



**BARAJLARDA GÖVDE-SU-ZEMİN ETKİLEŞİMİ
PROBLEMLERİNİN SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE
MODELLENMESİ ve SİSTEMİN DİNAMİK YÜKLER
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Ahmad Yamin RASA

Doç. Dr. Ahmet BUDAK

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2023

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI BİLİM DALI

**BARAJLARDA GÖVDE-SU-ZEMİN ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN SONLU
ELEMEN YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ ve SİSTEMİN DİNAMİK YÜKLER
ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

(Modeling of the Dams Body-Water-Soil Interaction Problems by Finite Element Method and
Investigation of the System Behavior Under Dynamic Loads)

DOKTORA TEZİ

Ahmad Yamin RASA

Danışman: Doç. Dr. Ahmet BUDAK

Erzurum

Haziran, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Ahmad Yamin Rasa tarafından hazırlanan “**Barajlarda Gövde-Su-Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu Eleman Yöntemiyle Modellenmesi ve Sistemin Dinamik Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi**” başlıklı çalışması 06 / 23 / 2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Mustafa YAMAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Ahmet BUDAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. İlker KAZAZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü
Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Doç. Dr. Ahmet BUDAK* danışmanlığında sunulan “**Barajlarda Gövde-Su-Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu Eleman Yöntemiyle Modellenmesi ve Sistemin Dinamik Yükler Altındaki Davranışının İncelenmesi**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	9	30
Materyal ve Yöntem	7	35
Bulgular ve Tartışma	16	20
Sonuç	0	20
Tezin Geneli	17	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ahmad Yamin RASA	Doç. Dr. Ahmet BUDAK
23.6.2023	23.6.2023
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu doktora tez çalışmasında mükemmel gözetimi altında, bana çalışma fırsatı veren, değerli vaktini, bilgisini, teşvik ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Ahmet BUDAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onun yardımı, motivasyonu ve taahhüdü olmasaydı, bu çalışma mümkün olmazdı. Bilgisayar programlamada bana verdiği ipuçlar ve değerli yönlendirmeleri için tekrar teşekkürlerimi ona sunarım.

Tez çalışmam boyunca sık sık bir araya gelerek çalışmalarımı takip eden, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, karşılaştığım problemlere çözümler öneren tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Mustafa YAMAN'a ve Sayın Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN'e, bu çalışmada burs olarak bana maddi desteği sağlayan Tükiye Bursları ve ekiplerine de en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmam süresince gösterdikleri anlayış, sabır ve desteklerinden dolayı değerli anneme Abidah RASA, babama Abdul Rauf RASA, ve kardeşlerime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım. Son olarak zor günlerimde yanımda olan, hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, bana sabreden ve motive eden sevgili eşime Huri RASA ve onunla vaktimi pek sarf edemediğim çocuğum Ömer Hamza RASA'ya sonsuz teşekkür ederim.

Ahmad Yamin RASA

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BARAJLARDA GÖVDE-SU-ZEMİN ETKİLEŞİMİ PROBLEMLERİNİN SONLU ELEMAN YÖNTEMİYLE MODELLENMESİ ve SİSTEMİN DİNAMİK YÜKLER ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ahmad Yamin RASA

Danışman: Doç. Dr. Ahmet BUDAK

Amaç: Bu çalışmada, beton ağırlık barajların iki boyutlu lineer elastik davranışı, zemin ve su ortamlarının etkisi dahilinde incelenmiştir. Baraj gövdesinin dinamik davranışını önemli ölçüde değiştiren ve modellemede dikkate alınması gereken bazı önemli hususlar; örneğin, yakın ortamların boyutu, betonun baraj ömrü boyunca kimyasal ve mekanik etkilerden dolayı bozulması gibi konular üzerinde bir takım parametrik incelemeler yapılmıştır. Ayrıca, bu etkiler dikkate alınarak baraj gövdesinin çeşitli deprem yükleri altındaki sismik performansı ile olası hasar seviyesi incelenmiştir.

