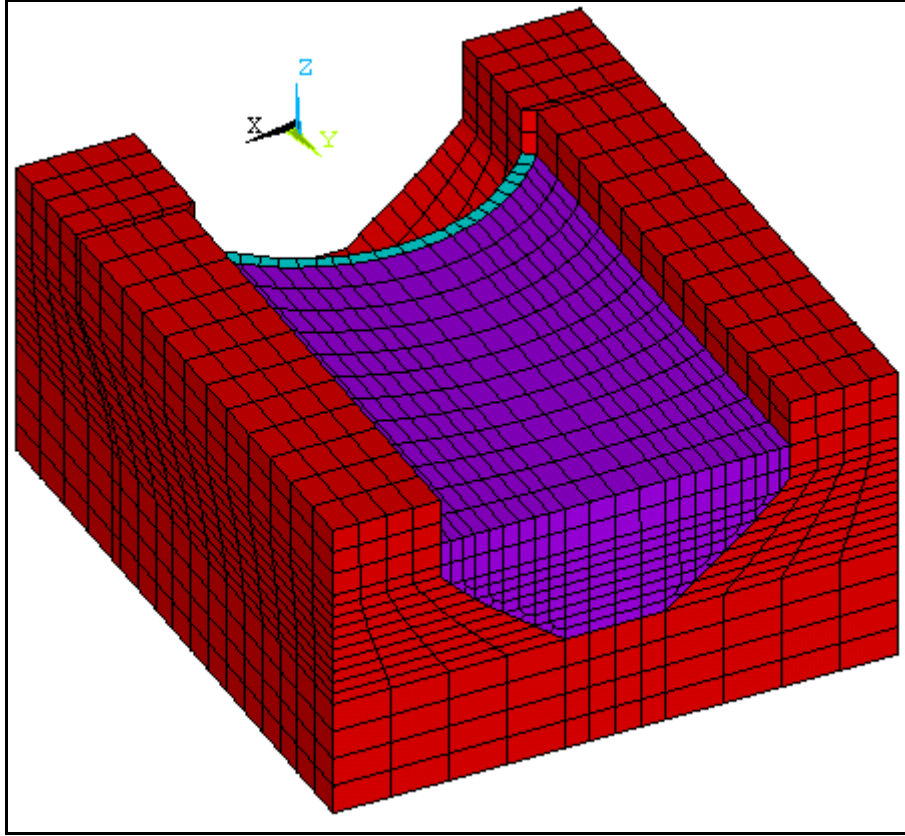
Şekil 102. Tip-1 kemer barajının  $L_a0$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 103. Tip-1 kemer barajının  $L_aH$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 104. Tip-1 kemer barajının  $L_2H$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli



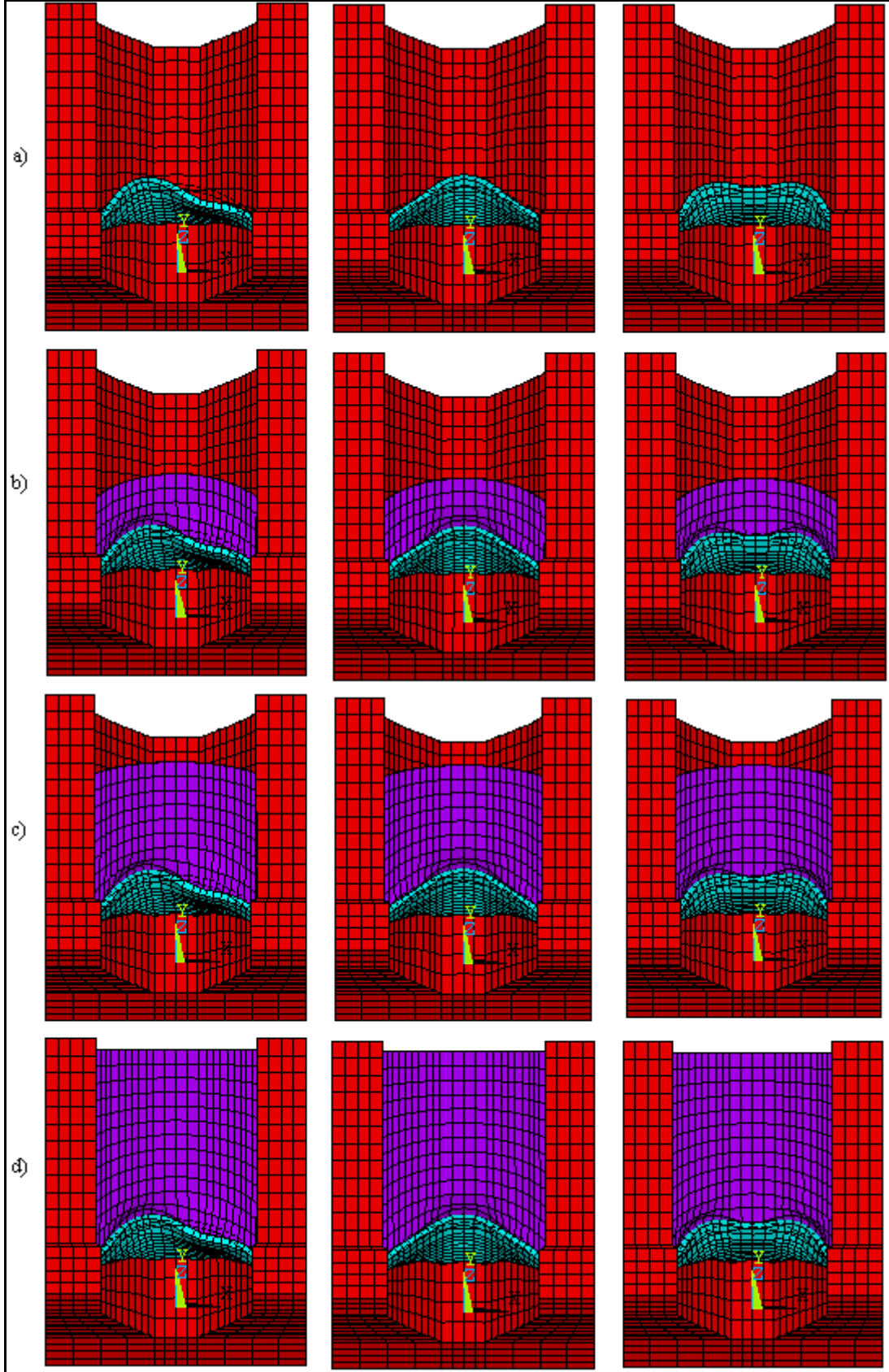
Şekil 105. Tip-1 kemer barajının  $L_{a3H}$  durumuna ait üç boyutlu sonlu eleman modeli

Tip-1 kemer barajının  $L_{a0}$ ,  $L_{aH}$ ,  $L_{a2H}$  ve  $L_{a3H}$  durumları için gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 106’da verilmektedir. Şekil 106 incelendiğinde her bir durum için elde edilen mod şekillerinin sırasıyla anti-simetrik, simetrik ve simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir. Buradan rezervuar uzunluğunun, barajın salınım hareketinde bir değişime neden olmadığı anlaşılmaktadır.

Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar uzunluğuna sahip sonlu eleman modelleri için gerçekleştirilen modal analizlerinden elde edilen doğal frekanslar Tablo 47’de verilmektedir. Tablo 47 incelendiğinde, Tip-1 kemer barajının rezervuarında su olmaması ve rezervuarda 180 cm (3H) su uzunluğu olması durumunda elde edilen doğal frekanslardaki değişim; 1. frekans için %27.5, 2. frekans için %30.1, 3. frekans için %26.6 olmaktadır.

Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar uzunluğu durumları için elde edilen doğal frekanslarının değişimi Şekil 107’de verilmektedir. Şekil 107’de görüldüğü gibi, rezervuar uzunluğu arttıkça doğal frekanslar azalmaktadır. Azalış miktarı  $L_{a0}$  durumundan  $L_{aH}$  durumuna geçişte fazlayken,  $L_{aH}$  durumundan  $L_{a2H}$  ve  $L_{a3H}$  durumuna geçişte daha azdır.

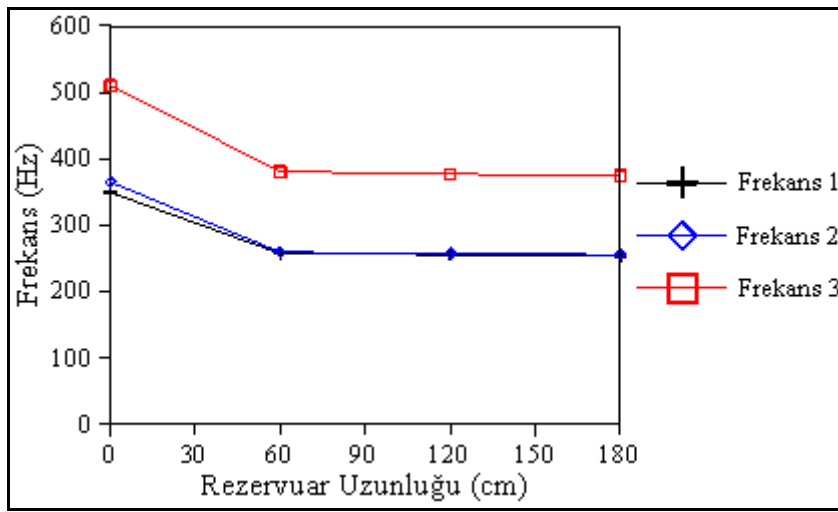




Şekil 106. Tip-1 kemer barajının a)  $L_a0$ , b)  $L_aH$ , c)  $L_a2H$  ve d)  $L_a3H$  durumları için elde edilen mod şekilleri

Tablo 47. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinden elde edilen doğal frekanslar

Frekans (Hz)	Sonlu Eleman Modelleri			
	$L_a0$	$L_aH$	$L_a2H$	$L_a3H$
1	348.87	256.8	254.9	252.85
2	364.82	258.8	256.9	254.94
3	510.25	380.5	376.6	374.47



Şekil 107. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının sonlu eleman analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekansın değişimi

### 2.2.6.2. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Tip-1 Kemer Barajının Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

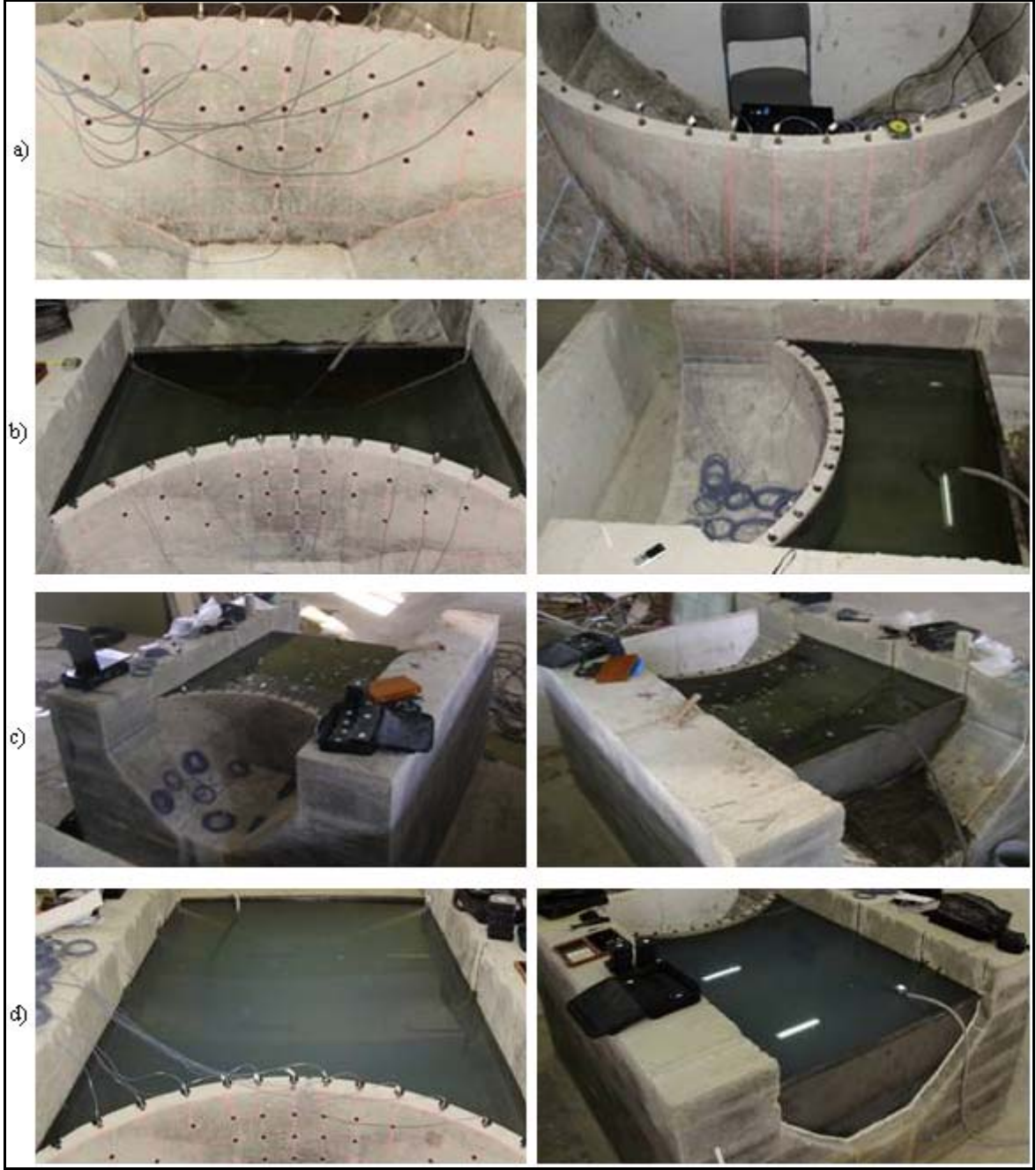
60 cm yüksekliğe sahip Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için rezervuarın boş olması, rezervuarın tam dolu ve sırasıyla 60, 120 ve 180 cm uzunluğuna sahip olması durumları için baraça çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Her bir rezervuar yüksekliği durumunda uygulanan çevresel titreşim testini belirtmek için aşağıdaki kısaltmalar kullanılmaktadır:

- $L_{\phi}0$ : Rezervuarın boş olması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,
- $L_{\phi}H$ : Rezervuarda 60 cm su uzunluğu bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,

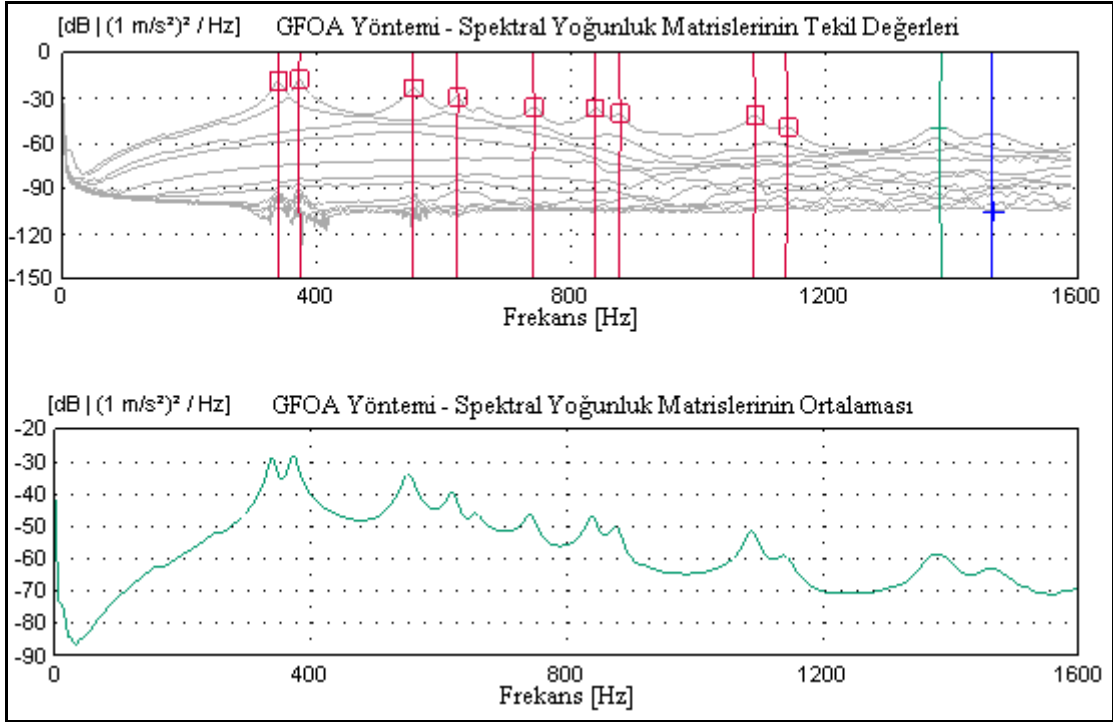
- $L_{\zeta}2H$ : Rezervuarda 120 cm su uzunluğu bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi,
- $L_{\zeta}3H$ : Rezervuarda 180 cm su uzunluğu bulunması durumu için uygulanan çevresel titreşim testi.

Tip-1 kemer barajının çevresel titreşim testlerinde, Bölüm 2.2.5.2.'de bahsedilen deneysel ölçüm sistemi kullanılmıştır. Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testleri her bir durum için farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Buna göre ölçümler; beton dökümünden  $L_{\zeta}0$  için 45,  $L_{\zeta}H$  için 90,  $L_{\zeta}2H$  için 100 ve  $L_{\zeta}3H$  için 170 gün sonra yapılmıştır. Her bir durum için gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinde barajdan gelen titreşim sinyallerini toplamak için 11 adet ivmeölçer Bölüm 2.2.5.2.'de belirtildiği gibi yerleştirilmiştir (Şekil 44). Her bir çevresel titreşim testinde ölçülmesi planlanan frekans aralığı analitik modellerden elde edilen doğal frekanslara göre 0-1600 Hz arası seçilmiş ve her test için 5 dk ölçüm alınarak sinyaller toplanmış ve OMA (2006) yazılımına aktararak işlenmiştir. İşlenen sinyaller Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma (GFOA) ve Stokastik Altalan Belirleme (SAB) yöntemlerine göre ayrıştırılarak Tip-1 kemer barajının doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları farklı rezervuar uzunlukları için elde edilmiştir.  $L_{\zeta}0$ ,  $L_{\zeta}H$ ,  $L_{\zeta}2H$  ve  $L_{\zeta}3H$  durumları için gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri sırasında çekilen fotoğraflar Şekil 108'de verilmektedir.

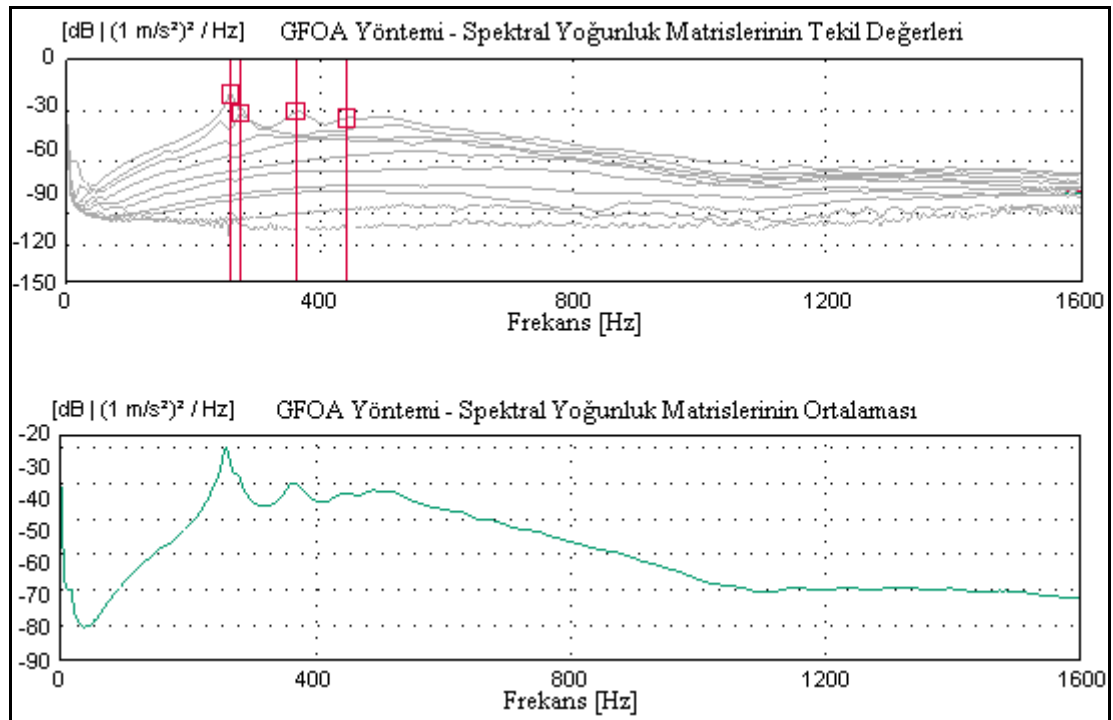
GFOA ve SAB yöntemlerine göre elde edilen dinamik karakteristikler birbirine çok yakın bulunmuştur. Dolayısıyla bu kısımda, SAB yönteminden elde edilen sonuçlara ayrıca yer verilmemiştir.  $L_{\zeta}0$ ,  $L_{\zeta}H$ ,  $L_{\zeta}2H$  ve  $L_{\zeta}3H$  durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerinin ortalaması sırasıyla Şekil 109-112'de verilmektedir. Şekil 109-112 incelendiğinde,  $L_{\zeta}0$  durumu için 10 civarında pik değer mevcutken;  $L_{\zeta}H$ ,  $L_{\zeta}2H$  ve  $L_{\zeta}3H$  durumları için sadece 4-5 pik değer bulunmaktadır. Buradan, rezervuarın her bir uzunluktaki dolu durumunun Tip-1 kemer barajının dinamik davranışının etkilendiği sonucunu çıkartmak mümkündür.