Yöntem: Bu problemde, üç farklı ortamın hareket denklemi ilk olarak çıkarılıp, arayüzey sınır şartları dikkate almakla baraj-rezervuar-zemin etkileşimi probleminin sonlu eleman hareket denklemi türetilmiştir. Bu problemde, rezervuar ortamı Lagrange sıvı elemanlarla modellenirken, uzak ortamlar ise sonsuz elemanlarla modellenmiştir. Birleşik hareket denklemi Laplace uzayında direkt yöntemiyle çözülmüştür. Elde edilen kompleks deplasman tepkileri, Laplace dönüşüm yöntemiyle reel tepkilere dönüştürülmüştür. Bu problemin çözümünde çeşitli bilgisayar programları FORTRAN 90 ve MATLAB'te hazırlanmıştır.

Bulgular: Beton ağırlık barajların dinamik yükler altındaki analizi için geliştirilen model, etkin ve zaman analizi açısından hızlı olduğu tespit edilmiştir. Baraj-Rezervuar Etkileşimi (BRE), Baraj-Zemin Etkileşimi (BZE) ve Baraj-Rezervuar-Zemin Etkileşimi (BRZE) problemlerinin sonlu eleman modelinde yakın ortamların boyutu, baraj yüksekliğinin 1,5 katında olması, yeterli derecede doğru sonuçlar verdiği bulunmuştur. Yeni barajların tasarımında veya var olan barajlarda, betonun farklı nedenlerden zaman içerisinde bozulması ve barajlar üzerinde olan etkisi göz ardı edilemez bir konu olduğu anlaşılmıştır.

Sonuç: Beton ağırlık barajların dinamik yükler altındaki davranışı daha etkin ve hızlı bir model geliştirilerek incelenmesinde, yakın ortamların boyutu ve betonun zaman içerisinde farklı nedenlerden dolayı bozulması gibi parametreler, barajın dinamik davranışını önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ağırlık barajlar, yapı-zemin-sıvı etkileşimi, sonlu eleman yöntemi, Lagrange sıvı elemanı, barajların performansı, yaşanan barajların performansı

Haziran 2023, 158 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

MODELING OF THE DAMS BODY-WATER-SOIL INTERACTION PROBLEMS BY FINITE ELEMENT METHOD AND INVESTIGATION OF THE SYSTEM BEHAVIOR UNDER DYNAMIC LOADS

Ahmad Yamin RASA

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet BUDAK

Purpose: In this study, two-dimensional linear elastic behavior of concrete gravity dams was investigated considering soil and water domains. Some important parameters significantly changing the dynamic behavior of the dam; for example, the near-field domains size, deterioration of concrete were included and parametric studies have been done. Considering these aspects, the seismic performance and possible damage level at the dam under various earthquakes were furtherly studied.

Method: In this problem, the equations of motion for three different domains were firstly generated. The finite element equation of motion of the dam-reservoir-soil interaction problem was derived considering dynamic interactions at the interfaces. The reservoir domain was modeled by Lagrangian fluid elements, while unbounded domains were modeled by infinite elements. The equation of motion was solved in Laplace domain using direct method. The obtained complex displacement responses were transformed to real responses using Laplace transformation method. Various computer programs have been developed in FORTRAN 90 and MATLAB.

Findings: The developed numerical model was seen to be efficient and fast. In Dam-Reservoir Interaction (DRI), Dam-Soil Interaction (DSI), and Dam-Reservoir-Soil Interaction (DRSI) problems, the size of near-field domains can be taken as 1.5 times the dam height, and this gave sufficiently accurate results. In the analysis and design of dams, the deterioration of concrete and its effects cannot be ignored.

Results: By presenting this efficient and fast model, it has been observed that parameters such as near-field domains size and the deterioration of concrete significantly change the dynamic behavior of the dam.

Keywords: Gravity dams, soil-structure-fluid interaction, finite element method, Lagrangian fluid element, performance of dams, performance of ageing dams

June 2023, 158 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	xiii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Sıvının Modellenmesi ve Hidrodinamik Basıncı.....	5
Zaman Tanım Alanında Geliştirilen Yöntemler	9
Frekans Tanım Alanında Geliştirilen Yöntemler	12
Birleşik Sistemde Etkileşim Mekanizması ve Enerji Kaybı.....	15
Radyasyon sönümleri	16
Rezervuar alt sınırlarında sönümleri	23
Malzeme sönümü.....	25
Betonun Yaşlanması	26
Literatür Üzerinde Tartışma	27
MATERYAL ve METOT	29
Sıvı Ortamının Lagrange Yaklaşımıyla Modellenmesi	30
Sıvı ortamının temel bağıntıları.....	31
Sıvı ortamının sonlu eleman bağıntıları	33
Ortak Sistemin Hareket Denklemi ve Çözümü	35
Modal analiz yöntemi	37
Direkt yöntem.....	38
Uzak Bölgelerin Sonsuz Elemanlarla Modellenmesi	39
Birleşik Sistemin Yakın Bölgelerinde Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri.....	44
Katı sonlu eleman	44
Sıvı sonlu eleman	46
Hidrodinamik Basınçlar ve Gerilmelerin Hesaplanması	47

Betonun Yaşa Bağlı Bozulma Modeli	50
Bilgisayar Programları.....	52
Doğal frekanslar analizi.....	52
Statik analizi	57
Dinamik analiz.....	59
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	63
Yakın Ortamların Boyutunun Barajın Dinamik Tepkileri Üzerindeki Etkisi.....	65
BRE problemi	67
BZE problemi	71
BRZE problemi	74
Beton Ağırlık Barajların Yaşlanması ve Dinamik Davranışı Üzerindeki Etkisi	82
Yaşlanan BRE problemi	83
Beton Ağırlık Barajların Çeşitli Deprem Yükleri Altındaki Davranışı ve Performansı.....	99
Barajların sismik performans analizi	99
BRE problemi	101
Yaşlanan Beton Ağırlık BRE Probleminin Çeşitli Deprem Yükleri Altındaki Davranışı ve Performansı.....	113
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	126
KAYNAKLAR.....	128
ÖZGEÇMİŞ.....	141

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Rijit sıvı tanka ait modal frekanslarının karşılaştırılması (Hz).....	56
Tablo 2. Koyna barajın doğal frekansları (Hz).....	56
Tablo 3. Sarıyar barajı-rezervuar etkileşim problemin frekansları (Hz)	57
Tablo 4. Sarıyar barajı-rezervuar-temel etkileşim problemin frekansları (Hz)	58
Tablo 5. Sarıyar baraj-zemin etkileşim probleminin statik yük altındaki deplasmanlar (mm).....	58
Tablo 6. BRE ($\alpha=4$) problemine ait ilk iki modal periyodu farklı sonlu eleman ağıyla.....	64
Tablo 7. Modellere ait malzeme özelliği ve boyutları	67
Tablo 8. Birleşik sistemlerin sonlu eleman ağındaki toplam düğüm ve eleman sayısı	84
Tablo 9. Sayısal modelin malzeme özellikleri.....	84
Tablo 10. Yaşlanan baraj modellerinde temel periyot, bozulan elastisite modülü ve topuğundaki maksimum çekme gerilmelerinin karşılaştırılması.....	96
Tablo 11. Deprem verilerinin özellikleri ve Laplace uzayındaki çözüm tekniğine göre düzenlenmesi	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Mühendislik açısından bir probleme yönelik çözüm prosedürü	2
Şekil 2. Cisim dalgaları ve parçacığın hareketi: a) P dalgası; b) S dalgası	39
Şekil 3. Yüzey dalgaları: a) Rayleigh dalgası; b) Love dalgası	40
Şekil 4. Yedi düğümlü sonsuz eleman; a) gerçek eleman, b) referans eleman	42
Şekil 5. Sekiz düğümlü katı sonlu eleman; a) gerçek eleman, b) referans eleman	45
Şekil 6. 4/9 değişken düğüm noktalı sıvı sonlu eleman; a) gerçek eleman, b) referans eleman	46
Şekil 7. 2/3 değişken düğüm noktalı tek boyutlu yüzey sıvı sonlu eleman	47
Şekil 8. Gerilmelerin Gauss noktalarından ekstrapolasyonunda kullanılan tabii koordinatlar	48
Şekil 9. Baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin dinamik analizindeki akış şeması	53
Şekil 10. Rijit sıvı tankının sonlu eleman ağı.....	54
Şekil 11. Rijit sıvı tankının mod şekilleri.....	55
Şekil 12. Sarıyar beton ağırlık barajı-zemin probleminin sonlu eleman ağı.....	59
Şekil 13. 1976 Koyna depremin zamanla değişen ivme grafiği.....	60
Şekil 14. Koyna barajın kret noktasındaki zamanla değişen karşılaştırmalı yatay deplasman grafiği	60
Şekil 15. Koyna baraj-rezervuar etkileşim probleminin karşılaştırmalı kret yatay deplasmanları	60
Şekil 16. Yapının tepe noktasındaki karşılaştırmalı yatay deplasmanları.....	62
Şekil 17. BRE ($\alpha=4$) problemine ait ilk iki modal periyodu farklı sonlu eleman ağıyla	65
Şekil 18. Beton ağırlık barajı, sadece rezervuar, sadece zemin ve rezervuar + zemin ortamlarıyla etkileşim durumları; a) uzak ortamların etkisi dahil edilmemiştir; b) uzak ortamların etkisi dahil edilmiştir	66
Şekil 19. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj memba yüzeyindeki hidrodinamik basınçların dağılımı üzerine etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi	68
Şekil 20. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj kret noktasındaki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi.....	69