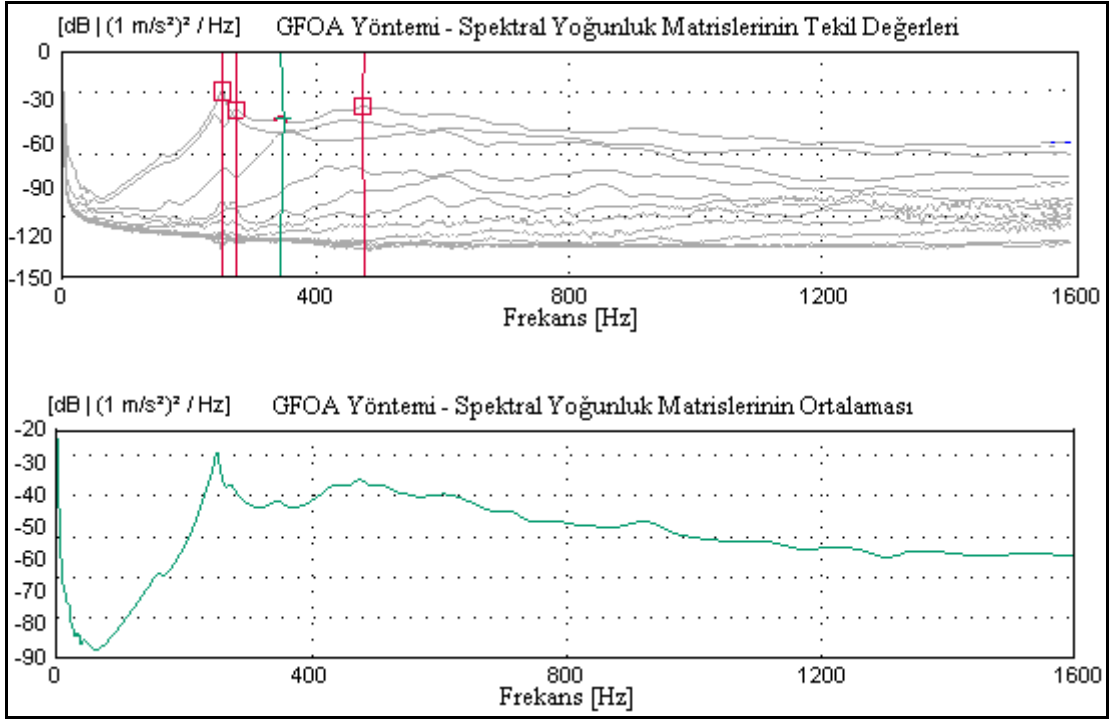
Şekil 108. Tip-1 kemer barajında a)  $L_{\phi 0}$ , b)  $L_{\phi H}$ , c)  $L_{\phi 2H}$  ve d)  $L_{\phi 3H}$  durumları için gerçekleştirilen çevresel titreşim testleri



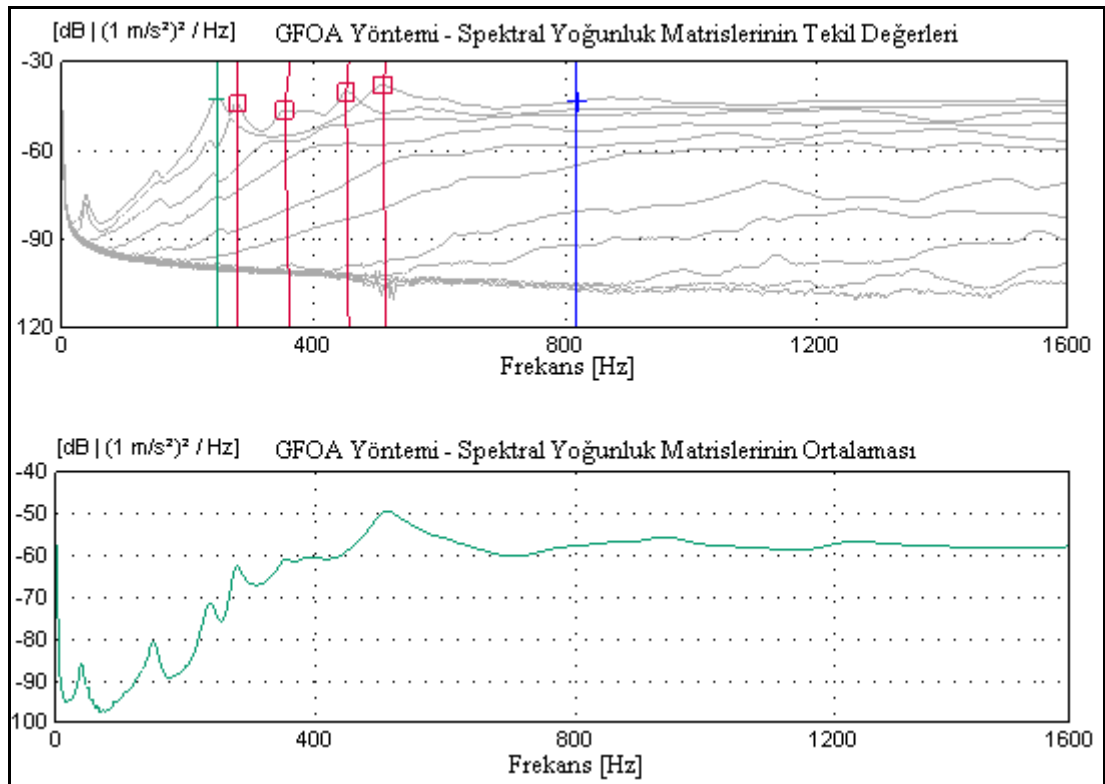
Şekil 109.  $L_{c0}$  durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri



Şekil 110.  $L_{cH}$  durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri

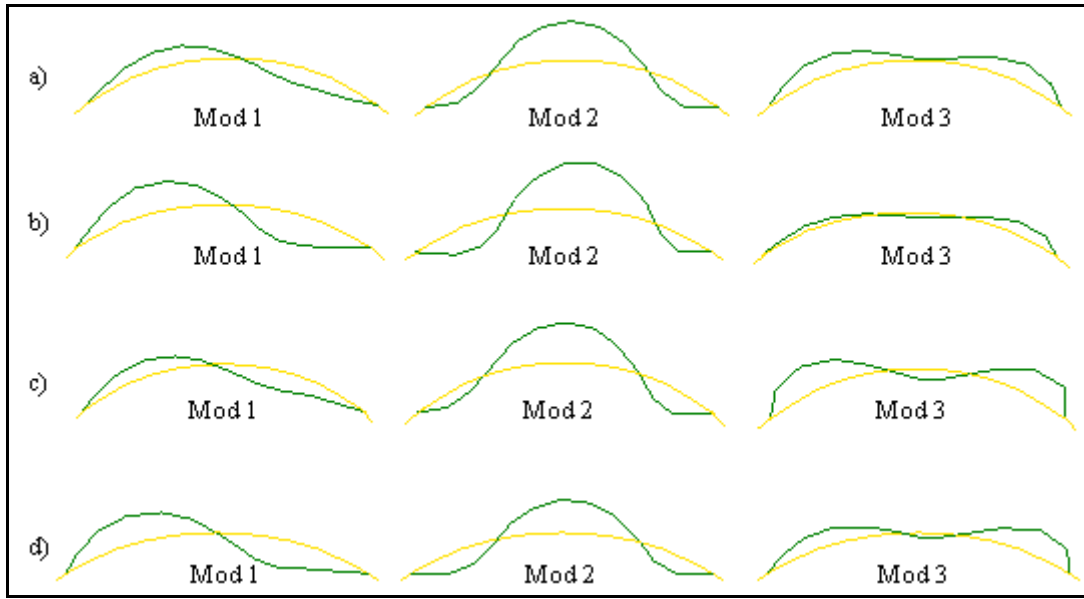


Şekil 111. L<sub>ç</sub>2H durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri



Şekil 112. L<sub>ç</sub>3H durumu için Tip-1 kemer barajının spektral yoğunluk matrisleri

$L_{\zeta 0}$ ,  $L_{\zeta H}$ ,  $L_{\zeta 2H}$  ve  $L_{\zeta 3H}$  durumları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk üç mod şekli Şekil 113'te verilmektedir. Şekil 113 incelendiğinde her bir durum için elde edilen mod şekillerinin sırasıyla anti-simetrik, simetrik ve simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir. Buradan rezervuar uzunluğunun, barajın salınım hareketinde bir değişime neden olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 113. Tip-1 kemer barajının a)  $L_{\zeta 0}$ , b)  $L_{\zeta H}$ , c)  $L_{\zeta 2H}$  ve d)  $L_{\zeta 3H}$  durumları için elde edilen mod şekilleri

Farklı rezervuar uzunlukları için Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel titreşim testlerinden GFOA yöntemine göre elde edilen ilk üç moda ait doğal frekans ve sönüm oranı Tablo 48'de verilmektedir. Tablo 48 incelendiğinde, Tip-1 kemer barajının rezervuarında su olmaması ve rezervuarda 180 cm (3H) su uzunluğu olması durumunda elde edilen doğal frekanslardaki değişim sırasıyla; 1. frekans için %26.8, 2. frekans için %25.4, 3. frekans için %34.3 olmaktadır.

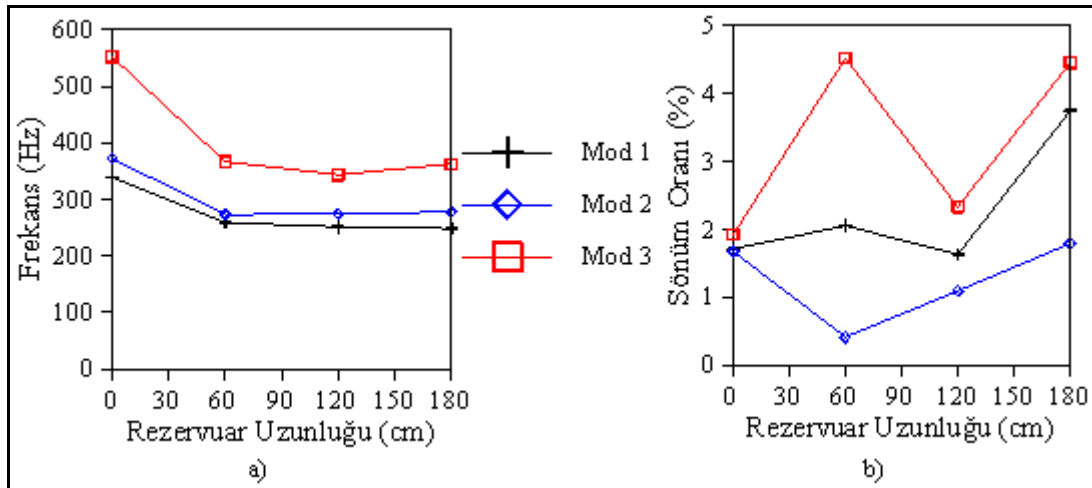
Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar uzunluğu durumları için elde edilen ilk üç doğal frekansın değişimi Şekil 114'te verilmektedir. Şekil 114a'da görüldüğü gibi, rezervuarda H uzunluğunda su bulunması durumunda frekanslar önemli ölçüde azalmakta,  $L_{\zeta 2H}$  ve  $L_{\zeta 3H}$  durumları için ise fazla değişmemekte, hatta  $L_{\zeta 3H}$  durumu için biraz artmaktadır. Bunun sebebi, her bir ölçümün farklı zamanlarda gerçekleştirilmesi olarak düşünülmektedir. Çünkü barajın kemer kısmı çok narin olduğu için, bu kısımdaki betonda



zamana bağılı rötire, sünme olması veya betonun zamanla dayanımının artması gibi durumlar betonun elastisite modülünde azalma ve artmalara neden olmaktadır. Şekil 114b'de görüldüğü gibi, sönüm oranları arasında düzgün bir dağılım yoktur. Sönüm oranları  $L_{\check{c}0}$  ve  $L_{\check{c}2H}$  durumları için %1.5-2 arasında elde edilirken;  $L_{\check{c}H}$  ve  $L_{\check{c}3H}$  durumları için %0.5-4.5 gibi daha değişken elde edilmektedir. Sönüm oranları arasındaki bu uyuşmazlığın sebebi Bölüm 2.2.5.2.'de ifade edildiği gibi kullanılan sinyal işleme yazılımıdır (OMA, 2006). Çünkü OMA (2006), sönüm oranlarından ziyade, doğal frekansları ve mod şekillerini belirlemek için kullanılan bir yazılımdır.

Tablo 48. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının GFOA yöntemine göre elde edilen doğal frekans ve sönüm oranları

Mod	$L_{\check{c}0}$		$L_{\check{c}H}$		$L_{\check{c}2H}$		$L_{\check{c}3H}$	
	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
1	339.2	1.71	259.0	2.05	251.1	1.63	248.3	3.75
2	372.6	1.67	273.3	0.41	274.0	1.09	278.0	1.79
3	552.3	1.92	366.8	4.52	343.6	2.33	362.7	4.46



Şekil 114. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının GFOA yöntemine göre elde edilen ilk üç a) doğal frekansın b) sönüm oranının değişimi

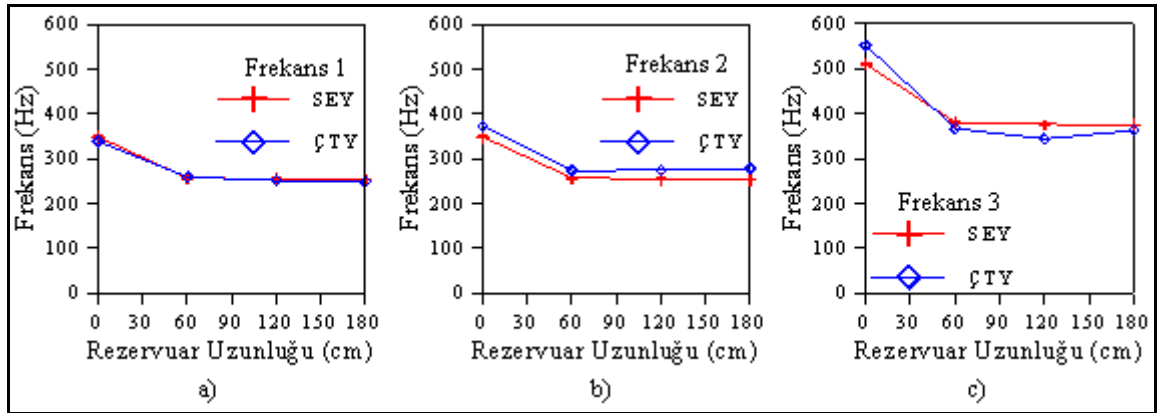


### 2.2.6.3. Tip-1 Kemer Barajının Analitik ve Deneysel Dinamik Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

SEY ve ÇTY'den rezervuar uzunluğu boyunca elde edilen doğal frekanslar Tablo 49'da ve doğal frekansların değişimi ise Şekil 115'te verilmektedir. Tablo 45 ve Şekil 115'te görüldüğü gibi her üç yöntemle elde edilen doğal frekansların birbiriyle uyumlu olduğu ve rezervuar uzunluğuna bağlı olarak azaldığı sonucunu çıkartmak mümkündür.

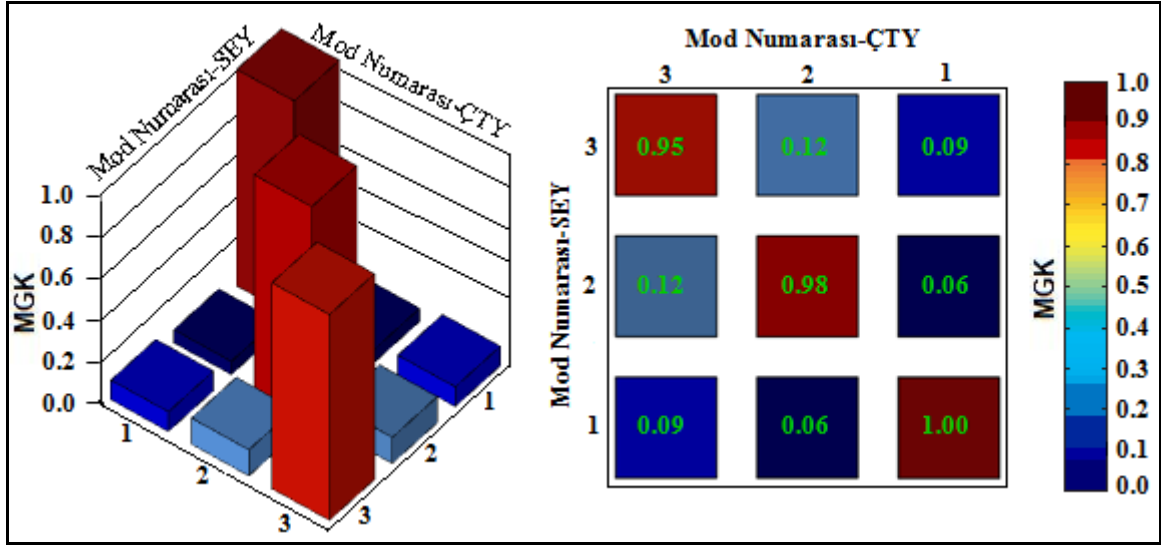
Tablo 49. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için SEY ve ÇTY-GFOA yöntemine göre elde edilen doğal frekanslar

Frekans (Hz)	L0		LH		L2H		L3H	
	SEY	ÇTY	SEY	ÇTY	SEY	ÇTY	SEY	ÇTY
1	348.87	339.2	256.8	259.0	254.9	251.1	252.85	248.3
2	364.82	372.6	258.8	273.3	256.9	274.0	254.94	278.0
3	510.25	552.3	380.5	366.8	376.6	343.6	374.47	362.7

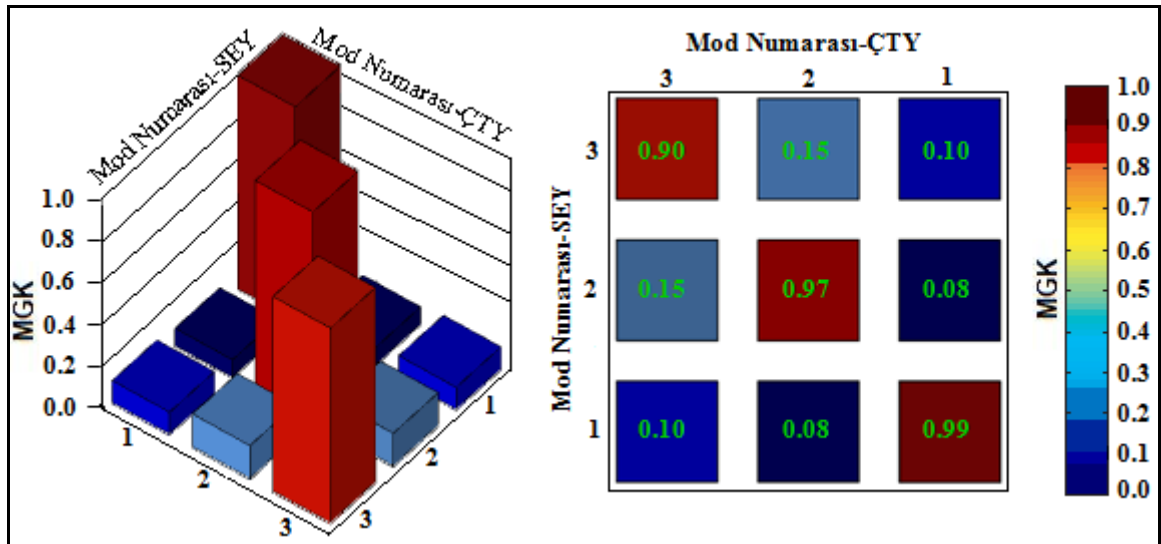


Şekil 115. Farklı rezervuar uzunluğu durumları için Tip-1 kemer barajının SEY ve ÇTY-GFOA'ya göre elde edilen a) 1. Frekansın, b) 2. Frekansın, c) 3. Frekansın değişimi

SEY ve ÇTY'den rezervuarın boş (L0) ve rezervuarın tam dolu (L3H) durumları için elde edilen mod şekilleri arasındaki uyumu gösteren MGK grafikleri sırasıyla Şekil 116 ve Şekil 117'de verilmektedir. Şekil 116 ve 117'de görüldüğü gibi, analitik ve deneysel modlar birbiriyle uyum içerisindedir.



Şekil 116. L0 durumu için SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği

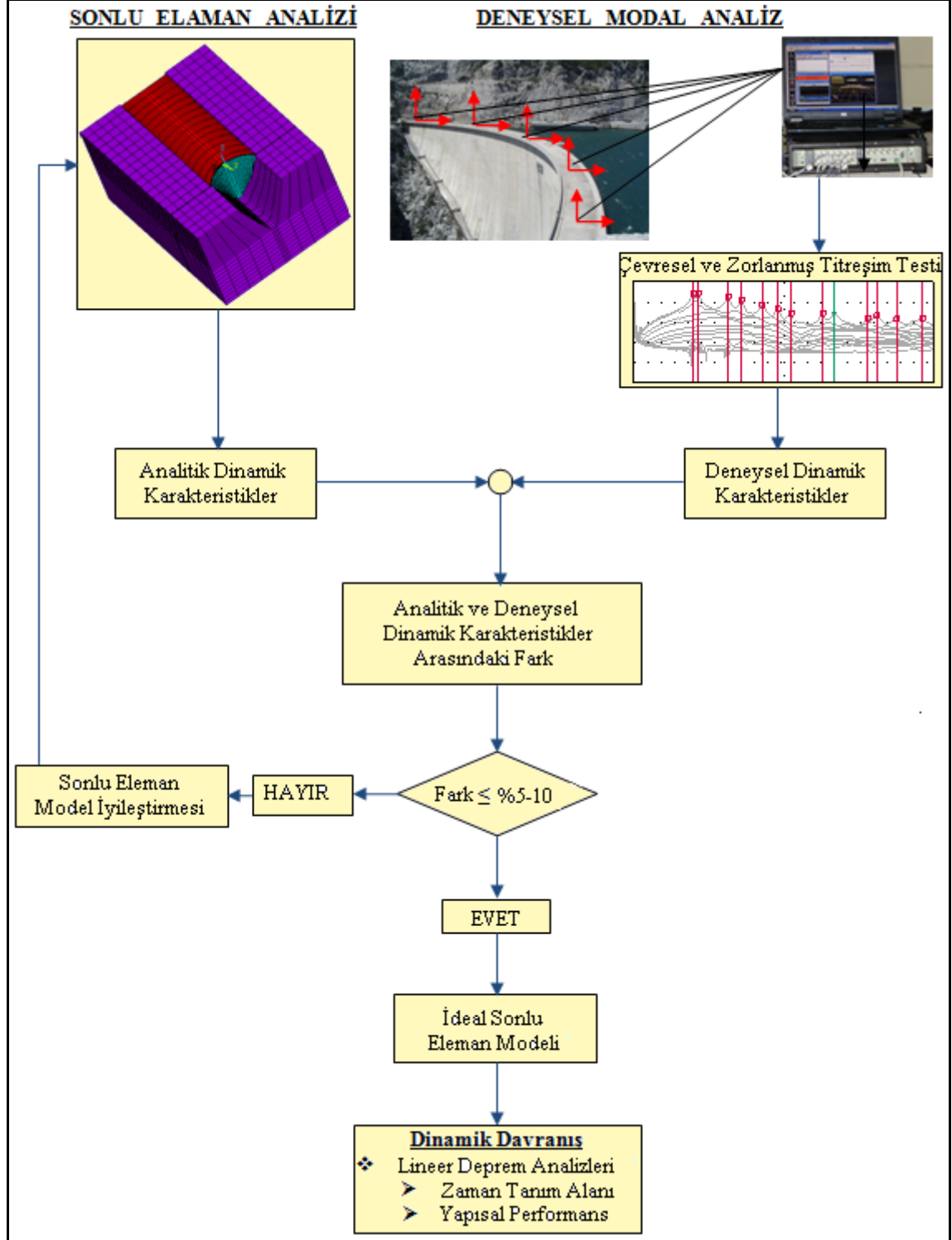


Şekil 117. L3H durumu için SEY ve ÇTY'den elde edilen modlara ait MGK grafiği

### 2.3. Arazi Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında yapılması planlanan arazi çalışmaları için Berke Barajı seçilmiştir. Bu kısımda, Berke Barajı'nın dinamik karakteristikleri analitik ve deneysel yöntemlerle belirlenmekte ve barajın sonlu eleman modeli deneysel modal analiz sonuçlarına göre iyileştirilmektedir. Ayrıca bu kısımda, Berke Barajı'nın deprem davranışı ve yapısal performansı, başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri üzerinde

gerçekleştirilen analizler ışığında karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Bu kısımda, yapılan çalışmaları içeren akış şeması Şekil 118’de verilmektedir.