Şekil 21. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj memba yüzeyindeki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi (devamı)	70
Şekil 22. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj tabanında meydana gelen basınç ve çekme gerilmelerine etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi	70
Şekil 23. BZE probleminde yakın zemin ortamının boyutunun baraj kret noktasındaki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu zemin ortamı, b) sonlu + sonsuz zemin ortamı	72
Şekil 24. BZE probleminde yakın zemin ortamının boyutunun baraj memba yüzeyindeki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu zemin ortamı, b) sonlu + sonsuz zemin ortamı (devamı)	73
Şekil 25. BZE probleminde yakın zemin ortamının boyutunun baraj tabanında meydana gelen basınç ve çekme gerilmelerine etkisi, a) sadece sonlu zemin ortamı, b) sonlu + sonsuz zemin ortamı	73
Şekil 26. BRZE probleminde yakın ortamların boyutunun baraj memba yüzeyindeki hidrodinamik basıncın dağılımına etkisi, a) sadece sonlu yakın ortamları, b) sonlu + sonsuz ortamları	74
Şekil 27. BRZE probleminde yakın ortamların boyutunun baraj kret noktasındaki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu yakın ortamları, b) sonlu + sonsuz ortamları	75
Şekil 28. BRZE probleminde yakın ortamların boyutunun baraj memba yüzeyindeki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu yakın ortamları, b) sonlu + sonsuz ortamları	76
Şekil 29. BRZE probleminde yakın ortamların boyutunun baraj tabanında meydana gelen basınç ve çekme gerilmelerine etkisi, a) sadece sonlu yakın ortamları, b) sonlu + sonsuz ortamları	77
Şekil 30. Farklı etkileşim problemlerinde yakın ortamların boyutunun baraj topuk noktasındaki basınç ve çekme gerilme tepkilerine olan etkisi, a) BRE problemi, b) BZE problemi, c) BRZE problemi, d) hepsi bir arada karşılaştırılması	78
Şekil 31. Farklı etkileşim problemlerinde yakın ortamların boyutunun baraj topuk noktasındaki basınç ve çekme gerilme tepkilerine olan etkisi	79
Şekil 32. Farklı mansap eğimine sahip baraj modelleri	83
Şekil 33. Farklı yaşlarda birleşik sistemin tipik sonlu eleman modeli	83
Şekil 34. 100 yıl boyunca beton için elastisite modülünün değişimi	85
Şekil 35. Birleşik problemlerin dinamik analizdeki akış şeması	86

Şekil 36. Farklı yaşlarda Model A, Model B, Model C ve Model D için kret noktasının yatay yer değiştirme-zaman grafiği	87
Şekil 37. Farklı yaşlarda Model A, Model B, Model C ve Model D için memba yüzeyindeki mutlak maksimum yatay yer değiştirmelerinin değişimi.....	88
Şekil 38. Model A, Model B, Model C ve Model D'nin topuğundaki hidrodinamik basınç-zaman grafiği	89
Şekil 39. Model A, Model B, Model C ve Model D'nin topuğundaki çekme gerilmelerin farklı yaşlarda değişimi	89
Şekil 40. Model A, Model B, Model C ve Model D'nin topuğundaki basınç gerilmelerin farklı yaşlarda değişimi	90
Şekil 41. Model A'nın a) memba yüzü, b) mansap yüzü ve c) tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi	91
Şekil 42. Model B'nin a) memba yüzü, b) mansap yüzü ve c) tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi	92
Şekil 43. Model C'nin a) memba yüzü, b) mansap yüzü ve c) tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi	93
Şekil 44. Model D'nin a) memba yüzü, b) mansap yüzü ve c) tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi	94
Şekil 45. Yaşlanan baraj modellerinin a) topuk ve b) parmağındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi	95
Şekil 46. Barajların sismik performans ve hasar kriterlerinin anlatımı.....	100
Şekil 47. Rijit ana kaya zemin üzerinde oturan Koyna barajı-rezervuar etkileşim probleminin sonlu eleman modeli	102
Şekil 48. Ölçeklendirilmemiş yer hareketi kayıtlarının yatay (Y) ve Düşey (D) bileşenleri .	103
Şekil 49. Seçilen yer hareketi kayıtlarının ölçeklendirilmemiş ivme davranış spektrumu	104
Şekil 50. Birleşik sistemin deprem yükleri altında analizi için akış şeması.....	104
Şekil 51. Koyna barajının temel mod şekilleriyle karşılık gelen periyotları.....	105
Şekil 52. Koyna barajının kret noktasındaki relötif yatay yer değiştirme-zaman grafiği	105
Şekil 53. Koyna barajının memba yüzeyindeki yer değiştirme ve hidrodinamik basınç tepkileri	105
Şekil 54. Koyna barajının boyun noktasındaki çekme ve basınç gerilme-zaman grafiği	106
Şekil 55. Koyna barajının topuk noktasındaki çekme ve basınç gerilme-zaman grafiği	106
Şekil 56. Koyna barajının maksimum çekme gerilmesi konturları	107
Şekil 57. Koyna barajının maksimum basınç gerilmesi konturları	107

Şekil 58. Barajın boyun noktasındaki çekme gerilmesi maksimum olduğu andaki hidrodinamik basınç konturları	107
Şekil 59. Seçilen deprem yüklerinin Y bileşenleri altında Koyna barajının boyun ve topuk noktasındaki performans eğrilerinin değerlendirilmesi	110
Şekil 60. Seçilen deprem yüklerinin Y+D bileşenleri altında Koyna barajının boyun ve topuk noktasındaki performans eğrilerinin değerlendirilmesi	110
Şekil 61. TKO = 1’de AGAB konturları ile Koyna barajının performans değerlendirmesi (seçilen deprem yüklerinin Y bileşeni altında)	111
Şekil 62. TKO = 1’de AGAB konturları ile Koyna barajının performans değerlendirmesi (seçilen deprem yüklerinin Y+D bileşeni altında)	111
Şekil 63. Betonun mekanik özelliklerinin 100 yıl boyunca değişimi	114
Şekil 64. Koyna barajının farklı yaşlarındaki temel periyotları ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri.....	115
Şekil 65. Koyna barajının farklı yaşlarındaki kret noktasının yatay yer değiştirme-zaman grafiği	115
Şekil 66. Koyna barajının farklı yaşlarında memba yüzündeki mutlak maksimum yer değiştirme ve hidrodinamik basınç tepkileri	116
Şekil 67. Koyna barajının boyun noktasındaki çekme gerilmesi-zaman grafiği, farklı yaşlarda	117
Şekil 68. Koyna barajının topuk noktasındaki çekme gerilmesi-zaman grafiği, farklı yaşlarda	118
Şekil 69. Koyna barajının farklı yaşlarındaki maksimum çekme gerilmesi konturları.....	118
Şekil 70. Koyna barajının farklı yaşlarındaki maksimum basınç gerilmesi konturları	119
Şekil 71. Seçilen farklı yer hareketi altında (sadece yatay bileşeni) Koyna barajının boyun ve topuk noktasına ait farklı yaşlarındaki performans eğrilerinin karşılaştırılması ...	120
Şekil 72. Seçilen farklı yer hareketi altında (yatay+düşey bileşeni) Koyna barajının boyun ve topuk noktasına ait farklı yaşlarındaki performans eğrilerinin karşılaştırılması ...	121
Şekil 73. Koyna barajının TKO = 1 için AGAB’nin kontur çizimleri (seçilen deprem yüklerinin Y bileşeni altında).....	122
Şekil 74. Koyna barajının TKO = 1 için AGAB’nin kontur çizimleri (seçilen deprem yüklerinin Y+D bileşeni altında)	122