Şekil 118. Arazi çalışmaları kapsamında yapılan çalışmaları içeren akış şeması

### 2.3.1. Berke Barajı ve Geometrik Özellikleri

Berke Barajı, Ülke'mizdeki mevcut altı kemer barajdan biridir. 1996 yılında Osmaniye'de yapımına başlanan baraj, 2002 yılında işletmeye açılmıştır. Ülkemizdeki en büyük kemer baraj olma özelliğine sahip Berke Barajı, yapımı tamamlandığında Dünya'daki en büyük on altıncı kemer baraj olup, 201 m yüksekliğine ve 270 m kret uzunluğuna sahiptir. Berke Barajı dar-V tipi bir vadi üzerine yerleşmiş olup, çift eğrilikli bir kemer barajdır. Berke Barajı'na ait bazı fotoğraflar Şekil 119'da verilmektedir. Projesi Fransız bir firma tarafından hazırlanan barajın inşası Türk firmalar tarafından gerçekleştirilmiştir. Baraj, gövdesinin inşasında yaklaşık 650-700E3 m<sup>3</sup> beton kullanılmıştır. Baraj Ceyhan Nehri üzerine inşa edilmiş olup yaklaşık 427E6 m<sup>3</sup> göl hacmine ve 20 km rezervuar uzunluğuna sahiptir. Elektrik santralinden yılda 1700E6 kWsa enerji üretilen baraj, DSİ 6. Bölge Müdürlüğü (Adana) tarafından işletilmektedir (DSİ, 2009).

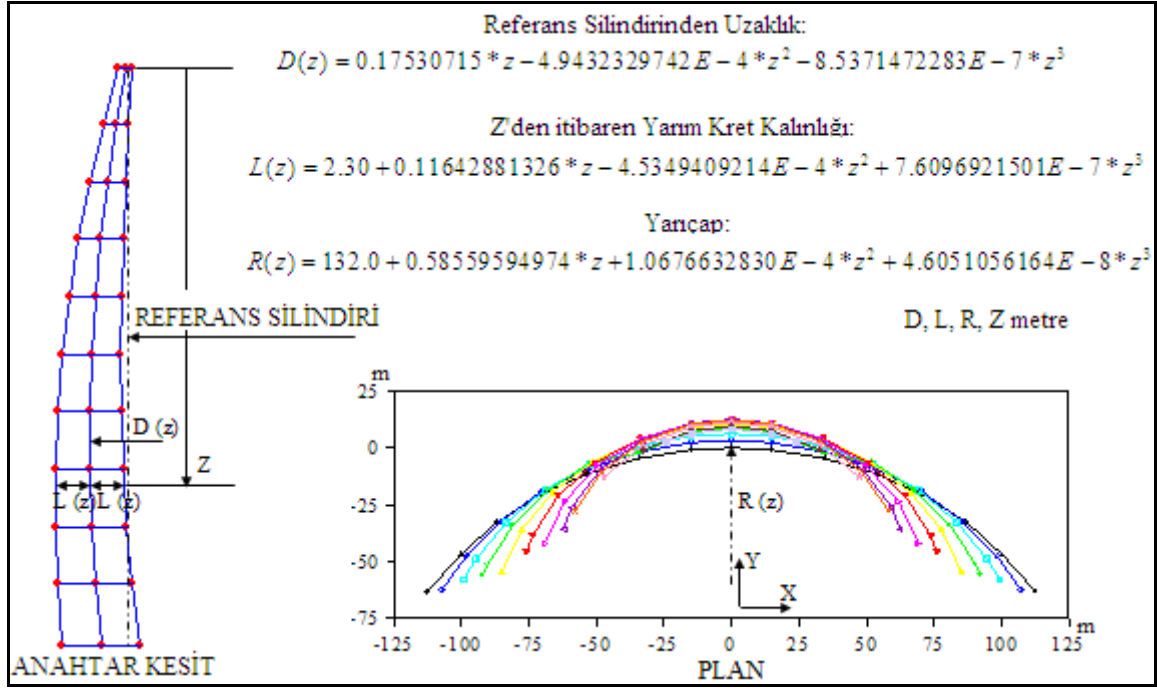


Şekil 119. Berke Barajı'na ait bazı fotoğraflar

Şekil 119'un devamı



Berke Barajı'nın, kret uzunluğunun baraj yüksekliğine oranı 1.34 olup, baraj genişliği krette 4.3 m, tabanda 27.12 m'dir. Berke Barajı'nın geometrik özellikleri Şekil 120'de verilmektedir.



Şekil 120. Berke Barajı'nın geometrik özellikleri (DSİ, 2009).

### 2.3.2. Sonlu Eleman Yöntemiyle (SEY) Berke Barajı'nın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Berke Barajı'nın dinamik karakteristiklerini analitik olarak belirlemek için barajın üç boyutlu sonlu eleman modeli (SEM) ANSYS (2008) programında oluşturulmuştur. Baraj davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi için sonlu eleman modeli baraj-rezervuar-temel etkileşimini içerecek şekilde geliştirilmiştir. Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinde rezervuar uzunluğu baraj yüksekliğinin üç katı kadar dikkate alınmıştır. Ayrıca deneysel ölçümler sırasında su seviyesi baraj kretinden 10 m aşağıda olduğundan rezervuar su yüksekliği 191 m olarak dikkate alınmıştır. Temel; memba yönünde rezervuar uzunluğu kadar, diğer yönlerde baraj yüksekliği kadar uzatılmıştır. Temel modeli kütsüz kabul edilerek sadece temel esnekliği dikkate alındığından, doğal frekans ve deformasyon etkilerinin ihmal edilebilmesi, temelin ancak bu kadar mesafe uzatılmasıyla mümkün olmaktadır (USACE, 2003). Barajın sonlu eleman modelini oluşturmak için kullanılan malzeme özellikleri Tablo 50'de verilmektedir. Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinde, gövde için 760 adet SOLID45 elemanı, temel için 7000 adet SOLID45 elemanı ve rezervuar için 5700 adet FLUID80 elemanı kullanılmıştır. Hem SOLID45 hem de FLUID80 elemanı sekiz düğüm noktasına sahip olup, her düğüm noktası X, Y ve Z ekseninde yer değiştirme serbestliğine sahiptir.



Tablo 50. Berke Barajı'nın sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri (DSİ, 2009)

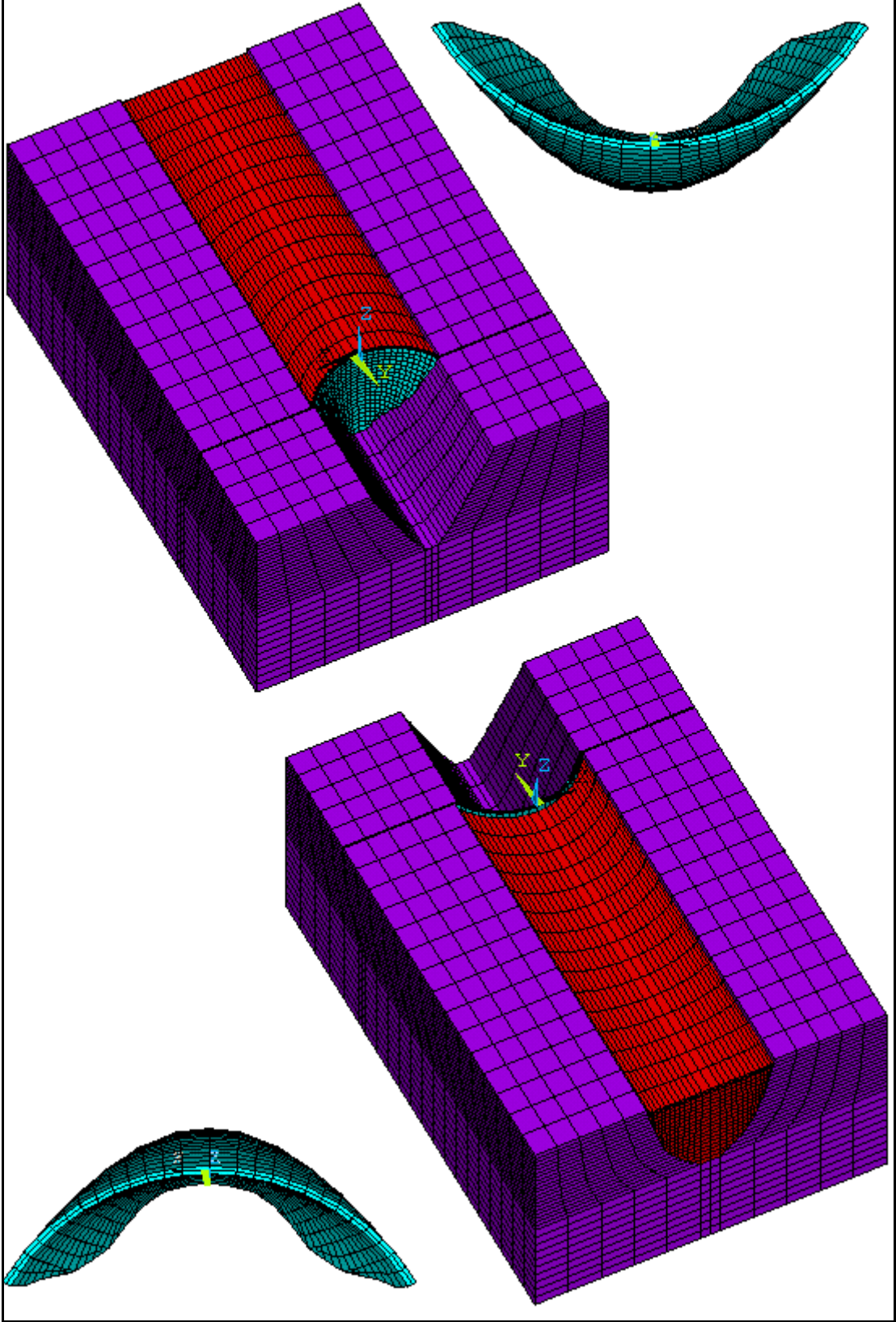
Sonlu Eleman Modeli	ANSYS Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri		
		Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
Kemer	SOLID45	3.25E10	0.15	2500
Rezervuar	FLUID80	2.070E9	-	1000
Temel	SOLID45	3.25E10	0.15	-

Berke Barajı'nın, gövde kısmını ve baraj-rezervuar-temel etkileşimi içeren üç boyutlu sonlu eleman modeline ait bazı görünüşler Şekil 121'de verilmektedir. Sonlu eleman modelinde temel dış sınırları ankastre olarak mesnetlenmiş, rezervuar ile baraj ve temel arasındaki etkileşim, 0.001 m uzunluğuna sahip bağlantı elemanları kullanılarak sağlanmıştır. Bağlantı elemanlarının görevi, sıvı-yapı arayüzündeki düğüm noktalarının yüzey normaline doğrultusundaki yerdeğiştirmelerini eşitlemektir. Rezervuarın mansap yüzünde yatay yerdeğiştirmeler engellenmiş, düşey yerdeğiştirmeler serbest bırakılmıştır.

Berke Barajı'nın, ANSYS (2008) sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen modal analizinden elde edilen ilk dokuz mod şekli Şekil 122'de verilmektedir. Şekil 122 incelendiğinde elde edilen mod şekillerinin simetrik, anti-simetrik ve düşey eğilme modları olduğu görülmektedir. Berke Barajı'nın ilk dokuz moduna ait doğal frekans, doğal periyot ve mod şekli sırasıyla Tablo 51'de verilmektedir. Tablo 51'de görüldüğü gibi barajın ilk dokuz doğal frekansı 2.19-11.27 Hz arasında değişmektedir.

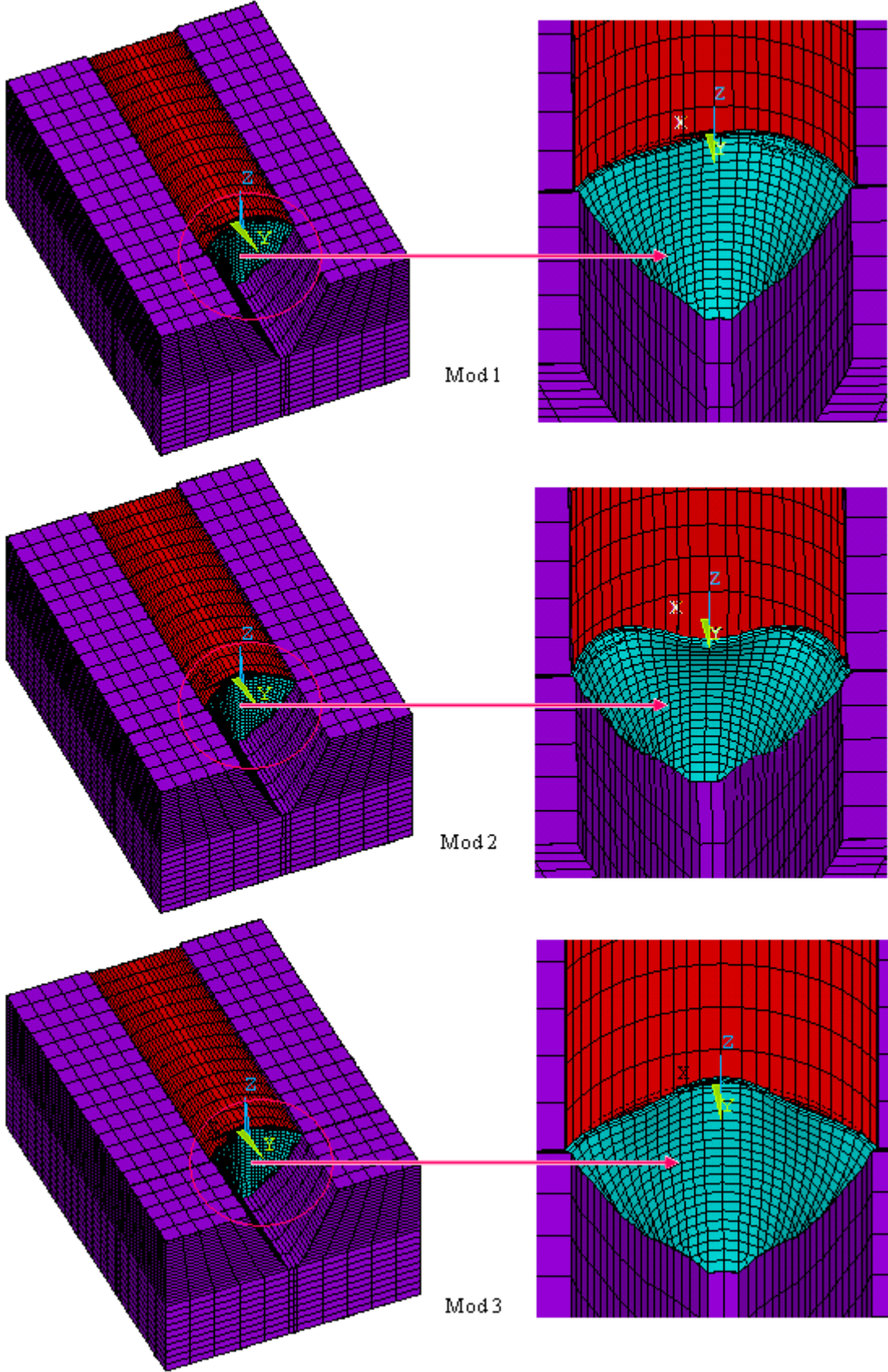
Tablo 51. Berke Barajı'nın analitik doğal frekans, periyot ve mod şekilleri

Mod	Frekans (Hz)	Periyot (s)	Mod Şekli
1	2.19	0.457	Anti-Simetrik Eğilme
2	2.94	0.340	Simetrik Eğilme
3	3.95	0.253	Simetrik Eğilme
4	4.72	0.212	Anti-Simetrik Eğilme
5	5.76	0.174	Düşey Eğilme
6	6.66	0.150	Simetrik Eğilme
7	6.86	0.146	Düşey Eğilme
8	8.43	0.119	Anti-Simetrik Eğilme
9	11.27	0.089	Düşey Eğilme



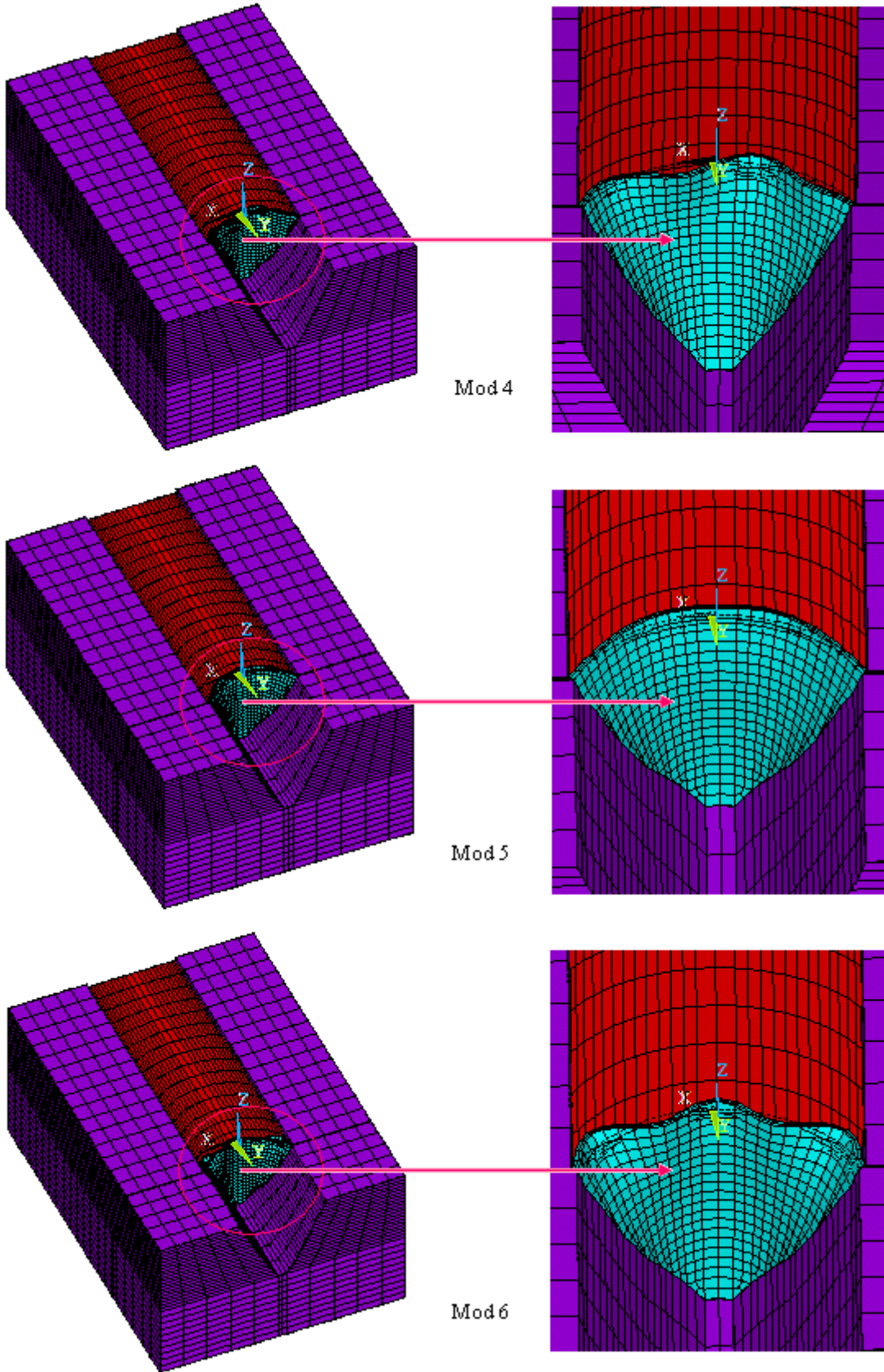
Şekil 121. Berke Barajı'nın üç boyutlu sonlu eleman modeli



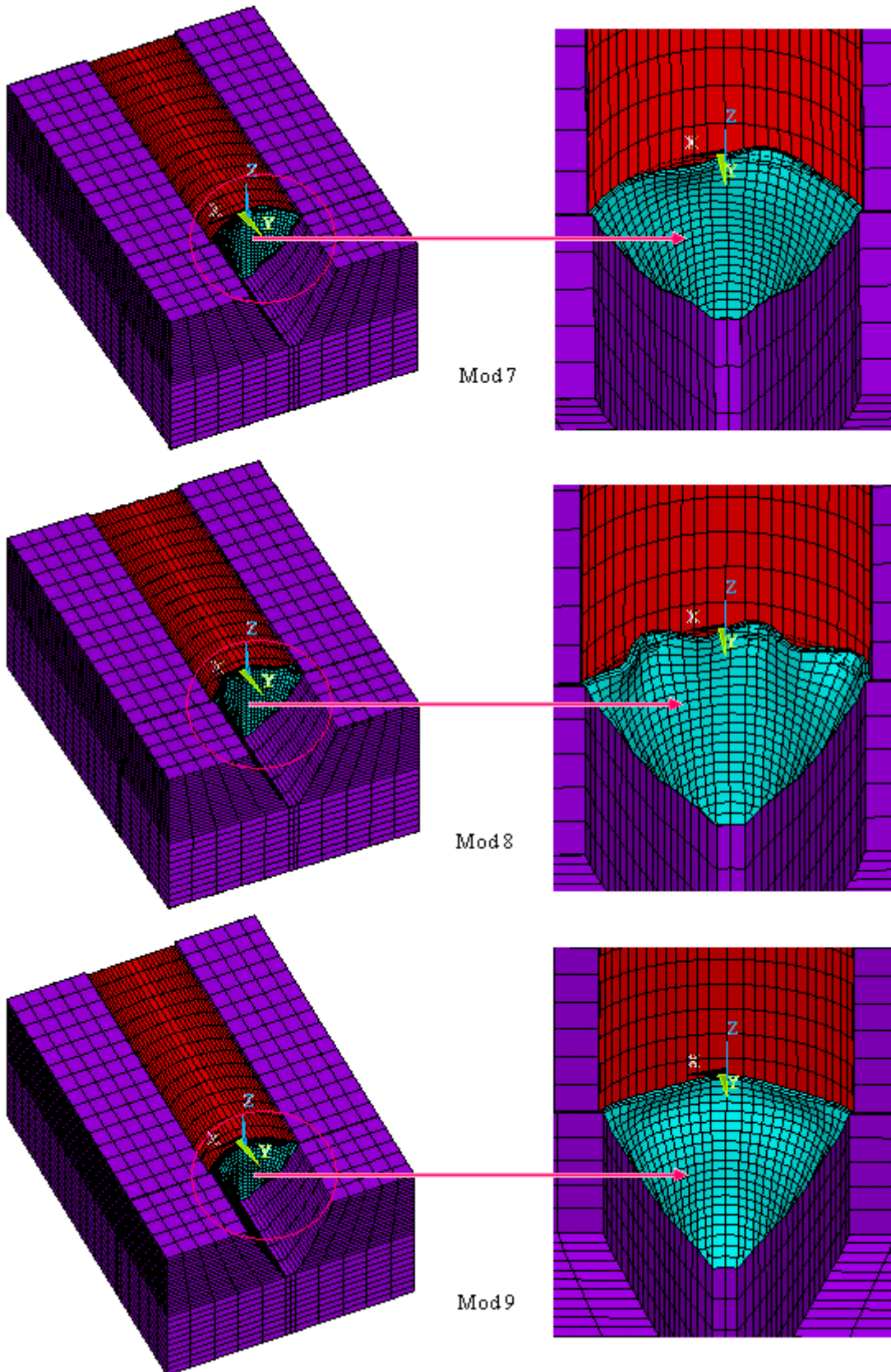


Şekil 122. Berke Barajı'nın analitik mod şekilleri

Şekil 122'nin devamı



Şekil 122'nin devamı



### 2.3.3. Çevresel Titreşim Yöntemiyle (ÇTY) Berke Barajı'nın Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi

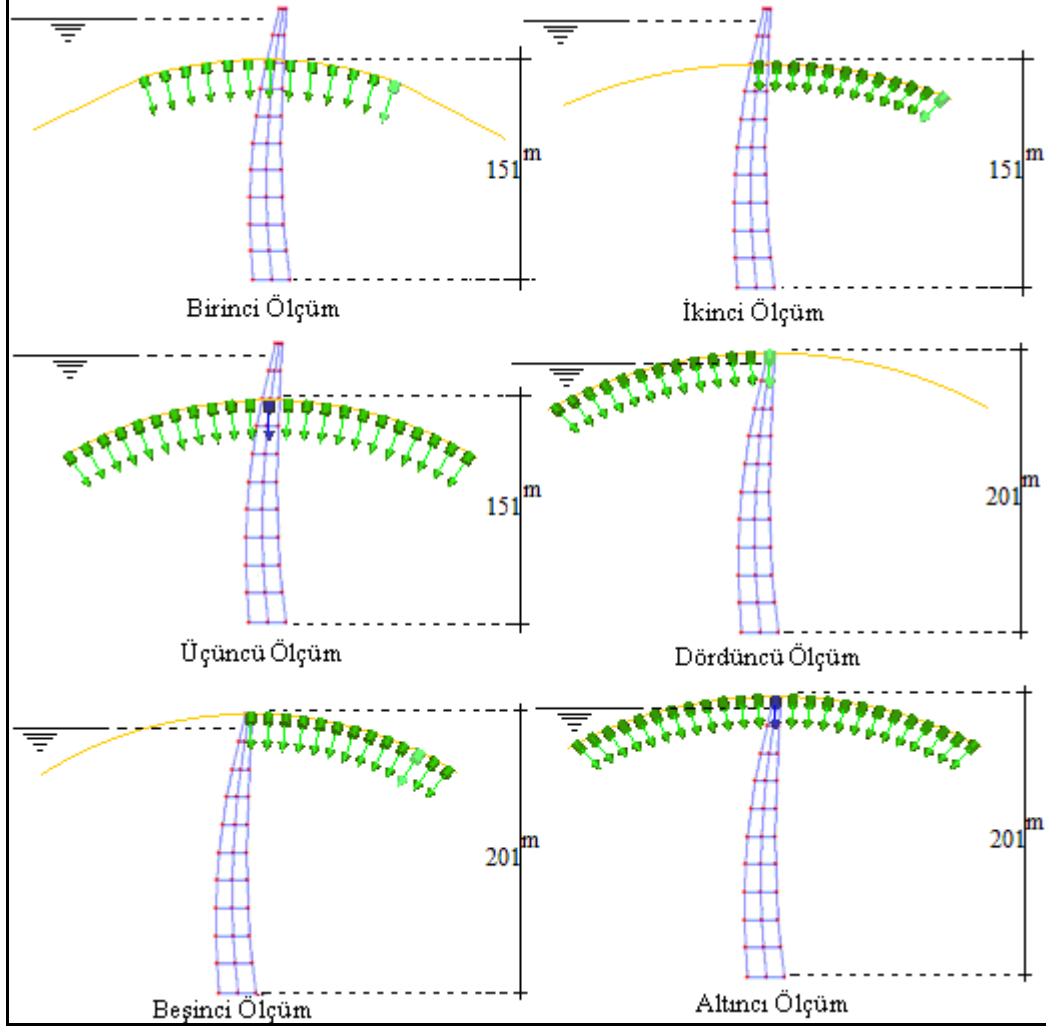
Berke Barajı'nın dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için barajda 24-28 Mayıs 2009 tarihleri arasında incelemeler yapılmış ve dört gün boyunca baraja altı farklı çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Testlerde, B&K 8340 tipi tek eksenli, 10 V/g hassasiyetine sahip ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerden gelen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanarak PULSE (2006) yazılımına aktarılmıştır. Bu sinyaller OMA (2006) yazılımına transfer edilerek işlenmiş ve Berke Barajı'nın doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları elde edilmiştir.

Berke Barajı'nda gerçekleştirilen altı farklı çevresel titreşim testinde; doğal etki olarak, rüzgâr ve su basıncı etkilerinden yararlanılmıştır. Testler sırasında, rezervuardaki su seviyesi kretin 10 m aşağısında tespit edilmiştir. Barajdan gelen titreşim sinyallerini toplamak için ivmeölçerler baraja mansap yönünde ve kret eksenine normal doğrultuda yerleştirilmiştir (Şekil 123). Şekil 123'te görüldüğü gibi ilk üç test, kret seviyesinde 50 m aşağıda bulunan ikinci galeride; son üç test ise kret üzerinde gerçekleştirilmiştir. İvmeölçer sayısı ve veri toplama ünitesindeki kanal sayısı sınırlı olduğu için her bir testte sadece 13 ivmeölçer kullanılabilmiştir. Her bir ölçüm için ivmeölçerlerin yerleşim planları kısaca aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- Birinci Ölçüm: 13 adet ivmeölçer galeriye, anahtar kesitin sağında ve solunda olmak üzere simetrik olarak yerleştirilmiştir.
- İkinci Ölçüm: 13 adet ivmeölçer galeriye, anahtar kesit ile sol yamaç arasına yerleştirilmiştir.
- Üçüncü Ölçüm: 12 adet ivmeölçer galeriye, referanslı olarak iki adımda yerleştirilmiştir. Referans olarak tanımlanan ivmeölçer anahtar kesit yerleştirilmek suretiyle 11 adet ivmeölçer birinci adımda anahtar kesit ile sol yamaç arasına, ikinci adımda ise anahtar kesit ile sağ yamaç arasına yerleştirilmiştir.
- Dördüncü Ölçüm: 13 adet ivmeölçer krete, anahtar kesit ile sağ yamaç arasına yerleştirilmiştir.
- Beşinci Ölçüm: 13 adet ivmeölçerler krete, anahtar kesit ile sol yamaç arasına yerleştirilmiştir.
- Altıncı Ölçüm: 12 adet ivmeölçer krete, referanslı olarak iki adımda yerleştirilmiştir. Referans olarak tanımlanan ivmeölçer anahtar kesit yerleştirilmek



suretiyle 11 adet ivmeölçer birinci adımda anahtar kesit ile sol yamaç arasına, ikinci adımda ise anahtar kesit ile sağ yamaç arasına yerleştirilmiştir.



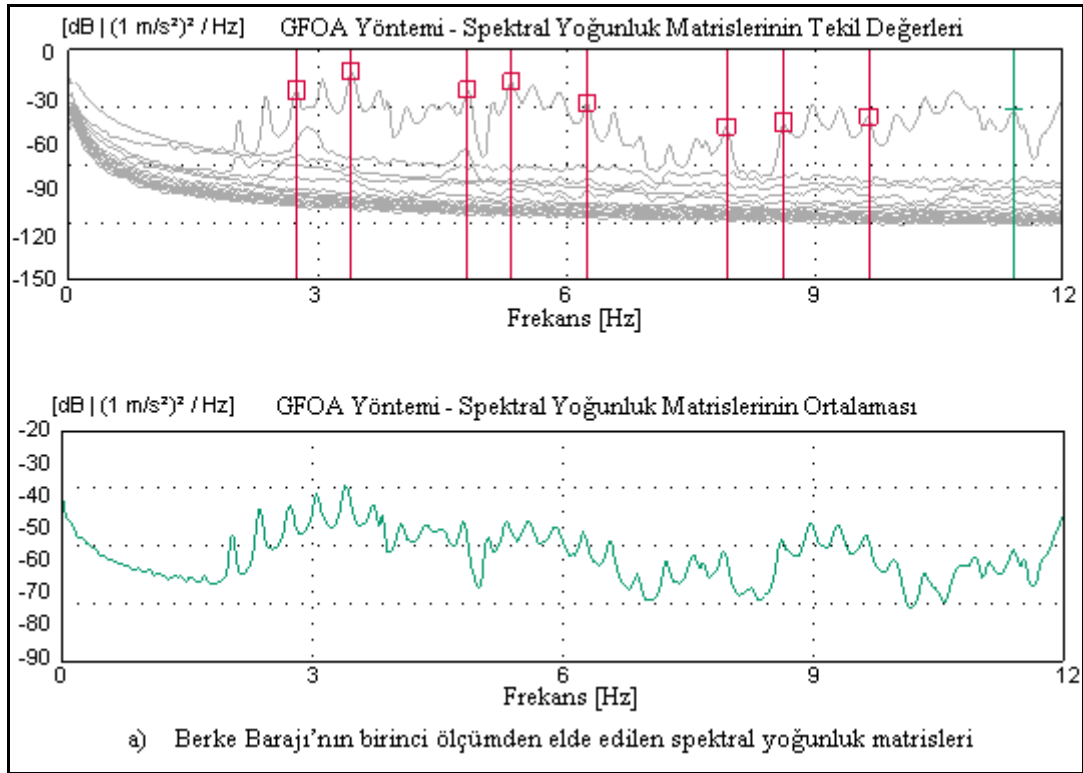
Şekil 123. Berke Barajı'nın çevresel titreşim testlerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşim planı

İvmeölçerler; referanslı olmayan ölçümlerde barajın kret uzunluğunun 135 m'lik kısmını, referanslı ölçümlerde ise 270 m'lik kısmını kapsamaktadır. Ölçüm süresi, Bölüm 1.7.2.'deki anlatıma uygun olarak; referanslı olmayan her bir çevresel titreşim testinde 10 dk, referanslı çevresel titreşim testlerinde ise her bir adımda 10 dk olacak şekilde toplam 20 dk olarak dikkate alınmıştır. Çevresel titreşim testleri, sonlu eleman analizlerinden elde edilen doğal frekanslar dikkate alınarak 0-12.5 Hz aralığında gerçekleştirilmiştir. Berke Barajı'nda gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar Şekil 124'te verilmektedir.



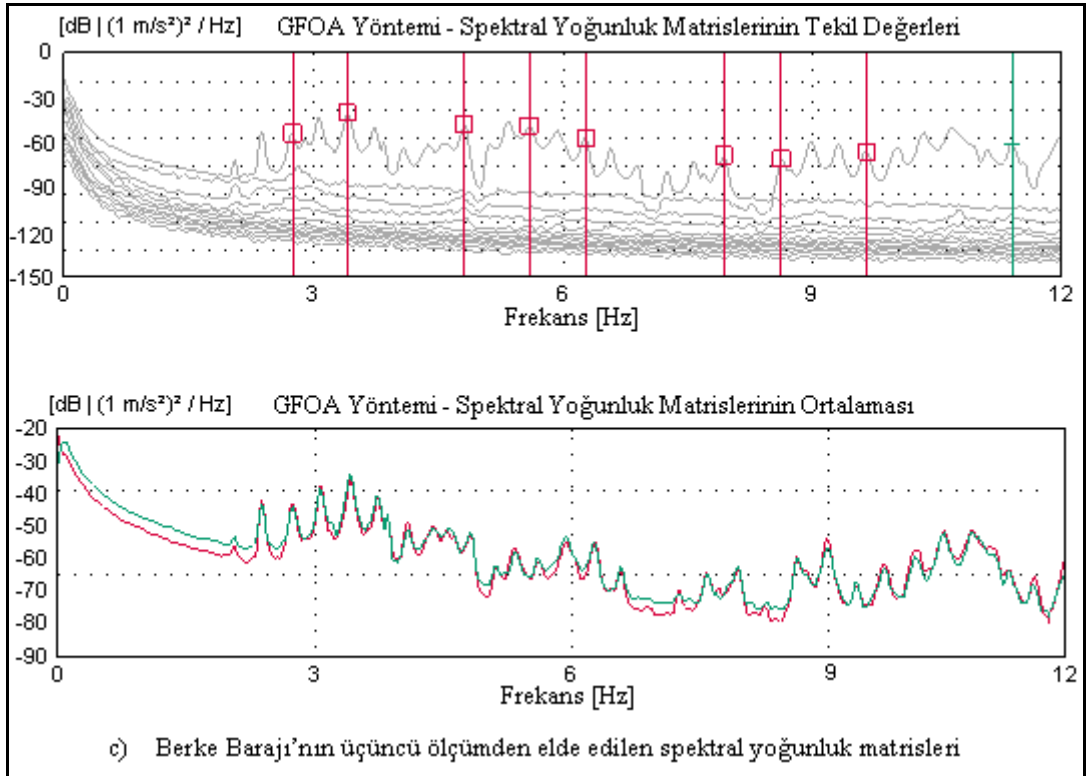
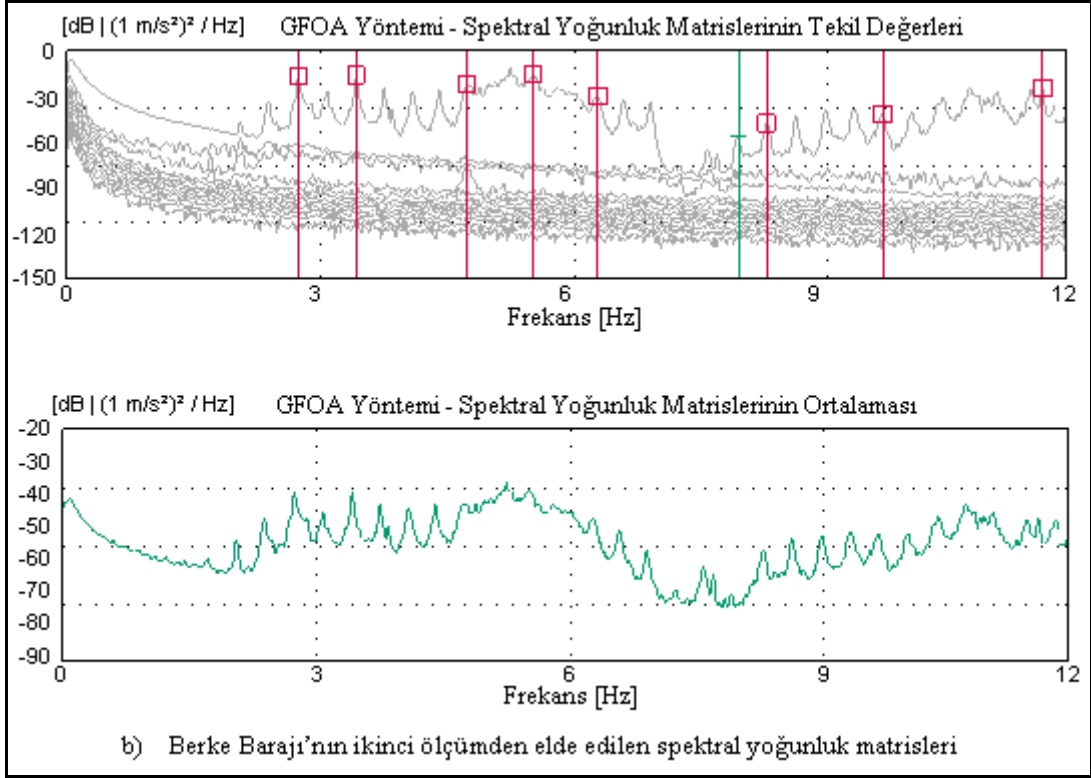
Şekil 124. Berke Barajı'nda gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerine ait bazı fotoğraflar

Berke Barajı'na uygulanan altı farklı çevresel titreşim testinden toplanan sinyallerin GFOA yöntemine göre ayrıştırılması sonucu elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerleri ve bu matrislerinin ortalaması sırasıyla Şekil 125(a-f)'de verilmektedir. Şekil 125(a-f) incelendiğinde, her bir çevresel titreşim testinden elde edilen spektral yoğunluk matrislerinin birbirine benzediği görülmektedir. Buradan Bölüm 1.7.2.'deki anlatıma uygun olarak; farklı noktalarda alınan ölçümlerden elde edilen davranışların bütün yapıyı temsil ettiği anlaşılmaktadır. Şekil 125(a-f)'de görüldüğü gibi, spektral yoğunluk matrislerinin tekil değerlerinde, pik yapmış fakat yapısal modu temsil etmeyen noktalar bulunmaktadır. Bu noktaların bazıları periyodik bir zaman aralığında oluşmaktadır. Bu noktalara karşılık gelen pikler, ortamdaki beyaz gürültüden kaynaklanmaktadır. Burada beyaz gürültüyü oluşturan etkenleri; ortamdaki rüzgar sesi, baraj gövdesine çarpan su sesi, veya çalışmakta olan makinelerin çıkarmış oldukları periyodik sesler şeklinde sıralamak mümkündür. Her bir pik noktaya karşılık bir mod şekli meydana gelmesi gerekirken, gürültü sinyallerini içeren pik noktalara karşılık, OMA (2006) yazılımında herhangi bir mod şekli ve sönüm oranı elde edilememiştir.



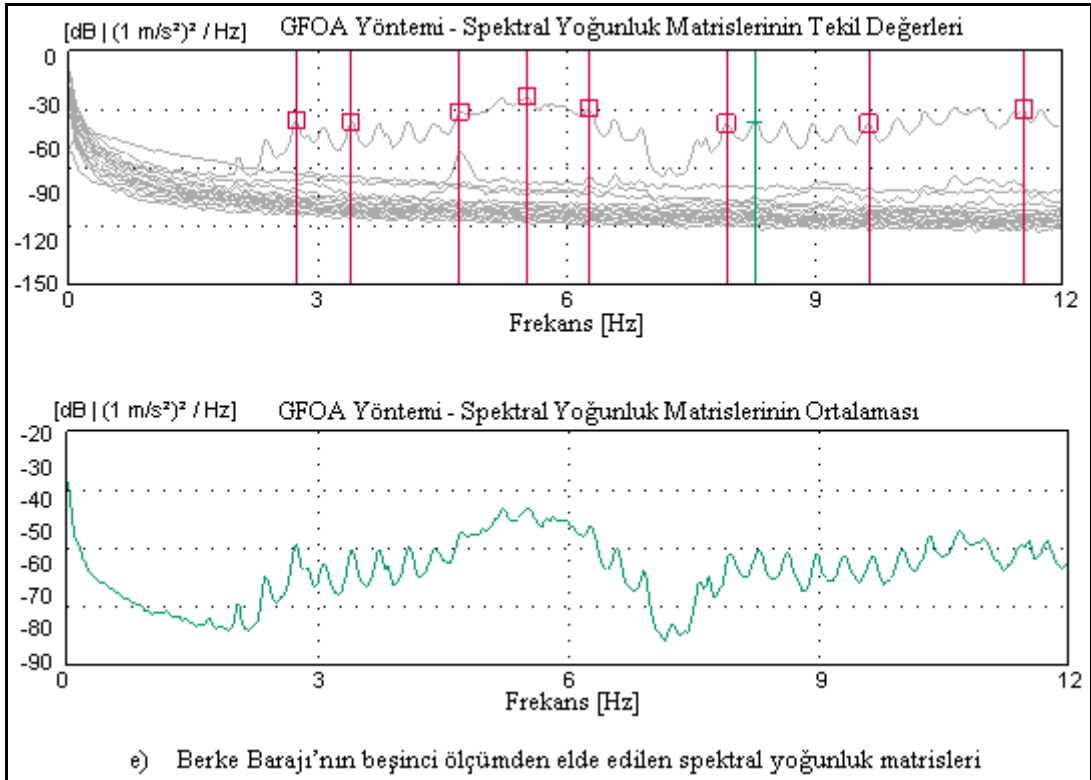
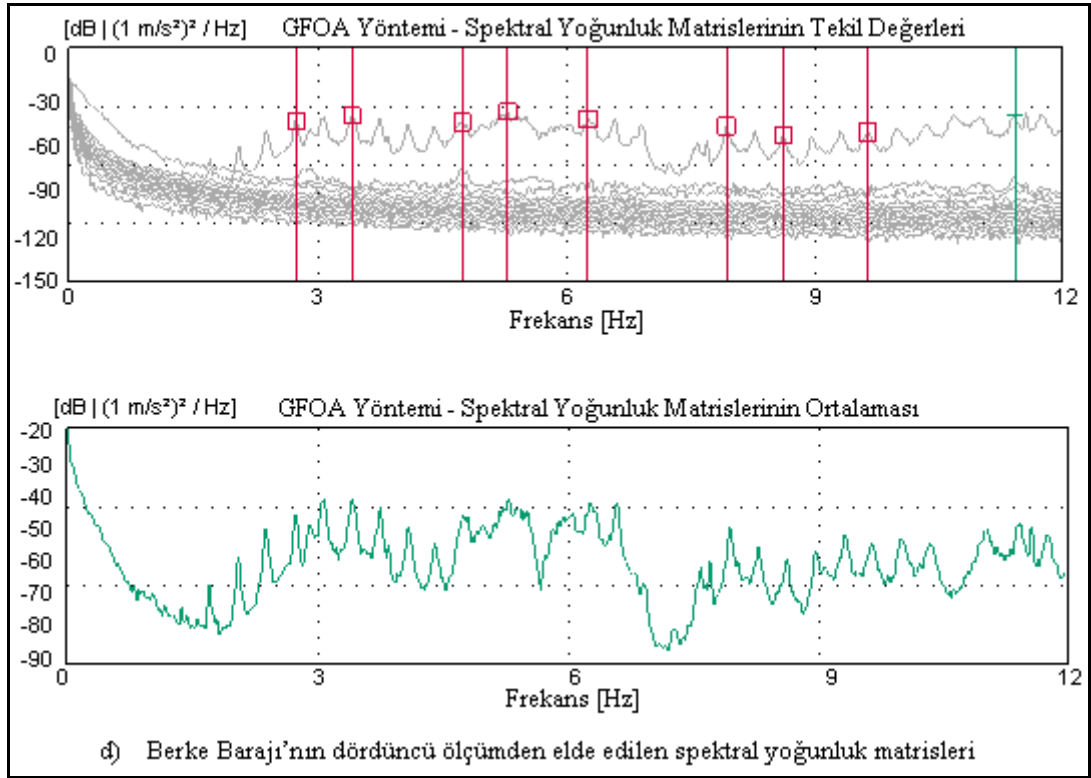
Şekil 125. Berke Barajı'nın ÇTY'den elde edilen spektral yoğunluk matrisleri