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

AAR	: Alkali-agrega reaksiyonu
AGAB	: Aşırı gerilme altındaki bölgeler
$a_g^x(t)$	: Yatay doğrultuda etki eden yer-ivmesi
$a_g^y(t)$	: Düşey doğrultuda etki eden yer-ivmesi
$\hat{a}_g^x(s)$	: Laplace uzayına dönüştürülmüş yatay yer-ivmesi
$\hat{a}_g^y(s)$	: Laplace uzayına dönüştürülmüş düşey yer-ivmesi
B^e	: Sıvı elemana ait şekildeğiştirme matrisi
BRE	: Baraj-Rezervuar Etkileşim
BZE	: Baraj-Zemin Etkileşim
BRZE	: Baraj-Rezervuar-Zemin Etkileşim
C	: Rayleigh sönüm matrisi
C_P	: Basınç dalgası hızı
C_S	: Kayma dalgası hızı
C_R	: Rayleigh dalgası hızı
D	: Katı elemanlarda malzeme matrisi
D_d	: Kemo-mekanik etkilerden bozulan malzeme matrisi
d_g	: Betonun izotropik bozulma indeksi
d_{AAR}	: Betonda AAR eylemlerden oluşan hasar
E_0	: Betonun bozulmamış elastisite modülü
E_m	: Betonun kemo-mekanik etkilerden bozulmuş elastisite modülü
E_d	: Kemo-mekanik etkilerden bozulan betonun elastik modülü
F_{t0}	: Betonun bozulmamış çekme dayanımı
F_t	: Bozulmuş betonun çekme dayanımı
f'_c	: Betonun basınç dayanımı
f_t	: Betonun çekme dayanımı
G	: Kayma modülü
h_e	: Sonlu elemanın kalınlığı
IDS	: İvme davranış spektrumu
J	: Jakobian dönüşüm matrisi
$\bar{K}$	: Ortak sistemin karmaşık rijitlik matrisi