Şekil 125'in devamı

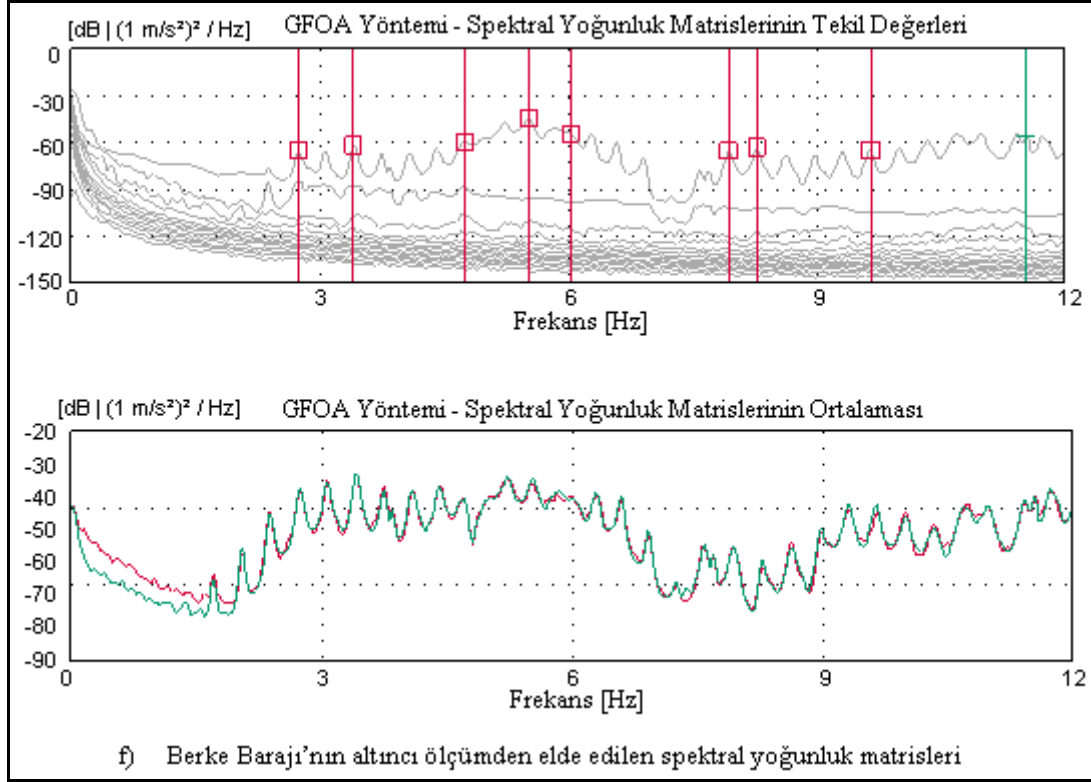




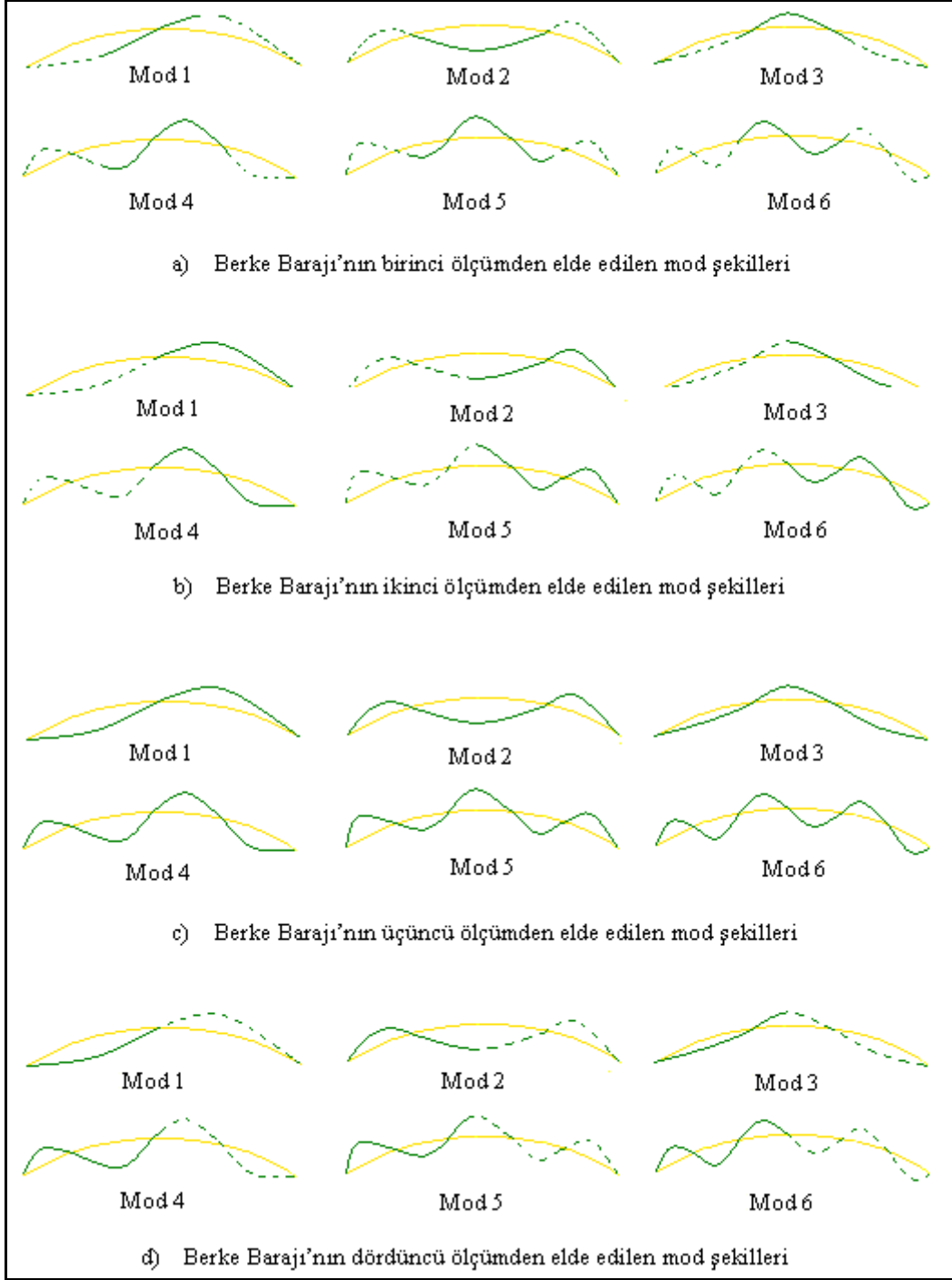
Şekil 125'in devamı



Şekil 125'in devamı



Berke Barajı'na uygulanan birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü çevresel titreşim testinden GFOA yöntemine göre elde edilen mod şekilleri Şekil 126'da verilmektedir. Şekil 126 incelendiğinde, her bir ölçümden elde edilen birinci, dördüncü ve altıncı modların anti-simetrik eğilme; ikinci, üçüncü ve beşinci modların ise simetrik eğilme modları olduğu görülmektedir. İvmeölçerler kret ekseninin normali doğrultusunda yerleştirildikleri için düşey mod şekilleri elde edilememiştir. Berke Barajı'nda gerçekleştirilen beşinci ölçümden elde edilen mod şekilleri ikinci ölçümdeki gibi, altıncı ölçümden elde edilen mod şekilleri ise üçüncü ölçümdeki gibi elde edildiği için Şekil 126'da verilmemiştir. Şekil 126c'de, referanslı olarak gerçekleştirilen üçüncü ölçümden elde edilen mod şekillerinin barajın tamamını temsil ettiği görülmektedir. Fakat Şekil 126'da; birinci, ikinci ve dördüncü ölçümlerden elde edilen mod şekilleri sürekli ve kesikli çizgilerle sunulmuştur. Burada, sürekli çizgiler ivmeölçerlerin yerleştiği kısmı, kesikli çizgiler ise ivmeölçerlerin olmadığı kısmı temsil etmektedir. Bölüm 1.7.2.'de anlatıldığı gibi mod şekilleri, ivmeölçer noktalarındaki modal yerdeğişirmelerin birleştirilmesinden meydana gelmektedir. Dolayısıyla, kesikli çizgiler barajın mod şekillerinin hayali kısmını göstermektedir.



Şekil 126. Berke Barajı'nın ÇTY'den elde edilen mod şekilleri

Berke Barajı'na uygulanan çevresel titreşim testlerinden GFOA yöntemine göre her bir ölçümden elde edilen ilk altı doğal frekans Tablo 52'de, ilk altı sönüm oranı Tablo 53'te verilmektedir. Tablo 52 ve 53'te görüldüğü gibi, barajın ilk altı doğal frekansı 2.74-9.66 Hz arasında, sönüm oranları ise %0.2-1.23 arasında değişmektedir. Burada, her bir ölçümden elde edilen doğal frekanslar birbiriyle uyumlu, sönüm oranları ise değişkendir.

Tablo 52. Berke Barajı'nın ÇTY'den elde edilen doğal frekansları

Frekans (Hz)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6
1	2.75	2.75	2.75	2.74	2.75	2.75
2	3.41	3.42	3.41	3.42	3.41	3.41
3	4.81	4.73	4.81	4.75	4.72	4.78
4	5.34	5.52	5.59	5.30	5.53	5.56
5	7.94	7.95	7.94	7.94	7.94	7.94
6	9.64	9.66	9.66	9.64	9.66	9.66

Tablo 53. Berke Barajı'nın ÇTY'den elde edilen sönüm oranları

Sönüm Oranı (%)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6
1	1.23	0.76	1.24	0.67	0.81	1.13
2	0.42	0.20	0.20	0.40	0.44	0.37
3	0.67	0.84	0.80	0.93	1.08	0.78
4	0.61	0.29	0.58	0.30	0.40	0.60
5	0.48	0.50	0.47	0.43	0.88	0.45
6	0.75	0.68	0.26	0.87	0.45	0.44

### 2.3.4. Berke Barajı'nın Sonlu Eleman Modelinin İyileştirilmesi

Şekil 122 ve 126 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Fakat Tablo 51 ve 52 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde analitik ve deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar arasında bazı farklılıkların olduğu, deneysel frekansların analitiklerden biraz daha büyük olduğu görülmektedir. Doğal frekanslar arasındaki bu farklılıkları giderebilmek için Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Sonlu eleman model iyileştirmesi, analizlerde kullanılan malzeme özellikleri veya sınır şartları gibi doğruluğu tam olarak belirlenemeyen parametreler değiştirilerek yapılmaktadır. Sonlu eleman model iyileştirmesinde bilinmesi gereken en önemli özelliklerden biri, doğruluğu hakkında kesine yakın bir bilgi sahibi olduğumuz parametreleri iyileştirmede kullanmamaktır. Diğer bir ifadeyle iyileştirme, belirsiz olan parametrelerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde değiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinde uygulanan

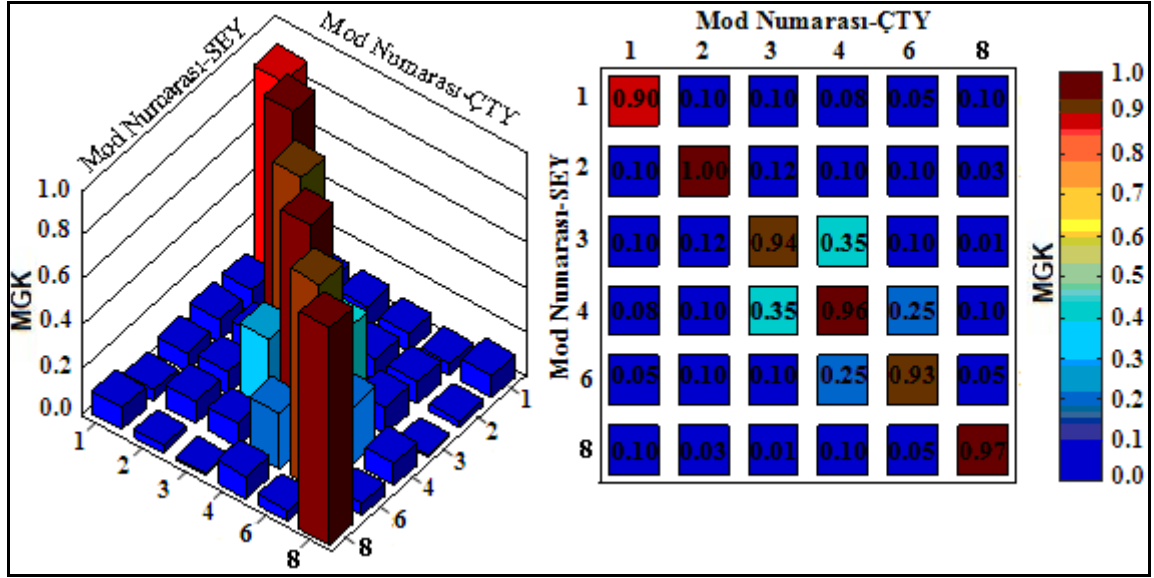
sınır şartları literatüre uygun olarak seçilmiştir (USACE, 1994; USACE, 2003). Dolayısıyla iyileştirme parametresi olarak malzeme özellikleri kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinde ise değişken parametre olarak en belirsiz özellik olan elastisite modülü ve betonun kütle yoğunluğu seçilmiştir. Barajın ve temelin elastisite modülleri sırasıyla yaklaşık %15 ve %23 artırılarak; betonun kütle yoğunluğu ise %4 azaltılarak Berke Barajı'nın sonlu eleman modeli iyileştirilmiştir. Berke Barajı'nın sonlu eleman model iyileştirmesinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 54'te verilmektedir. Berke Barajı'nın iyileştirmeden önceki ve sonraki analitik ve deneysel frekansları Tablo 55'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Tablo 55'te deneysel doğal frekanslar, altıncı ölçümden elde edilenlerle temsil edilmiştir. Tablo 55'te görüldüğü gibi, iyileştirilmiş analitik ve deneysel frekanslar arasındaki fark %2-3 civarındadır. İyileştirilmiş analitik ve deneysel mod şekilleri arasındaki uyumu görebilmek için çizilen Modal Güvence Kriteri grafiği Şekil 127'de verilmektedir. Şekil 127'den anlaşıldığı üzere, analitik ve deneysel mod şekilleri arasında çok iyi bir uyum bulunmaktadır.

Tablo 54. Berke Barajı'nın iyileştirilmiş malzeme özellikleri

Sonlu Eleman Modeli	ANSYS Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri		
		Elastisite Modülü (N/m <sup>2</sup> )	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
Kemer	SOLID45	3.75E10	0.15	2400
Rezervuar	FLUID80	2.070E9	-	1000
Temel	SOLID45	4.00E10	0.15	-

Tablo 55. Berke Barajı'nın analitik ve deneysel doğal frekansları

Frekans (Hz)	Başlangıç Analitik (SEY)	Fark (%)	Altıncı Ölçüm (ÇTY)	Fark (%)	İyileştirilmiş Analitik (SEY)
1	2.19	20	2.75	7.2	2.55
2	2.94	14	3.41	0	3.41
3	3.95	17	4.78	1.7	4.70
4	4.72	15	5.56	1.4	5.48
6	6.66	16	7.94	3.4	7.67
8	8.43	13	9.66	1.1	9.77

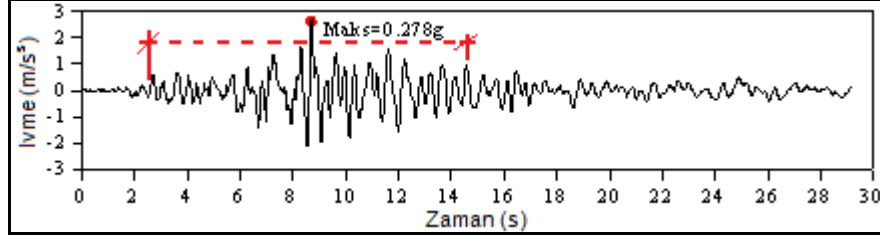


Şekil 127. Berke Barajı'nın analitik ve deneysel modlarına ait MGK grafiği

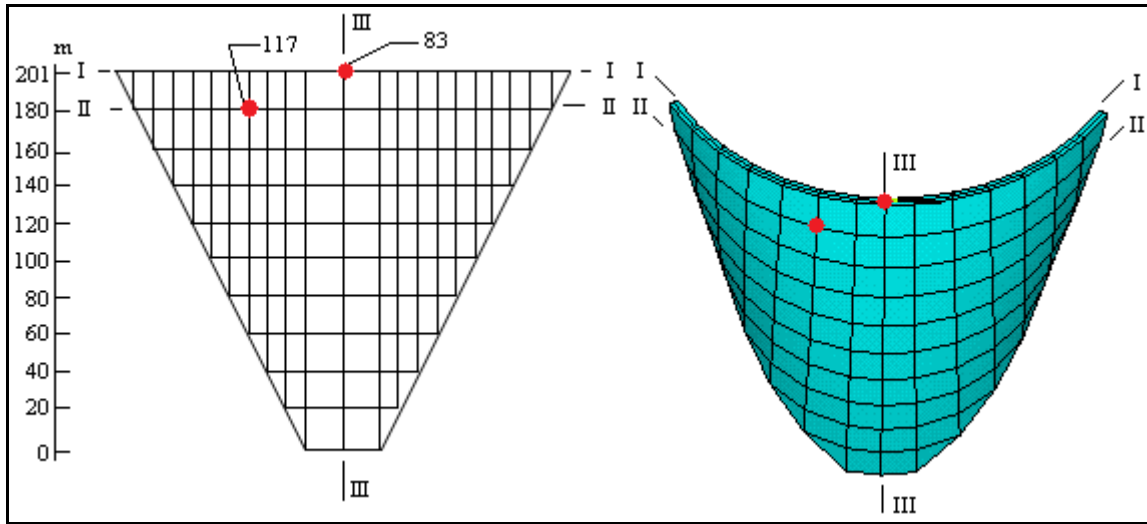
### 2.3.5. Berke Barajı'nın Deprem Davranışının ve Yapısal Performansının Belirlenmesi

Berke Barajı Türkiye Deprem Bölgesi Haritası'na göre II. Derece aktif deprem kuşağı içerisinde yer almaktadır (Tosun vd., 2007; Tosun ve Tosun, 2009; URL-7, 2010). Bu amaçla, Berke Barajı'nın deprem davranışını ve yapısal performansını belirlemek için zaman tanım alanında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, sonlu eleman model iyileştirmesinin etkisini görmek için hem iyileştirmeden önceki (başlangıç) sonlu eleman modeli hem de iyileştirilmiş sonlu eleman modeli için yapılmıştır. Deprem analizlerinde yer hareketi olarak 1998 yılında meydana gelen Adana-Ceyhan depreminin Ceyhan Tarım İlçe Müdürlüğü istasyonundan elde edilen C2T4998A/CYH-EW (URL-8, 2009) bileşeni baraja memba-mansap doğrultusunda uygulanmıştır. Bu yer hareketi, baraja çok yakın bir bölgede meydana geldiği için tercih edilmiştir. Adana-Ceyhan depreminin ait C2T4998A/CYH-EW bileşeni Şekil 128'de verilmektedir. Barajın zaman tanım alanında lineer analizlerinde, eleman matrisleri Gauss sayısal integrasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır (Bathe, 1996). Dinamik hareket denkleminin çözümünde ise Newmark Yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde Rayleigh sönüm katsayıları iyileştirilmiş modelde %1.13 sönüm oranı, başlangıç modelinde ise %5 sönüm oranı için hesaplanarak dikkate alınmıştır. Analizler çok uzun zaman aldığı ve fazla bilgisayar hafızası kapladığı için, işlem kolaylığı açısından yer hareketinin etkin olan 12 s'si dikkate alınmıştır (Şekil 128).

Analizlerden, Berke Barajı'na ait yerdeğiştirmeler ve gerilmeler elde edilmiştir. Bu sonuçların elde edildiği kesitler ve düğüm noktaları Şekil 129'da verilmektedir.



Şekil 128. 1998 Adana-Ceyhan depreminin C2T4998A/CYH-EW bileşeni



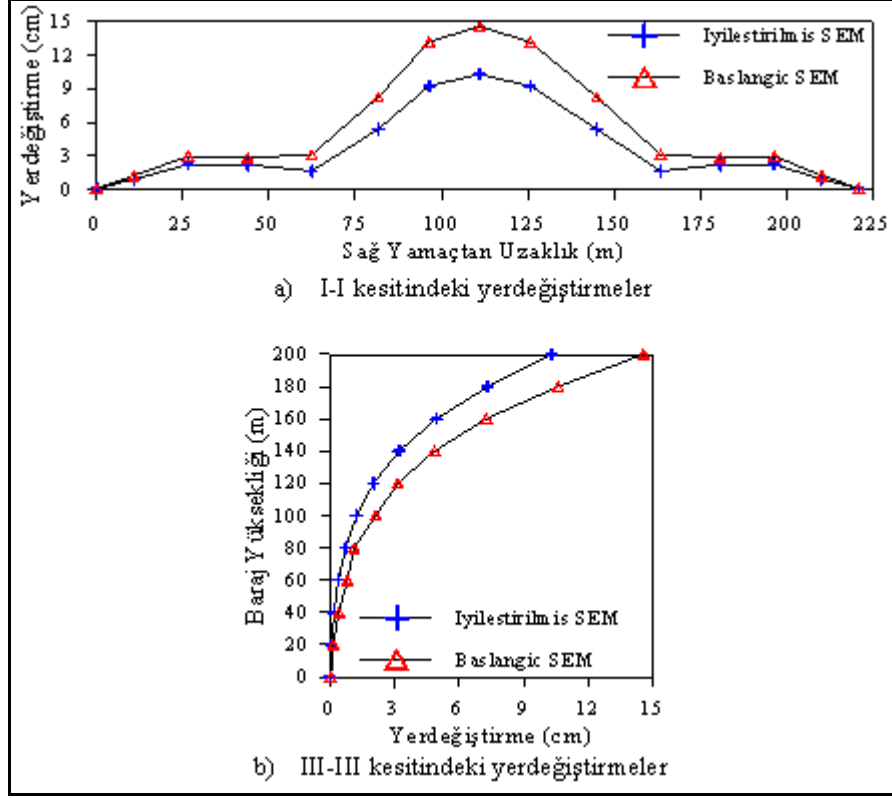
Şekil 129. Berke Barajı'nda sonuçların karşılaştırılması için seçilen kesit ve düğüm noktaları

### 2.3.5.1. Yerdeğiştirmeler

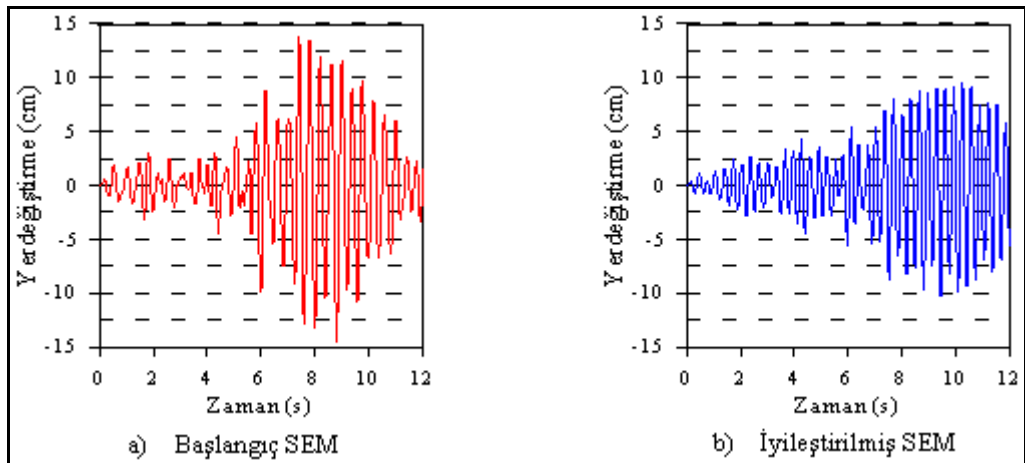
Berke Barajı'nın, I-I ve III-III kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yerdeğiştirmeleri sırasıyla Şekil 130(a-b)'de verilmektedir. Şekil 130'da grldğüğü üzere, başlangıç modeli için elde edilen yerdeğiştirmeler daha büyük olmakla birlikte, her iki durum için de en büyük yerdeğiştirmeler anahtar kesit ile kretin keşiştiği 83 no'lu düğüm noktasında oluşmaktadır.

Berke Barajı'nın, 83 no'lu düğüm noktasında memba-mansap doğrultusunda oluşan yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi sırasıyla Şekil 131(a-b)'de verilmektedir. Şekil

131'de görüldüğü üzere, model iyileştirme yerdeğiştirmelerin frekans içeriğini değiştirmektedir.



Şekil 130. Berke Barajı'nın a) I-I ve b) III-III kesitinde elde edilen yatay yerdeğiştirmeler

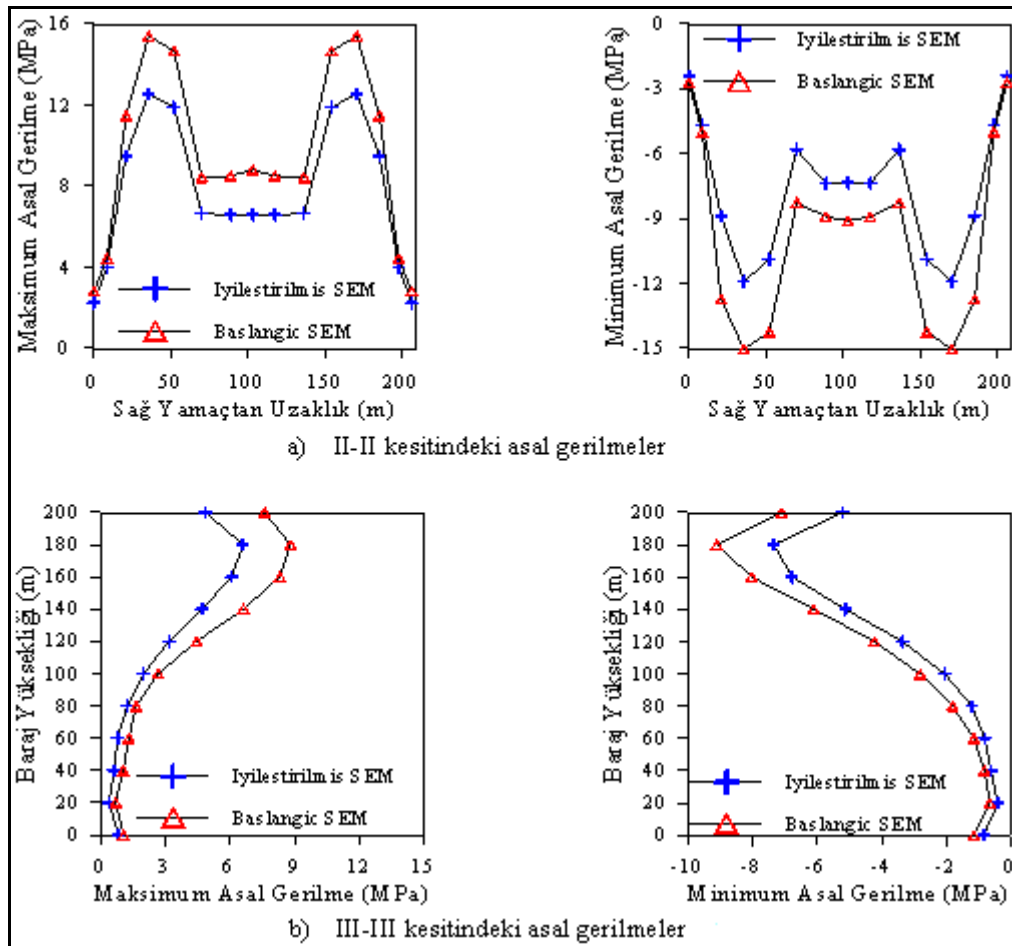


Şekil 131. 83 no'lu düğüm noktasında elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



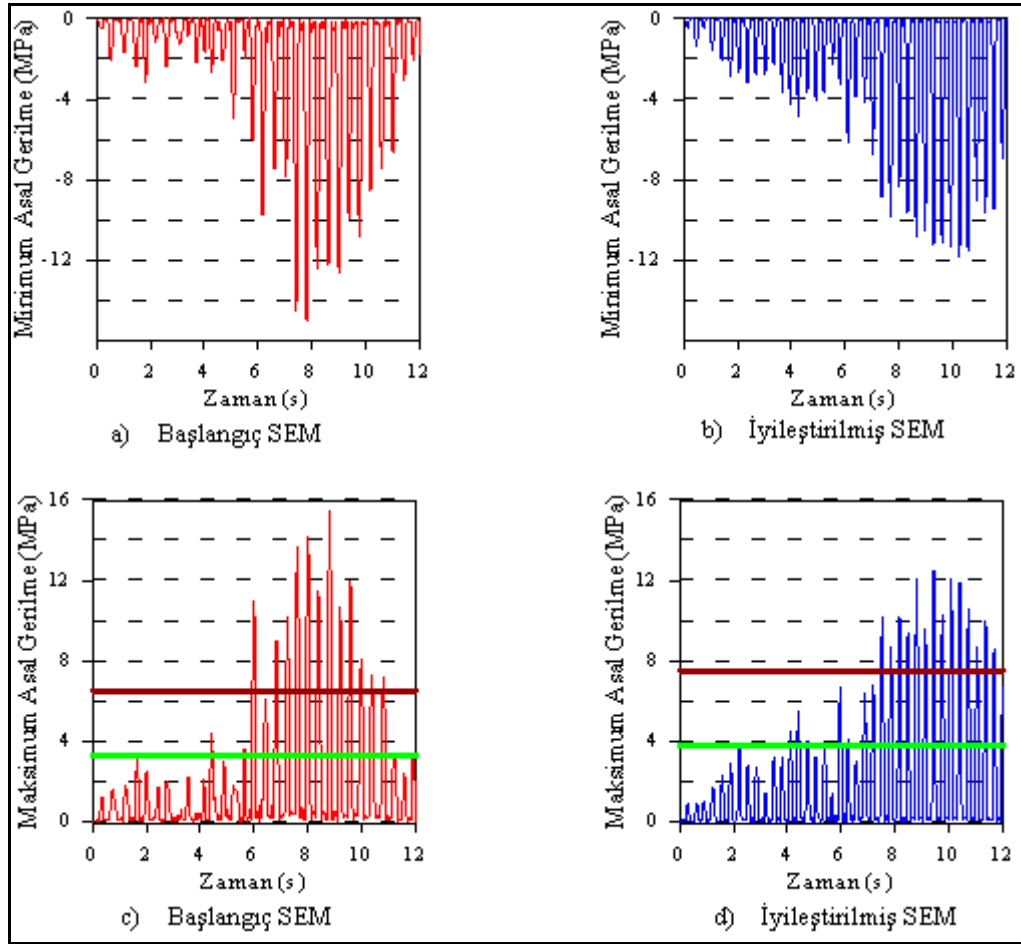
### 2.3.5.2. Gerilmeler

Berke Barajı'nın, II-II ve III-III kesitleri boyunca elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla Şekil 132(a-b)'de verilmektedir. Şekil 132a'dan görüldüğü üzere, maksimum ve minimum asal gerilmeler yamaçlardan baraj gövdesine doğru ilk 40 m'lik mesafede hızla artmakta; 40 m'den sonra anahtar kesite kadar biraz azalmaktadır. Şekil 132b incelendiğinde, maksimum ve minimum asal gerilmeler baraj yüksekliği boyunca genellikle arttığı, 180 m kotunda en büyük değeri aldığı ve krette ise biraz azaldığı görülmektedir. Başlangıç modeli için elde edilen asal gerilmelerin, iyileştirilmiş modelden elde edilenlerden daha büyük olduğu Şekil 132(a-b)'de görülmektedir.



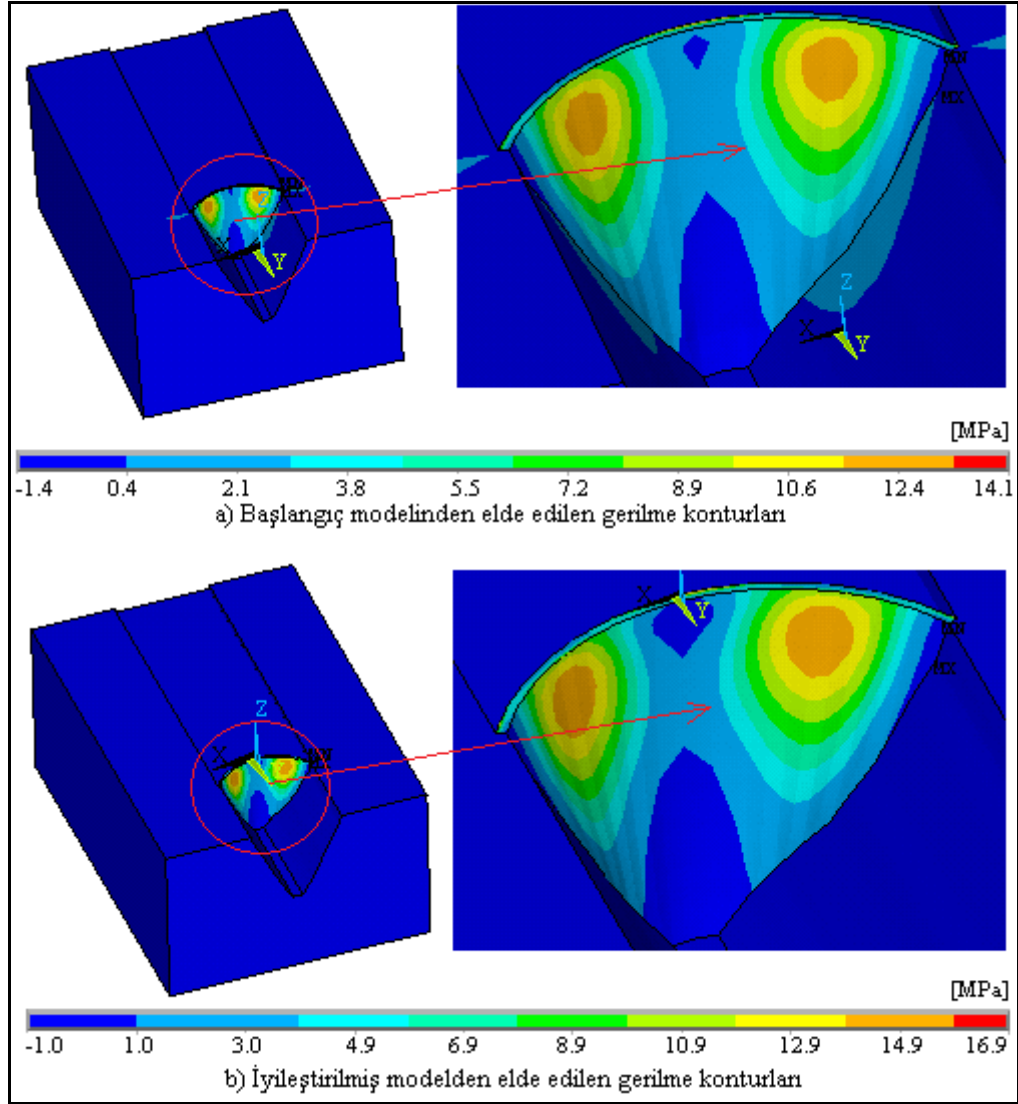
Şekil 132. Berke Barajı'nın a) II-II ve b) III-III kesitinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler

Berke Barajı'nın, 117 no'lu düğüm noktasında elde edilen minimum ve maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 133(a-d)'de verilmektedir. Şekil 133'te görüldüğü üzere, başlangıç modeli için elde edilen gerilmelerin zamanla değişimi iyileştirilmiş modelden elde edilenlerden farklıdır.



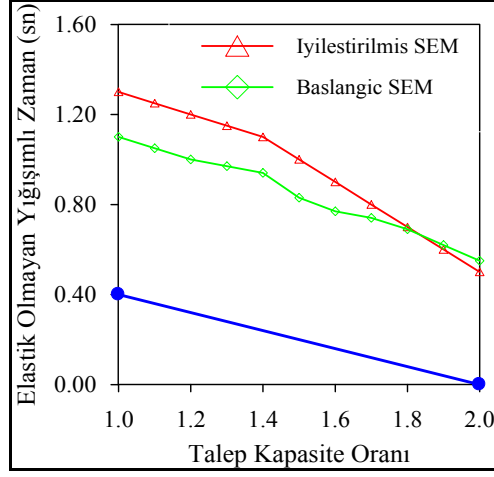
Şekil 133. Berke Barajı'nın 117 no'lu düğüm noktasında elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş modelinden elde edilen maksimum asal gerilme konturları Şekil 134'te verilmektedir. Buradaki gerilme konturları, barajda en büyük gerilmenin oluştuğu andaki gerilme dağılımını göstermektedir. Şekil 134'te görüldüğü gibi, en büyük gerilmeler 117 no'lu düğüm noktası etrafında oluşmaktadır.



Şekil 134. Berke Barajı'nın a) başlangıç b) iyileştirilmiş sonlu eleman modelinden elde edilen maksimum asal gerilme konturları

Şekil 133(c-d)'de çizilen maksimum asal gerilmeler performans eğrisinin hesabında kullanılmaktadır. Berke Barajı'nın yapısal performansının belirlenmesinde kullanılan, betonun çekme gerilme dayanımı iyileştirilmiş model için 3.75 MPa, başlangıç modeli için ise 3.25 MPa seçilmiştir. Berke Barajı'nın seçilen çekme dayanımlarına bağlı olarak elde edilen performans eğrileri iyileştirilmiş ve başlangıç sonlu eleman modelleri için Şekil 135'te verilmektedir. Şekil 135'te görüldüğü gibi iyileştirilmiş model için elde edilen yığışlı zaman, başlangıç modeli için elde edilen yığışlı zamandan daha fazladır. Ayrıca, hem iyileştirilmiş hem de başlangıç modeli için elde edilen performans eğrileri sınır performans eğrisinin çok üstündedir. Bu durumda her iki model için de lineer olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 135. Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri için performans eğrisi

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kemer barajların dinamik davranışları analitik ve deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar, laboratuvar ve arazi çalışmaları olarak iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda, 1968 yılında İngiltere’de düzenlenen “Arch Dams” sempozyumunda sunulan barajlardan Tip-1 kemer barajı seçilerek; bu barajın yapı-sıvı-zemin etkileşimi içeren üç boyutlu modeli hem ANSYS yazılımı kullanılarak hem de laboratuvar ortamında oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin farklı rezervuar su yüksekliği ve uzunluğu durumları için analitik modal analizi gerçekleştirilerek barajın doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Analitik dinamik karakteristiklerle kıyaslamak için baraja çevresel ve zorlanmış titreşim testleri uygulanmış ve deneysel dinamik karakteristikler elde edilmiştir. Tez çalışmasının ikinci kısmında Ülkemizdeki en büyük kemer barajı olma özelliğine sahip Berke Barajı’nın dinamik davranışı araştırılmıştır. Bu amaçla Berke Barajı’nın üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve barajın analitik dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Diğer taraftan, Berke Barajı üzerinde gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinden barajın deneysel dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri arasında biraz farklılık bulunan Berke Barajı’nın sonlu eleman modeli deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir. Berke Barajı’nın başlangıç ve iyileştirilmiş modeline deprem ivme kaydı uygulanarak, barajın her iki durum için deprem davranışı belirlenmiş ve yapısal performansı değerlendirilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

✓ Tip-1 kemer barajına, farklı rezervuar su yüksekliği durumları için uygulanan çevresel titreşim testlerinden toplanan sinyallerin GFOA ve SAB yöntemlerine göre ayrıştırılması durumunda elde edilen dinamik karakteristikler birbirine çok yakın elde edilmiştir. Bu durum her iki yöntemin sonuçlarının birbirine göre doğru olduğunu göstermektedir.

✓ Tip-1 kemer barajına farklı rezervuar su yüksekliği durumları için uygulanan zorlanmış ve çevresel titreşim testlerinden elde edilen doğal frekanslar birbirine çok yakın elde edilmiştir. Bu durum her iki yöntemin sonuçlarının birbirine göre doğru olduğunu göstermektedir.

✓ Tip-1 kemer barajının, farklı rezervuar su yüksekliği durumları için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekansları birbirleriyle hemen hemen örtüşmektedir. Bu durum, oluşturulan analitik modellerin Tip-1 kemer barajının dinamik davranışını gerçekçi bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

✓ Hem analitik hem de deneysel çalışmalarda rezervuarın, baraj yüksekliğinin yarısına kadar doğal frekansları pek değiştirmedeği; yarı yükseklikten krete kadar olan kısımda ise doğal frekanslarda önemli bir miktar azalma olduğu tespit edilmiştir. Rezervuarın tam dolu olması durumunda elde edilen analitik ve deneysel doğal frekanslar, rezervuarın boş olması durumuna göre yaklaşık %20-30 azalmaktadır.

✓ Tip-1 kemer barajının analitik modal analizinden elde edilen ilk dokuz doğal frekans, rezervuarın boş olması durumunda 348-836 Hz arasında; rezervuarın tam dolu olması durumunda ise 252-723 Hz arasında bulunmuştur. Tip-1 kemer barajına uygulanan çevresel ve zorlanmış titreşim testlerinden, rezervuarın boş olması durumunda ilk altı frekans 339-839, rezervuarın tam dolu olması durumunda ise ilk dört doğal frekans 268-498 Hz arasında bulunmuştur. Burada bulunan frekans değerleri Tip-1 kemer barajının çok rijit olduğunu göstermektedir. Eğer Tip-1 kemer barajının boyutları 100 kat büyük seçilseydi barajın frekansları yaklaşık 100 kat küçük bulunacaktı.

✓ Tip-1 kemer barajına 0-1600 Hz arası için uygulanan çevresel ve zorlanmış titreşim testlerinden, rezervuarın boş olması durumunda 10-12 doğal frekans elde edilirken, rezervuarın tam dolu olması durumunda sadece 4-5 doğal frekans elde edilebilmiştir. Bu durum barajda oluşan titreşimlerin rezervuarda su bulunması durumunda sönümlendiğini ve buna bağlı olarak yüksek frekanslı modların etkisinin kaybolduğunu göstermektedir.

✓ Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar su yüksekliği durumları için gerçekleştirilen analitik modal analizlerinden elde edilen mod şekilleri; simetrik eğilme, anti-simetrik eğilme ve düşey eğilme modlarıdır. Çevresel titreşim testlerinden elde edilen mod şekilleri ise sadece simetrik eğilme ve anti-simetrik eğilme modlarıdır. Tip-1 kemer barajının düşey doğrultuda memba-mansap doğrultusuna göre çok rijit olması, kullanılan PULSE yazılımının üç boyutlu model oluşturmada yetersiz kalması gibi sebeplerden dolayı düşey eğilme modları elde edilememiştir. Fakat bu durum çok önemli değildir. Çünkü baraj davranışını temsil eden asıl modlar genellikle simetrik ve anti-simetrik yatay eğilme modlarıdır.

✓ Tip-1 kemer barajının, farklı rezervuar su yüksekliği durumları için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen mod şekilleri birbirleriyle

çok yakın elde edilmiştir. Analitik ve deneysel modları karşılaştırmak için verilen modal güvence kriterlerine göre bu yakınlık %90-100 arasında olup; bu değer, analitik ve deneysel modların birbiriyle çok uyumlu olduğunu göstermektedir.

✓ Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar su yüksekliği için gerçekleştirilen analitik modal analizinden elde edilen mod şekilleri birbirinin aynısı elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle her bir rezervuar yüksekliği durumu için elde edilen mod şekil vektörleri birbirine eşit ve modal güvence kriteri 1'dir. Benzer durum çevresel titreşim testlerinden elde edilen mod şekilleri için de geçerlidir.

Yukarıda verilen sonuçlara göre, farklı rezervuar yüksekliklerinin Tip-1 kemer barajının mod şekillerini değiştirmede fakat doğal frekansları üzerinde önemli bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır.

✓ Tip-1 kemer barajına, farklı rezervuar su yüksekliği durumları için uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen sönüm oranları rezervuar yüksekliği boyunca değişkenlik göstermektedir. Rezervuarın boş olması durumunda Tip-1 kemer barajının sönüm oranları %1-2 civarında elde edilirken; rezervuarın tam dolu olması durumunda %1-8 civarında elde edilmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi, rezervuarın tam dolu olması durumunda Tip-1 barajının davranışı önemli ölçüde etkilenmekte ve karmaşık bir hale gelmektedir. Diğer taraftan, rezervuarın boş olması durumunda elde edilen %1-2 civarındaki sönüm oranı gerçek kemer barajlardakine benzerlik göstermektedir.

✓ Tip-1 kemer barajının, farklı rezervuar su uzunluğu durumları için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekansları ve mod şekilleri birbirleriyle hemen hemen örtüşmektedir. Tip-1 kemer barajının analitik ve deneysel doğal frekansları, rezervuarda H uzunluğunda su olması durumunda %20-25 azalmakta, 2H ve 3H için doğal frekanslar azalmakla birlikte çok fazla değişmemektedir. Buradan, 2H ve 3H rezervuar uzunluklarının Tip-1 kemer barajının doğal frekanslarını azalttığı fakat bu azalıştaki oranın bir önceki rezervuar uzunluğuna göre daha az olduğu anlaşılmaktadır. Hatta 3H rezervuar uzunluğunda, deneysel doğal frekanslarda azda olsa artış olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi her bir rezervuar uzunluğu için çevresel titreşim testlerinin farklı zamanlarda gerçekleştirilmesidir. Tip-1 kemer barajının kemer kısmı çok narin olması ve bu kısımdaki betonda zamana bağlı rötne, sünme olması veya betonun zamanla dayanımının artması gibi durumlar betonun elastisite modülünde azalma ve artmalara neden olmaktadır.

✓ Berke Barajı için gerçekleştirilen analitik modal analizden simetrik eğilme, anti-simetrik eğilme, düşey eğilme modları elde edilirken; çevresel titreşim testlerinden sadece simetrik eğilme ve anti-simetrik eğilme modları elde edilmiştir.

✓ Berke Barajı için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen doğal frekanslar arasında %15-20 civarında farklılık bulunmaktadır. Dolayısıyla, Berke Barajı'nın sonlu eleman modeli malzeme özellikleri kullanılarak deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir.

✓ Berke Barajı'nın iyileştirilen sonlu eleman modelinde simetrik ve anti-simetrik eğilme modlarının yer aldığı ilk altı doğal frekans 2.55-9.77 Hz arasında, ilk altı deneysel doğal frekans 2.75-9.66 Hz arasında bulunmuştur. Analitik ve deneysel doğal frekanslar arasındaki fark %2-3'e kadar azalmıştır.

✓ Berke Barajı'nın iyileştirilen sonlu eleman modelinden elde edilen mod şekilleri ile deneysel mod şekilleri arasında modal güvence kriterine göre %90-100 uyum vardır. Bu durum Berke Barajı için oluşturulan sonlu eleman modelinin barajın gerçek davranışını temsil ettiğini göstermektedir.

✓ Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş modeli üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, baraj yüksekliği boyunca yerdeğiştirmelerin arttığı ve iyileştirilmiş modelde daha büyük yerdeğiştirmeler olduğu tespit edilmiştir.