K	: Ortak sistemin reel rijitlik matrisi
KAS	: Kümülatif aşırı gerilme süresi
K_b	: Baraj bölgesine ait rijitlik matrisi
K^e	: Sıvı elemana ait rijitlik matrisi
K_s	: Sıvı bölgesine ait rijitlik matrisi
K_z	: Zemin bölgesine ait rijitlik matrisi
M	: Ortak sistemin kütle matrisi
M^e	: Sıvı elemana ait kütle matrisi
M_s	: Sıvı bölgesine ait kütle matrisi
M_b	: Baraj bölgesine ait kütle matrisi
M_z	: Zemin bölgesine ait kütle matrisi
N	: Elemanın şekil fonksiyonları vektörü
N_i	: Elemanın i'inci düğümüne ait şekil fonksiyonu
PEE	: Performans eşik eğrisi
P_k(ξ, s)	: Elemanın k'inci düğümüne ait deplasman yayılma fonksiyonu
s	: Laplace uzayındaki kompleks değişkeni
SBEY	: Sonsuz Bölgelerin Etkisi Yok
SBEV	: Sonsuz Bölgelerin Etkisi Var
S_f^e	: Yüzey sıvı elemanın rijitlik matrisi
T	: Sıvı sisteminin kinetik enerjisi
TKO	: Talep-kapasite oranı
TYİ	: Tepe yer ivmesi
$\hat{U}(s)$	: U(t) fonksiyonun Laplace uzayına dönüşümü
$\underline{\hat{U}}$	: Karmaşık katsayılı deplasman vektörü
ζ	: Viskoz sönüm oranı
η	: Histeretik sönüm oranı
α ve β	: Rayleigh sönüm matrisi hesaplanmasındaki frekansa bağlı bilinmeyenler
Π_e	: Sıvı sistemin potansiyel enerjisi
Φ	: Ortak sistemin mod şekilleri matrisi
Ø_n	: Ortak sistemin n'inci mod şekli
λ	: Lamé sabiti
ρ	: Ortamın birim ağırlığı
ν	: Ortamın Poisson oranına
β_i	: Dalga tipi

ϕ	: Betonda toplam gözeneklilik
ϕ_0	: Betonda başlangıç gözeneklilik
ϕ_c	: Betonda kimyasal nedenlerden oluşan gözeneklilik
ϕ_m	: Betonda mekanik nedenlerden oluşan gözeneklilik
ϵ_{AAR}	: Betonda AAR eylemlerden oluşan gerinim