✓ Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş modeli üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, yamaçlardan kret uzunluğunun yaklaşık altıda birlik kısmına kadar gerilmelerin maksimum büyüklüğe ulaştığı, bu noktadan geri kalan altıda birlik kısma kadar gerilmelerin yarı yarıya azaldığı, bu noktadan anahtar kesite kadar olan kısımda ise gerilmelerin pek değişmediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Berke Barajı'nda en büyük gerilmeler kretin yaklaşık 20 m altında ve yamaçlardan 40-45 m uzaklıkta meydana gelmiştir.

✓ Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş modeli üzerinde gerçekleştirilen lineer analizlerden, barajda betonun çekme dayanımını aşan çekme gerilmelerinin olduğu tespit edilmiştir. Berke Barajı'nın, çekme gerilmelerine göre çizilen performans eğrisinden, barajın davranışını gerçekçi olarak belirleyebilmek için lineer olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Genel olarak Berke Barajı'nın lineer analizlerinden elde edilen yerdeğiştirme ve gerilmeler iyileştirilmiş model için daha büyük elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre sonlu eleman model iyileştirmesinin çok önemli olduğu anlaşılmaktadır.



Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, çevresel ve zorlanmış titreşim yöntemlerini içeren Deneysel Modal Analiz, kemer barajların dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde etkin bir işleve sahiptir. Dolayısıyla, kemer barajlar için oluşturulacak sonlu eleman modellerinin doğruluğunu kontrol etmek için barajların deneysel modal analizinin gerçekleştirilmesi çok önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Tip-1 kemer barajının laboratuvar modeli için gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışma sonuçlarının gerçek barajlarla ilişkisi araştırılabilir. Böylelikle, mevcut barajların davranışları küçültülmüş modelleri üzerinden belirlenebilir.

- Bu çalışmada, Tip-1 kemer barajı gövdesi ve temeli tamamen betondan inşa edilmiştir. Beton yerine kemer için farklı, temel için farklı bir malzeme kullanılarak barajın davranışı araştırılabilir.

- Bu çalışmada, Tip-1 kemer barajının farklı rezervuar yüksekliği ve uzunluğu için dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Tip-1 kemer barajı tek eğrilikli bir kemer barajdır. Benzer çalışmalar, farklı geometrilere sahip kemer barajlar için de gerçekleştirilebilir.

- Bu çalışmaya ilave olarak, sarsma masası üzerine yerleştirilecek olan bir kemer barajın deprem davranışı incelenebilir.

- Rezervuarda patlatma etkisi, sediment etkisi, yaz-kış sıcaklığı etkisi gibi durumlardan dolayı baraj davranışı belirlenebilir.

- Bu çalışmada, farklı rezervuar yüksekliği ve uzunluğu durumları incelenmiş, fakat rezervuar modeli sıfır eğimli ve sabit en kesitli olarak dikkate alınmıştır. Benzer çalışmalar rezervuarın farklı eğimli ve farklı en kesitli olması durumları için gerçekleştirilebilir.

- Bu çalışmada, Berke Barajı'na uygulanan çevresel titreşim testlerinden elde edilen dinamik karakteristikler barajın, ölçüm esnasındaki durumunu yansıtmaktadır. Bu ölçümler uzun süreli hale getirilerek baraj davranışı sürekli izlenebilir. Böylece her hangi bir olumsuz durumda gecikmeden müdahale edilebilir.

- Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş modelleri için gerçekleştirilen lineer analiz sonuçları baraj davranışını tam olarak temsil etmemektedir. Dolayısıyla üç yönlü deprem kaydı için Berke Barajı'nın lineer olmayan davranışı belirlenebilir. Ayrıca, Berke Barajı'nın dinamik davranışı sıcaklık, buzlanma vb. gibi farklı yükleme durumları için belirlenebilir.

#### 4. KAYNAKLAR

- ACI 363 R-84, 1993. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI Manuals of Concrete Practice, Detroit, USA.
- Ahmadi, M.T., Izadinia, M. ve Bachmann, H., 2001. A Discrete Crack Joint Model for Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Arch Dam, Computers and Structures, 79, 403-420.
- Akkaş, N., Akay, H.U. ve Yılmaz, Ç., 1979. Applicability of General-Purpose Finite Element Programs in Solid-Fluid Interaction Problems, Computer and Structures, 10, 773-783.
- Akköse, M. ve Dumanoğlu, A.A., 2003. Su Sıkışabilirlik Etkisi Dikkate Alınarak Kemer Baraj-Rezervuar-Zemin Sistemlerinin Deprem Davranışının İncelenmesi, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Mayıs 2003, İstanbul, Bildiriler Kitabı, AT-010.
- Akköse, M., 2004. Lagrange Yaklaşımı ile Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Akköse, M., Dumanoğlu, A.A. ve Tuna, M.E., 2004. Investigation of Hydrodynamic Effects on Linear and Nonlinear Earthquake Responses of Arch Dams by the Lagrangian Approach, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 28, 25-40.
- Akköse, M., Adanur, S., Bayraktar, A. ve Dumanoğlu, A.A., 2007. Elasto-Plastic Earthquake Response of Arch Dams Including Fluid-Structure Interaction by the Lagrangian Approach, Applied Mathematical Modelling, 32, 2396-2412.
- Akköse, M., Bayraktar, A. ve Dumanoğlu, A.A., 2008. Reservoir Water Level Effects on Nonlinear Dynamic Response of Arch Dams, Journal of Fluids and Structures, 24, 418-435.
- Allemang, R.J., 2003. The Modal Assurance Criterion: Twenty Years of Use and Abuse, Sound and Vibration, 37, 8, 14-23.
- Alves, S.W., 2005. Nonlinear Analysis of Pacoima Dam with Spatially Nonuniform Ground Motion, Doktora Tezi, California Institute of Technology Pasadena, USA.
- Alves, S.W. ve Hall, J.F., 2006a. Generation of Spatially Nonuniform Ground Motion for Nonlinear Analysis of a Concrete Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35, 1339-1357.

- Alves, S.W. ve Hall, J.F., 2006b. System Identification of a Concrete Arch Dam and Calibration of Its Finite Element Model, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35, 1321-1377.
- ANSYS, 2008. Swanson Analysis System, USA.
- Arch Dams, 1968. A review of British Research and Development, Proceedings of the Symposium held at the Institution of Civil Engineers, March, London, England.
- Arioğlu, E. ve Arioğlu, N., 2005. Üst ve Alt Yapılarda Beton Karot Deneyleleri ve Değerlendirmesi, Evrim Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- Azmi, M. ve Paultre, P., 2002. Three-Dimensional Analysis of Concrete Dams Including Contraction Joint Non-linearity, Engineering Structures, 24, 757-771.
- Baptista, M.A., Mendes, P. ve Oliveira, S., 2004. Use of Ambient Vibration Tests for Structural Identification: 3 Cases Studies, International Seminar Structural Analysis of Historical Constructions, Portugal.
- Barlett, F.M. ve Macgregor, G.J., 1994. Effect of Moisture Condition on Concrete Core Strengths, ACI Materials Journal, 9, 3, 227-236.
- BS 1881, 1986. Testing Concrete, Part 203: Recommendations for Measurements of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, British Standards Institute, England.
- Bathe, K.J., 1996. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Bayraktar, A., 1995. Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Temel Sistemlerinin Dinamik Davranışı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2007a. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6, 487-502.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Akköse, M. ve Soyluk, K., 2007b. Farklı Yer Hareketlerinin Kemer Barajların Sismik Performansına Etkisi, Birinci Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, Mayıs, Ankara, Bildiriler Kitabı.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Akköse, M., 2007c. Comparison of Nonlinear Seismic Behavior of Arch Dams to Near-Fault Strong Ground Motion using Westergaard and Lagrangian Approach, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering (AESE2007) Ekim, Süleyman Demirel Üniversitesi, Antalya, Bildiriler Kitabı.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Akköse, M. ve Soyluk, K., 2007d. Rezervuarın Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan Deprem Davranışına Etkisi, Birinci Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, 28-30 Mayıs 2007, Ankara, Türkiye

- Bayraktar, A., Sevim, B., Akköse, M. ve Calayır, Y., 2008a. Seismic Damage Assessment of Arch Dam-Reservoir-Foundation System using Demand-Capacity Ratios, Journal of Dam Engineering, 18, 3, 195-216.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Kartal, M.E. ve Türker, T., 2008b. Near-Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Structural Engineering and Mechanics, 8, 3, 411-442.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008c. Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, Journal of Testing and Evaluation, 36, 6, 516-524.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2008d. Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Yapı Dünyası Dergisi, 150, 44-57.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2008e. Kömürhan Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Analitik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, İMO İstanbul Şubesi Bülteni, 98, 10-21.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T., Kartal, M.E., Akköse, M. ve Bilici, Y., 2009a. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Seismic Performance Evaluation of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Journal of Dam Engineering, 19, 1-39
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Kartal, M.E., Türker, T. ve Bilici, Y., 2009b. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Nonlinear Dynamics, 58, 655-673.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Akköse, M., 2009c. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketlerinin Kemer Barajların Deprem Davranışına Etkisi, İkinci Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu 12-14 Mayıs 2009, Eskişehir, Türkiye.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2009d. Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style Reinforced Concrete Minarets for Structural Identification, Experimental Techniques, 33, 2, 65-75.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2009e. Modal Testing, Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 81-89.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2009f. Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 90-99.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Türker, T. ve Domaniç, A., 2009g. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Teknik Dergi, 20, 2, 4675-4700.

- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Yıldırım, F., 2009h. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 1, 37-47.
- Bayraktar, A., Birinci, F., Altunışık, A.C., Türker, T. ve Sevim, B., 2009i. Finite Element Model Updating of Senyuva Historical Arch Bridge using Ambient Vibration Tests, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4, 4, 177-185.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Birinci, F., Sevim, B. ve Türker, T., 2009j. Finite Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, (baskıda).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2009k. Seismic Response of a Historical Masonry Minaret using a FE Model Updated with Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, (baskıda).
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C. ve Sevim, B., 2009l. Evaluation of Blast Effects on Reinforced Concrete Buildings Considering Operational Modal Analysis Results, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (baskıda).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2009m. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge, Journal of Nondestructive Evaluation, (baskıda).
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Adanur, S. ve Akköse, M. 2009n. Experimental and Analytical Modal Analyses of a Prototype Arch Dam-Reservoir-Foundation Model, International Earthquake Symposium Kocaeli 2009, August, Kocaeli, Bildiriler Kitabı.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2010a. Effect of the Model Updating on Earthquake Behavior of Steel Storage Tanks, Journal of Constructional Steel Research, 66, 462-469.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2010b. Earthquake Analysis of Reinforced Concrete Minarets using Ambient Vibration Test Results, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19, 3, 257-273.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010c. Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge based on Experimental Measurements, Journal of Smart Structures and Systems, 6, 4, (baskıda).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2010d. Earthquake Behaviour of Kömürhan Highway Bridge using Validated Finite Element Model, Journal of Testing and Evaluation, (baskıda).
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Şahin, A. ve Özcan, M., 2010e. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Teknik Dergi, (baskıda).

- Bendat, J. ve Piersol, A., 1986. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Bendat, J.S. ve Piersol, A.G., 2004. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3th Edition, John Wiley and Sons, USA.
- Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062, 2, 625-630.
- Brincker, R., Ventura. C.E. ve Andersen, P., 2003. Why Output-Only Modal Testing is a Desirable Tool for a Wide Range of Practical Applications, Proceedings of 21st International Modal Analysis Conference on Structural Dynamics, Kissimmee, Orlando, USA.
- Cabrera, F.M Y. ve Pozzo, E., 1992. Experimental Control of Deformability of Short Term Loadings in Testing Large-Span Pre-Stressed Structures, Materials and Structures, 25, 4, 231-238.
- Calayır, Y., 1994. Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Calayır, Y. ve Karaton, M., 2002. Kemer Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi: Euler ve Lagrange Çözümleri, Turkish Journal Engineering Environmental Science, 26, 179-192.
- Calayır, Y. ve Karaton, M., 2004. Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi, 207, 3085-3103.
- Camara, R.J., 2000. A Method for Coupled Arch Dam-Foundation-Reservoir Seismic Behaviour Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29, 441-460.
- Caetano, E., 2000. Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal.
- Cantieni, R., 2001. Assessing a Dam's Structural Properties using Forced Vibration Testing. Proc. IABSE International Conference on Safety, Risk and Reliability-Trends in Engineering, Malta.
- Chanson, H. ve James, P., 1998. Rapid Reservoir Sedimentation of Four Historic Thin Arch Dams in Australia, Journal of Performance of Constructed Facilities, 12, 2, 85-92.
- Chen, S.H., Xu, M.Y., Shahrour, I. ve Egger, P., 2003. Analysis of Arch Dams using Coupled Trial Load and Block Element Methods, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129, 977-986.

- Chopra, A.K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- Chouinard, L.E., Bennett, D.W. ve Feknous, N., 1995. Statistical Analysis of Monitoring Data for Concrete Arch Dams, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 9, 286-301.
- Chuhan, Z., Chengda, Y. ve Guanglun, W., 2001. Numerical Simulation of Reservoir Sediment and Effects on Hydro-Dynamic Response of Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30,1817-1837.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., 2003. Dynamics of Structures, Third Edition, Computers and Structures Inc, Berkeley, USA.
- Cooper, D.R., Fagerburg, T.L., Waller, T.N., Guy, S.W. ve Tuthill, A., 2001. Monitoring of Marseilles Dam Submersible Gates, Illinois River, Illinois, US Army Corps of Engineers.
- CP 110, 1972. Code of Practice for the Structural Use of Concrete, British Standards Institute, England.
- Curtis, D.D., Aglawe, J.P., Kollgaard, E.B., Bowes, D.E. ve Fischer, S.H., 2003. Non-Linear Static and Dynamic Analysis of the Cushman Arch Dams Using Distinct Elements, 23rd USSD Annual Meeting and Conference Proceedings, USA.
- Darbre, G.R., 1995. Strong-Motion Instrumentation of Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 1101-1111.
- Darbre, G.R., Smet, C.A. ve M., Kraemer, C., 2000. Natural Frequencies Measured from Ambient Vibration Response of the Arch Dam of Mauvoisin, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29, 577-586.
- Darbre, G.R. ve Proulx, J., 2002. Continuous Ambient-Vibration Monitoring of the Arch Dam of Mauvoisin, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 475-480.
- Debessay, M., 1989. Random Dynamic Interaction Arch Dam-Reservoir-Foundation System, Doktora Tezi, University of Delaware, Newark, USA.
- Dominguez, J. ve Maeso, O., 1993a. Earthquake Analysis of Arch Dams I: Dam-Water-Foundation Interaction, Journal of Engineering Mechanics, 119, 496-512.
- Dominguez, J. ve Maeso, O., 1993b. Earthquake Analysis of Arch Dams II: Dam-Water-Foundation Interaction, Journal of Engineering Mechanics, 119, 513-530.
- Dowling M.J., 1988. Nonlinear Seismic Analysis of Arch Dams, Doktora Tezi, California Institute of Technology Pasadena, USA.
- DSİ, 2009. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

- Du, X., Zhang, Y. ve Zhang, B., 2007. Nonlinear Seismic Response Analysis of Arch Dam-Foundation Systems-Part I: Dam-Foundation Rock Interaction, Bulletin Earthquake Engineering, 5, 105-119.
- Dungar, R., 1978. An Efficient Method of Fluid-Structure Coupling in the Dynamic Analysis of Structures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, 93-107.
- Duron, Z.H. ve Hall, J.F. 1988. Experimental and Finite Element Studies of the Forced Vibration Response of Morrow Point Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 16, 1021-1039.
- Duron, Z.H., Matheu, E.E. ve Hall, R.L., 2003. The Value Added of Field Testing on Concrete Dams, 35th Joint Meeting Panel on Wind and Seismic Effects, Japan.
- Eibl, J. 1995. Concrete Structures, Euro Design Handbook, Ernst and Sohn Publishing, Kalsruhe, Germany.
- El-Borgi, S., Smaoui, H., Cherif, F., Bahlous, S. ve Ghrairi, A., 2004. Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge, Emirates Journal for Engineering Research, 9, 2, 29-34.
- Elkhodary, M.A., 1984. Boundary Element Analysis of Hydrodynamic Pressure on Arch Dams, Yüksek Lisans Tezi, Carleton University, Canada.
- Espandar, R. ve Lotfi, V., 2003. Comparison of Non-orthogonal Smeared Crack and Plasticity Models for Dynamic Analysis of Concrete Arch Dams, Computers and Structures, 81, 1461-1474.
- Ewins, D.J., 2000. Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd. England.
- Feng, L.M., Pekau, O.A. ve Zhang, C.H., 1996. Cracking Analysis of Arch Dams by 3D Boundary Element Method, Journal of Structural Engineering, ASCE, 122, 6, 691-699.
- Fenves, G.L., Mojtahedi, S. ve Reimer, R.B., 1992. Effect of Contraction Joints on Earthquake Response of an Arch Dam, Journal of Structural Engineering, 118, 4, 1039-1055.
- Fok, K.L. ve Chopra, A.K., 1985. Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams, Earthquake Engineering Research Center Report No: UCB/EERC-85/07, University of California, Berkeley, USA.
- Fok, K.L. ve Chopra, A.K., 1986. Earthquake Analysis of Concrete Arch Dams Including Dam-Water Interaction, Reservoir Boundary Absorption and Foundation Flexibility, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 114, 155-184.



- Friswell, M.I. ve Mottershead, J.E., 1995. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, Solid Mechanics and Its Applications, Kluwer Academic Publishers Group, 1-286, ISBN 978-0-7923-3431-6.
- Ghanaat, Y., Clough, R.W. ve Redpath, B.B., 1992. Experimental Study of Dam-Water-Foundation Interaction, Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Spain.
- Ghanaat, Y., Hall, R.L. ve Redpath, B.B., 2000a. Measurement of Dynamic Response of Arch Dams Including Interaction Effects, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Ghanaat, Y., Hall, R.L. ve Redpath, B.B., 2000b. Measurement and Computation of Dynamic Response of Arch Dams Including Interaction Effects, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 2, 3, 1-19.
- Ghanaat, Y., 2002. Seismic Performance and Damage Criteria for Concrete Dams, Proceedings of the 3rd US-Japan Workshop on Advanced Research on Earthquake Engineering for Dams, San Diego, California, USA.
- Ghanaat, Y., 2004. Failure Modes Approach to Safety Evaluation of Dams, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, Paper No: 1115.
- Goodman, R.E., ASCE, M. ve Powell, C., 2003. Investigations of Blocks in Foundations and Abutments of Concrete Dams, Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129, 105-116.
- Greeves, E.J., 1991. The Modelling and Analysis of Linear and Nonlinear Fluid-Structure Systems with Particular Reference to Concrete Dams, Doktora Tezi, Department of Civil Engineering, University of Bristol, England.
- Hall, J.F., 1996. Efficient Nonlinear Seismic Analysis of Arch Dams, Rapor No: EERL 96-01, Pasadena, California, USA.
- Hall, J.F., 1998. Efficient Non-Linear Seismic Analysis of Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1425-1444.
- Hall, J.F. ve Chopra, A.K., 1980. Dynamic Response of Embankment, Concrete-Gravity and Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-80/39, University of California, Berkeley, USA.
- Hall, J.F. ve Chopra, A.K., 1983. Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109, 1, 149-167.
- Heylen, W., Lammens, S. ve Sas, P., 2007. Modal Analysis Theory and Testing, Leuven Katholieke Universtiy, Department of Mechanical Engineering, Leuven, Belgium.

- Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker, R., 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise & Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- Jaishi, B. ve Ren, W.X., 2005. Structural Finite Element Model Updating using Ambient Vibration Test Results, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, 4, 617-628.
- Karaton, M., 2004. Sıvı-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Kemer Barajların Dinamik Hasar Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Kottenstette, J.T., 1997. Block Theory Techniques Used in Arch Dam Foundation Stability Analysis, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 3-4.
- Lan, S. ve Yang, J., 1997a. Nonlinear Finite Element Analysis of Arch Dam-I: Constitutive Relationship, Advances in Engineering Software, 28, 403-408.
- Lan, S. ve Yang, J., 1997b. Nonlinear Finite Element Analysis of Arch Dam-II. Nonlinear Analysis, Advances in Engineering Software, 28, 409-415.
- Law, S.S., Li, X.Y. ve Lu, Z.R., 2006. Structural Damage Detection from Wavelet Coefficient Sensitivity with Model Errors, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 132, 1077-1087.
- Lemos, J.V., Oliveira, S. ve Mendes, P., 2008. Analysis of the Dynamic Behavior of Cabril Dam Considering the Influence of Contraction Joints, 7th European Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2008, E255, Southampton, England.
- Li, S., Chen, Y., Li, J. ve Yang, J., 2000. The New Method of Arch Dam Stress Calculation and the Application of GTSTRUDL CAE/CAD System, Advances in Engineering Software, 31, 303-307.
- Long, Y., Zhang, C. ve Jin, F., 2008. Numerical Simulation of Reinforcement Strengthening for High-Arch Dams to Resist Strong Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37, 1739-1761.
- Lotfi, V. ve Espandar, R., 2002. An Investigation of Joints Behavior in Seismic Response of Arch Dams, Electronic Journal of Structural Engineering, 1, 17-31.
- Lotfi, V. ve Espandar, R., 2004. Seismic Analysis of Concrete Arch Dams by Combined Discrete Crack and Non-orthogonal Smeared Crack Technique, Engineering Structures, 26, 27-37.
- Maeso, O. ve Dominguez, J., 1993. Earthquake Analysis of Arch Dams.I: Dam-Foundation Interaction, Journal of Engineering Mechanics, 119, 496-512.
- Malla, S. ve Wieland, M., 1999. Analysis of an Arch-Gravity Dam with a Horizontal Crack, Computers and Structures, 72, 267-278.

- Mehta, P.K., 1986. Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey, USA:
- Mendes, P., Oliveira, S., Guerreiro, L., Baptista M.A. ve Costa, A.C., 2004. Dynamic Behaviour of Concrete Dams Monitoring and Modeling, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2126, Vancouver, B.C., Canada.
- Miglietta, L., 1995. Experimental Modal Analysis on the Supporting Structure of the Secondary Mirror of the Binocular Telescope, Large Binocular Telescope Project, Florence, Italy.
- Minemura O., Sakatab, N., Yuyamac, S., Okamotod, U.T. ve Maruyamae, K., 1998. Acoustic Emission Evaluation of an Arch Dam during Construction Cooling and Grouting, Construction and Building Materials, 12, 385-392.
- Mironov, V. ve Pahl, P.J., 2004. A Prismatic Finite Element for Accurate Arch Dam Analysis, International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Weimar.
- Mirzabozorg, H. ve Ghaemian, M., 2005. Non-linear Behavior of Mass Concrete in Three-Dimensional Problems using a Smeared Crack Approach, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34, 247–269.
- Mivehchi, M.R., Ahmadi, M.T. ve Hajmomeni, A., 2003. Effective Techniques for Arch Dam Ambient Vibration Test: Application on Two Iranian Dams, JSEE: Summer, 5, 2, 23-34.
- Modak, S.V., Kundra, T.K. ve Nakra, B.C., 2002. Comparative Study of Model Updating Methods using Experimental Data, Computers and Structures, 80, 5-6, 437-447.
- Morin, P.B., Le'ger, P. ve Tinawi, R., 2002. Seismic Behavior of Post-Tensioned Gravity Dams: Shake Table Experiments and Numerical Simulations, Journal of Structural Engineering, ASCE, 128, 140-252.
- Nasserzarea, J., Leib, Y. ve Eskandari-Shiria, S., 2000. Computation of Natural Frequencies and Mode Shapes of Arch Dams as an Inverse Problem, Advances in Engineering Software, 31, 827-836.
- Neville, G.B., 1984. Notes on ACI 318-83, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, with Design Applications, Portland Cement Association, USA.
- Noble, C.R. ve Nuss, L.K., 2004. Nonlinear Seismic Analysis of Morrow Point Dam, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, Canada.
- Noruziaan, B., 1995. Nonlinear Seismic Analysis of Concrete Arch Dams, Doktora Tezi, Sharif University Technology, Iran.

- Ohmachi, T. ve Jalali, A., 1999. Fundamental Study on Near-Field Effects on Earthquake Response of Arch Dams, Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 1, 1, 1-11
- Oliveira, S. ve Faria, R., 2006. Numerical Simulation of Collapse Scenarios in Reduced Scale Tests of Arch Dams, Engineering Structures, 28, 1430–1439.
- OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark, 2006.
- Overschee, P.V. ve Moor, B.D., 1996. Subspace Identification for Linear Systems: Theory, Implementation and Applications, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Öziş, Ü., 1993. Su Yapıları, Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh-Mim. Fak., Yayın No: 45, İzmir, Türkiye.
- Peeters, B. ve Roeck, G.D., 2000. Reference Based Stochastic Subspace Identification in Civil Engineering, Inverse Problems in Civil Engineering, 8, 47-74.
- Peeters, B., 2000. System Identification and Damage Detection in Civil Engineering, Doktora Tezi, K.U, Leuven, Belgium.
- Priscu, R., Popovici, A., Stematiu, D. ve Stere, C., 1985. Earthquake Engineering for Large Dams, John and Wiley Sons, USA.
- Proulx, J., Paultre, P., Rheault, J. ve Robert, Y., 2001. An Experimental Investigation of Water Level Effects on the Dynamic Behaviour of a Large Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 1147-1166.
- PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark, 2006.
- Ramos, J.L.F.S., 2007. Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures, PhD Thesis, University of Minho, Portugal.
- Reynolds, P., Pavic, A. ve Prichard, S., 2002. Dynamic Analysis and Testing of a High Performance Floor Structure, International Conference on Structural Dynamic Modeling-Test, Analysis, Correlation and Validation, Maderia Island, Portugal.
- Rodrigues, J., 2004. Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil, Doktora Tezi, Engineering Faculty of University of Porto, Portugal.
- Sasaki, T., Kanenawa, K. ve Yamaguchi, Y., 2004. Simple Estimating Method of Damages of Concrete Gravity Dam Based on Linear Dynamic Analysis, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.

- Sevim, B., Akköse, M. ve Bayraktar, A., 2006. Geometri Değişiminin Kemer Barajların Dinamik Davranışına Etkisi, Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 11-13 Ekim 2006, İstanbul, Türkiye, (ACE06-479).
- Sevim, B., Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Akköse, M. ve Calayır, Y., 2010a. Water Length and Height Effects on the Earthquake Behavior of Arch Dam-Reservoir-Foundation Systems, KSCE Journal of Civil Engineering, (baskıda).
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Adanur, S. ve Akköse, M., 2010b. Modal Parameter Identification of a Prototype Arch Dam using Enhanced Frequency Domain Decomposition and Stochastic Subspace Identification Techniques, Journal of Testing and Evaluation, 38, 5, (baskıda).
- Schwarz, B.J. ve Richardson, M.H., 1999. Experimental Modal Analysis, CSI Reliability Week, Orlando, USA
- Shahkarami, A., Delforouzi, M. ve Salarirad, H., 2004. Study of the Compression and Tension Factors of Safety with a 3D Fem Model for an Arch Dam and Rock Foundation: A Case Study of The KarunIII Arch Dam in Iran, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, Paper No: 2B 27.
- Sheibany, F. ve Ghaemian, M., 2006. Effects of Environmental Action on Thermal Stres Analysis of Karaj Concrete Arch Dam, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 132, 532-544.
- Silva, V.D. ve Julio, E.N.S.B., 1997. Computation of Membrane Shapes and Analysis of Arch Dams, Computers and Structures, 64, 849-855.
- Sultanbekov, R.R., 2005. Substantiation of the Strength and Stability of Concrete Dams Based on the Solution of a Nonlinear Three-Dimensional Problem, Power Technology and Engineering, 39, 42-45.
- Sun, X. ve Philip, J., 1997. A Study on Experimental Modal Analysis for Seismic Response Assessment of Underground Facilities, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 491-491.
- Szczesiaka, T., Weberb, B. ve Bachmannb H., 1999. Nonuniform Earthquake Input for Arch Dam–Foundation Interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 18, 487–493.
- Şahin A., 2009. Yapıların Deneysel ve Operasyonel Modal Analizleri için Sayısal Sinyal İşleme, Dinamik Karakteristik Belirleme ve Sonlu Eleman Model İyileştirilme Yazılımları: SignalCAD-ModalCAD- FemUP, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tan, H., 1995. Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams, Doktora Tezi, University of California at Berkeley, USA.

- Tan, H. ve Chopra, A.K., 1995. Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 1453-1474.
- Tan, H. ve Chopra, A.K. 1996. Dam-Foundation Rock Interaction Effects in Earthquake Response of Arch Dams, Journal of Structural Engineering, 122, 528-538.
- Teleghani, B.K. ve Pappa, R.S., 1996. Finite-Element Vibration Analysis and Modal Testing of Graphite Epoxy Tubes and Correlation between the Data, National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Hampton, USA.
- Tosun, H., Zorluer, İ., Orhan, A., Seyrek, E., Savaş, H. ve Türköz, M. 2007. Seismic Hazard and Total Risk Analyses for Large Dams in Euphrates Basin, Turkey, Engineering Geology, 89, 7, 155-170.
- Tosun H. ve Tosun, K. 2009. Total Risk of Large Concrete Dams in Turkey, Waterpower, 16, 1-9, Copyright PennWell Corporation.
- TS 3502, 1981. Betonda Statik Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Tzenkov, A.D., 2001. Seismic Analysis of Concrete Arch Dams with Contraction Joint and Nonlinear Material Models, Yüksek Lisans Tezi, Civil Engineering and Geodesy, University of Architecture, Bulgaria.
- URL-1. [http://www.spektra-dresden.com/images/erreger/APS\\_400\\_Data\\_Sheet\\_en.pdf](http://www.spektra-dresden.com/images/erreger/APS_400_Data_Sheet_en.pdf), 17.01.2010.
- URL-2. <http://www.bksv.com/doc/bp2078.pdf>, 17.01.2010.
- URL-3. <http://www.bksv.com/doc/bp2079.pdf>, 17.01.2010.
- URL-4. <http://mechatronics.colostate.edu/figures/9-50.gif>, 20.10.2010
- URL-5. <http://www.bksv.fr/Products/TransducersConditioning/VibrationTransducers/Accelerometers/4507B005.aspx>, 20.01.2010.
- URL-6. <http://www.bksv.fr/Products/TransducersConditioning/VibrationTransducers/Accelerometers/8340.aspx>, 20.01.2010.
- URL-7. T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi, Deprem Dairesi Başkanlığı, <http://www.deprem.gov.tr/Sarbis/Shared/DepremHaritalari.aspx>, 20.03.2010.
- URL-8. <http://angora.deprem.gov.tr/ftpt.htm>, 16.12. 2009.
- USACE, 1994. Arch Dam Design, Engineering Manuel, 1110-2-2201, USA.

- USACE, 2003. Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures, Engineering and Design, EM 1110-2-6051, USA.
- Valliappan, S., Yazdchi, M. ve Khalili, N., 1999. Seismic Analyses of Arch Dams - A Continuum Damage Mechanics Approach, International Journal for Numerical methods in Engineering, 45, 1695-1724.
- Wang, H. ve Li, D., 2006. Experimental Study of Seismic Overloading of Large Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35, 199-216.
- Wang, B.S. ve He, Z. C., 2007. Crack Detection of Arch Dam using Statistical Neural Network Based on the Reductions of Natural Frequencies, Journal of Sound and Vibration, 302, 1037-1047.
- Wang, H. ve Li, D., 2007. Experimental Study of Dynamic Damage of an Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, 347-366.
- Wen, P.J., Han, Z.C., Ting, W.J. ve Jie, X.Y., 2009. Seismic Damage-Cracking Analysis of Arch Dams using Different Earthquake Input Mechanisms, Sci. China Ser. E-Tech. Sci., 52, 2, 518-529.
- Westergaard, H.M., 1933. Water Pressures on Dams during Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, 418-433.
- Wilson, E.L. ve Khalvati, M., 1983. Finite Elements for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 19, 1657-1668.
- Yu, DJ. ve Ren, WX, 2005. EMD- Based Stochastic Subspace Identification of Structures From Operational Vibration Measurements, Engineering Structures, 27, 1741-1751.
- Zhang, L., Brincker, R. ve Andersen, P., 2002. An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, B&K Technical Paper, 152–161.
- Zhong, H., Lin, G. ve Li, H., 2009. Numerical Simulation of Damage in High Arch Dam due to Earthquake, Front. Archit. Civ. Eng. China, 3, 3, 316-322.
- Zhou, J., Lin, G., Zhu, T., Jefferson, A.D. ve Williams, F.W., 2000. Experimental Investigation into Seismic Failure of High Arch Dams, Journal of Structural Engineering, ASCE, 126, 926-935.
- Zienkiewicz, O.C., 1964. Hydrodynamic Pressures Due to Earthquakes, Water Power, 16, 9, 381-388.
- Zienkiewicz, O.C. ve Taylor, R.L., 2000. The Finite Element Method, Fifth Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, England.
- Ziyad, D., 1988. Experimental and Finite Element Studies of a Large Arch Dams, Doktora Tezi, California Institute of Technology, USA.

## ÖZGEÇMİŞ

**Barış SEVİM**, 1982 yılında Trabzon’da doğdu. İlk okulu 1988-1993 yılları arasında İstanbul Sultanbeyli Ahmet Yener İlkokulu’nda, orta okulu 1993-1996 yılları arasında İstanbul Sultanbeyli Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu’nda, orta öğrenimini ise 1996-2000 yılları arasında İstanbul Üsküdar Haydarpaşa Lisesi’nde tamamladı. 2000 yılında girdiği Öğrenci Seçme Sınavı’nda gösterdiği başarı sonucu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde “Lisans” eğitimi almaya hak kazandı. Lisans eğitimini 18/06/2004 tarihinde tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda “Doktora” eğitimine başladı ve 2005 yılında Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2009 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi’ndeki görevinden ayrılarak Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne Araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevi sürdürmekte olan SEVİM iyi derecede İngilizce bilmektedir. Bugüne kadar birçok akademik çalışma yapan SEVİM’e ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

- **Sevim, B.**, Akköse, M. ve Bayraktar, A., 2006. Geometri Değişiminin Kemer Barajların Dinamik Davranışına Etkisi, Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 11-13 Ekim, İstanbul, Türkiye, (ACE06-479).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2007. Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge, Steel and Composite Structures, 7, 6 487-502.
- Bayraktar, A., Türker T., **Sevim, B.** ve Altunışık A.C., 2007. Evaluation of Blasting Effects on Masonry Buildings By Operational Modal Analysis, International Colloquium on Seismic Design and Retrofit of Masonry Structures, 7-9 May, Istanbul Technical University, Turkey.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve **Sevim, B.**, 2007. Elektrik İletim Kablolarının Çelik Direklerin Dinamik Karakteristiklerine Etkisinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile Belirlenmesi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, 10-11 Mayıs, Eskişehir, Türkiye, 58-65.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C. ve **Sevim, B.**, 2007. Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, 2. Çelik Yapılar Ulusal Sempozyumu, 10-11 Mayıs, Eskişehir, Türkiye, 273-281.



- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Akköse, M. ve Soyluk, K., 2007. Farklı Yer Hareketlerinin Kemer Barajların Sismik Performansına Etkisi, Uluslararası Katılımlı I. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, 28-30 Mayıs, Ankara, Türkiye, 215-226.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Akköse, M. ve Soyluk, K., 2007. Rezervuarın Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan Deprem Davranışına Etkisi, Uluslararası Katılımlı I. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, 28-30 Mayıs, Ankara, Türkiye, 409-421.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2007. Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, 27-29 Eylül, Ankara, Türkiye, 415-428.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve **Sevim, B.**, 2007. Tarihi Yığma Köprülerin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1, 27-29 Eylül, Ankara, Türkiye, 429-440.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T. ve **Sevim, B.**, 2007. Tarihi Köprülerin Deprem Davranışına Sonlu Eleman Model İyileştirmesinin Etkisi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim, İstanbul, Türkiye, 2, 29-39.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Türker, T., Ateş, Ş. ve Adanur, S., 2007. Determination of Earthquake Behaviour of Highway Bridges by Operational Modal Analysis, International Earthquake Symposium Kocaeli 2007, 22-24 October, Kocaeli, Turkey.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C. ve **Sevim, B.**, 2007. The Determination of Model Updating Effects on Earthquake Behaviour of Masonry Buildings, International Earthquake Symposium Kocaeli 2007, 22-24 October, Kocaeli, Turkey.
- Bayraktar, A., Türker, T., **Sevim, B.** ve Altunışık, A.C., 2007. Determination of Dynamic Characteristics of Steel Footbridges by Analytical and Experimental Modal Analyses, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering AESE 2007, October 24-26, Isparta-Antalya, Turkey, pp. 163-172.
- Bayraktar, A., Türker, T., **Sevim, B.** ve Altunışık, A.C., 2007. Determination of Dynamic Characteristics of Turkish Style RC Minarets by Analytical and Experimental Modal Analyses, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering AESE 2007, October 24-26, Isparta-Antalya, Turkey, pp. 185-194.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.** ve Ateş, Ş., 2007. Effects of Pulse Signal of Near-Fault Strong Ground Motion on Nonlinear Response of Concrete Gravity Dam-Reservoir-Foundation Systems, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering AESE 2007, October 24-26, Isparta-Antalya, Turkey, pp. 370-382.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C. ve Akköse, M., 2007. Comparison of Nonlinear Seismic Behavior of Arch Dams to Near-Fault Strong Ground Motion using

Westergaard and Lagrangian Approaches, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering AESE 2007, October 24-26, Isparta-Antalya, Turkey, pp. 393-405.

- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C., Kartal, M.E. ve Türker, T., 2007. Seismic Performance Evaluation of Concrete Dams, *Dam Safety* (edited by Zekai ŞEN), Turkish Water Foundation, İstanbul, November 5-15, ISBN:978-075-6455-31-9, pp. 173-198.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Türker, T., **Sevim, B.** ve Ateş, Ş., 2007. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Modellerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle İyileştirilmesi, 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, 29-30 Kasım, Antalya, Türkiye, 355-364.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Akköse, M. ve Calayır, Y., 2008. Seismic Damage Assessment of Arch Dam-Reservoir-Foundation System using Demand-Capacity Ratios, *Journal of Dam Engineering*, 18, 3, 195-216.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Kartal, M.E. ve Türker, T., 2008. Near-Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, *Structural Engineering and Mechanics*, 8, 3, 411-442.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Türker, T., Akköse, M. ve Coşkun, N., 2008. Modal Analysis, Experimental Validation and Calibration of a Historical Masonry Minaret, *Journal of Testing and Evaluation*, 36, 6, 516-524.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Akköse, M. ve Calayır, Y., 2008. Seismic Damage Assessment at a Coupled Dam System using DCRs, *International Water Power and Dam Construction*.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2008. Köprülerin Dinamik Karakteristiklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, *Yapı Dünyası Dergisi*, 150, 44-57.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2008. Kömürhan Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Analitik ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, *İMO İstanbul Şubesi Bülteni*, 98, 10-21.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Türker, T., Adanur, S. ve Ateş, Ş., 2008. Ambient Vibration Testing of Steel Footbridges for Structural Identification, *Proceedings of the Fifth International Engineering and Construction Conference (IECC'5)*, August 27-29, Irvine, USA, 87-94.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C., Türker, T., Adanur, S. ve Akköse, M., 2008. Finite Element Model Updating of Fluid-Structure Interaction Systems using Operational Modal Analysis, *Proceedings of the Fifth International Engineering and Construction Conference (IECC'5)*, August 27-29, Irvine, USA, 849-858.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C., Türker, T. ve Adanur, S., 2008. Determination of Blast Vibration Effects on the Dynamic Behaviour of the Highway

Bridges using Modal Testing, Eighth International Congress on Advances in Civil Engineering, September 15-17, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus (ACE08-158), Vol.3, pp.557-565.

- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2009. Analytical and Operational Modal Analyses of Turkish Style Reinforced Concrete Minarets for Structural Identification, Experimental Techniques, 33, 2, 65-75.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Kartal, M.E., Türker, T. ve Bilici, Y., 2009. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Nonlinear Dynamics, 58, 655-673.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C., Türker, T., Kartal, M.E., Akköse, M. ve Bilici, Y., 2009. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Seismic Performance Evaluation of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Journal of Dam Engineering, 19, 1-39
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2009. Modal Testing, Finite Element Model Updating and Dynamic Analysis of an Arch Type Steel Footbridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 81-89.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Türker, T., Domaniç, A. ve Taş, Y., 2009. Vibration Characteristics of Kömürhan Highway Bridge Constructed with Balanced Cantilever Method, Journal of Performance of Constructed Facilities, 23, 2, 90-99.
- Bayraktar, A., Türker, T., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C. ve Yıldırım, F., 2009. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test, Journal of Nondestructive Evaluation, 28, 1, 37-47.
- Bayraktar, A., Birinci, F., Altunışık, A.C., Türker, T. ve **Sevim, B.**, 2009. Finite Element Model Updating of Senyuva Historical Arch Bridge using Ambient Vibration Tests, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 4, 4, 177-185.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Birinci, F., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2009. Finite Element Analysis and Vibration Testing of a Two-Span Masonry Arch Bridge, Journal of Performance of Constructed Facilities, (baskıda).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2009. Seismic Response of a Historical Masonry Minaret using a FE Model Updated with Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, (baskıda).
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C. ve **Sevim, B.**, 2009. Evaluation of Blast Effects on Reinforced Concrete Buildings Considering Operational Modal Analysis Results, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (baskıda).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2009. Ambient Vibration Tests of a Steel Footbridge, Journal of Nondestructive Evaluation, (baskıda).

- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Türker, T. ve Domaniç, A., 2009. Kömürhan Köprüsünün Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi, Teknik Dergi, 20, 2, 4675-4700.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Adanur, S. ve Domaniç, A., 2009. Karayolu Köprülerinin Sonlu Eleman Analizinde Yapım Aşamalarının ve Zamana Bağlı Deformasyonların Dikkate Alınması, Yapı Dünyası Dergisi, 161, 11-15.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C. ve Akköse, M., 2009. Yakın ve Uzak Fay Yer Hareketlerinin Kemer Barajların Deprem Davranışına Etkisi, İkinci Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu 12-14 Mayıs, Eskişehir, Türkiye.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C., Adanur, S. ve Akköse, M., 2009. Experimental and Analytical Modal Analyses of A Prototype Arch Dam-Reservoir-Foundation Model, International Earthquake Symposium Kocaeli 2009, 17-19 August, Kocaeli, Turkey.
- Bayraktar, A., Türker, T., Şahin, A., Altunışık, A.C. ve **Sevim, B.**, 2009. Betonarme Binalarda İnşa Aşamalarının Dinamik Karakteristiklere Etkisinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, 1-2 October, Sakarya, Turkey, 29-39.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2009. Kömürhan Köprüsünün Deprem Davranışına Sonlu Eleman Model İyileştirilmesinin Etkisi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, 1-2 October, Sakarya, Turkey, 119-129.
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Domaniç, A. ve Adanur, S., 2009. Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Köprülerin Davranışlarının Belirlenmesi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, 1-2 October, Sakarya, Turkey, 209-219.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Birinci, F., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2009. Tarihi Şenyuva Köprüsünün Dinamik Karakteristiklerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Sakarya International Symposium of Earthquake Engineering, 1-2 October, Sakarya, Turkey, 609-619.
- Adanur, S., Bayraktar, A., Altunışık, A.C. ve **Sevim, B.**, 2009. Asma Köprülerin Lineer Olmayan Davranışına Askı Şekillerinin Etkisi, 3. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu, 8-10 Ekim, Gaziantep, Türkiye, 335-343.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Birinci, F., Özcan, M. ve Türker, T., 2009. Tarihi Mikron Köprüsünün Restorasyon Sonrası Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, 15-17 Ekim, Diyarbakır, Türkiye, 367-378.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Birinci, F., Özcan, M. ve Türker, T., 2009. Osmanlı Tarihi Çift Kemer Köprüsünün Deneysel Titreşim Verilerinin Elde Edilmesi, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, 15-17 Ekim, Diyarbakır, Türkiye, 189-198.

- Bayraktar, A., Altunışık, A.C. ve **Sevim, B.**, 2009. İskenderpaşa Camii Minaresi ve Restorasyon Çalışmaları, Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 2, 15-17 Ekim, Diyarbakır, Türkiye, 669-678.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2010. Effect of the Model Updating on Earthquake Behavior of Steel Storage Tanks, Journal of Constructional Steel Research, 66, 462-469.
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C. ve Türker, T., 2010. Earthquake Analysis of Reinforced Concrete Minarets using Ambient Vibration Test Results, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19, 3, 257-273.
- **Sevim, B.**, Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Adanur, S. ve Akköse, M. 2010. Modal Parameter Identification of a Prototype Arch Dam using Enhanced Frequency Domain Decomposition And Stochastic Subspace Identification Techniques, Journal of Testing and Evaluation, 38, 5, (baskıda).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2010. Finite Element Model Updating of Kömürhan Highway Bridge based on Experimental Measurements, Journal of Smart Structures and Systems, 6, 4, (baskıda).
- **Sevim, B.**, Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Akköse, M. ve Calayır, Y., 2010. Water Length and Height Effects on the Earthquake Behavior of Arch Dam-Reservoir-Foundation Systems. KSCE Journal of Civil Engineering, (baskıda).
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., **Sevim, B.** ve Türker, T., 2010. Earthquake Behaviour of Kömürhan Highway Bridge using Validated Finite Element Model, Journal of Testing and Evaluation, (baskıda).
- Bayraktar, A., **Sevim, B.**, Altunışık, A.C., Sadanur, S. ve Akköse, M., 2010. Ölçeklendirilmiş Bir Kemer Barajın Laboratuvar Modelinin Oluşturulması, DSİ Teknik Bülteni, 107, 1-13.
- Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., **Sevim, B.**, Şahin, A. ve Özcan, M., 2010. Binaların Dinamik Parametrelerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi, Teknik Dergi, (baskıda).
- Bayraktar, A., **Sevim, B.** ve Altunışık, A.C., 2010. Operasyonel Modal Analiz Yöntemi Kullanılarak Berke Barajı'nın Deprem Performansının Belirlenmesi, DSİ Teknik Bülteni, 108, (baskıda).
- **Sevim, B.**, Bayraktar, A. ve Altunışık, A.C., 2010. Finite Element Model Calibration of Berke Arch Dam using Operational Modal Testing, Journal of Vibration and Control, (baskıda).
- Altunışık, A.C., Bayraktar, A. ve **Sevim, B.**, 2010. Output-Only System Identification of Post Tensioned Segmental Concrete Highway Bridges, Journal of Bridge Engineering, (baskıda).