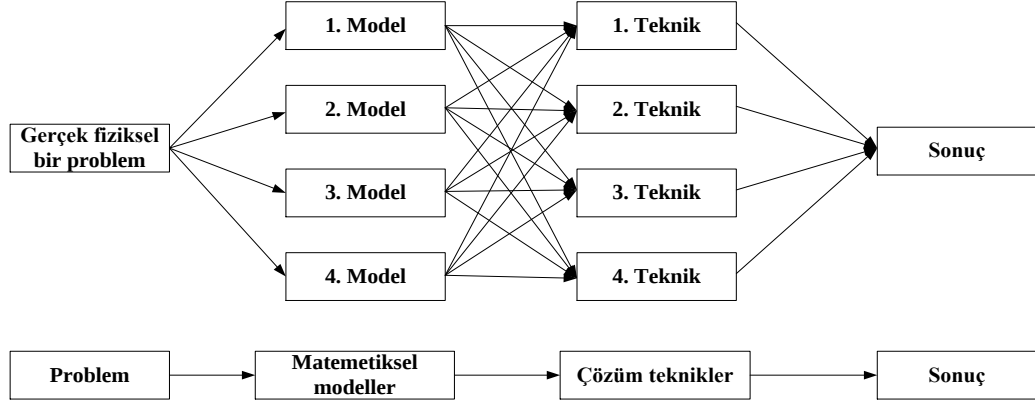


GİRİŞ

Medeniyetin doğuşundan bu yana, insanlar, temel ihtiyaçlarını karşılamak için mühendisliğe ve karmaşık altyapılara bağımlı olmaya başlamışlardır. İnsanların yaşam ihtiyaçlarını gideren ve temelde önemli olmaya devam eden en eski mühendislik altyapılarından biri barajlardır. Barajlar, insanların hayatında önemli bir rol oynayan devasa yapılardır. Bu yapılar, enerji üretmek, sulama, taşkınları önlemek, nakliye için nehir akışını düzenlemek, balıkçılık vb. gibi temel ihtiyaçlarının çoğunu giderebilmektedir. Ayrıca, doğadaki suyun oluşumu insanların su ihtiyaçlarını sürekli bir şekilde gideremediğinden ve insanların suya ihtiyacı sürekli karşılanabilmesinden dolayı barajların inşa etme yükümlülüğü duyulmuştur (Öziş 1983). Bu sebeple, en kadim su yapısı yüksekliği 4 m ve kret uzuluğu 94 m olan Jawa barajı Ürdün'de 4000 yıl milattan önce kaldığı düşünülür. Beton barajların mühendislik açısından projelendirilmesi 19. yüzyılın başlarında ilk olarak Fransız mühendisler tarafından Prof. WM Rankine'nin danışmanlığıyla Hindistan'da inşa edilen Periyar barajıdır (Bulson *et al.* 1983). Diğer tarafta, gelişmekte olan ülkelerde enerji talebinin artmasıyla birlikte enerji üretim yöntemleri büyük önem kazanmıştır. Yenilenebilir kaynaklar arasında hidroelektrik enerji, ekonomik ve hızlı kullanılabilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilmiştir. Bu bağlamda barajlar hidroelektrik enerji üretimi için en elverişli yapılardır. 1980'lerin sonlarında, gelişmiş ülkelerin çoğunda hidroelektrik enerjisi yoğun bir şekilde kullanıldı. Ancak, Türkiye ve Çin gibi gelişmekte olan ülkelerde barajlar hala yapım aşamasındadır. Türkiye'nin artan enerji ihtiyacını karşılamak için son yıllarda önemli yatırımlar yapılmaktadır. Özel sektörlerde barajların yapımı ve işletmeciliğine olan ilginin artmasıyla, barajların tasarımı ve inşası yerel inşaat sektörlerinde önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Örneğin, Türkiye'de 1930'lardan 2006'ya kadar inşa edilen baraj sayısı 600 civarındayken, 200'e yakın yeni baraj daha planlama, projelendirme ve yapım aşamasındadır (Akpınar 2019).

Baraj problemlerinin çözümüyle ilintili olarak bir inşaat mühendisinin (sayısal analizci) görevi son yıllarda giderek daha karmaşık hale gelmiştir. Çeşitli koşullar altında yapısal davranışının güvenilir tahminlerine yönelik artan talep, kapsamlı araştırmalara ve önemli gelişmelere yol açmıştır. Klasik çözüm teknikleri uzun zamandır yerini daha çok yönlü sayısal yöntemlere bırakmıştır. Yapı mühendisi veya sayısal analiz yapan kişi, esas olarak, gerçek fiziksel sistemi temsil eden matematiksel bir modele dayanan bir sorunun çözümüyle ilgilenir. Yapısal ve analiz tekniği karmaşıklığına bağlı olarak, aynı gerçek fiziksel

sistem için farklı matematiksel modeller, farklı çözüm teknikleri geliştirilebilir (Şekil 1). Sayısal modelin değeri ve üstünlüğü, gerçek problem ve sonuç arasında geliştirilen matematiksel modelin ve çözüm tekniklerine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, bir takım farklılıklarla birlikte, sonuçlar birbirlerine benzer davranış sergilenmesi beklenir.



Şekil 1. Mühendislik açısından bir probleme yönelik çözüm prosedürü

Gerçek fiziksel bir problemin çözümü için bir inşaat mühendisi, problemi bir matematiksel model şeklinde sunması, mühendislik modellenmesi açısından, fiziksel gerçek problemi ile de ilişkisini kurması gerekmektedir. Tabiki, bunların her bir aşamasında bir takım yapısal idealleştirmelerle problemdeki sınır şartları, dinamik yükleri, malzeme özellikleri vs. özellikleri dahil edilmesi gerekmektedir. Yapısal idealleştirmelerden bahsedildiğinde, bir çok yöntem arasında sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Şu anda bu yöntem bir çok mühendislik problemlerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, çok yönlü ve güçlü bir yöntemdir. Bununla birlikte, yapısal idealleştirme için bu yöntemin modelleme yetenekleri, diğer yöntemlerin yapabilirliğinden çok daha üstündür. Çeşitli şartlar altında, çeşitli yükler, çeşitli malzeme özellikleri ve geometri açısından karmaşık geometrisi olan problemlerin modellenmesi veya temsili bu yöntemle mümkündür.

Bu devasa yapılar, memba tarafındaki rezervuar bölgesinde çok büyük miktarda su biriktirdiklerinden dolayı sıvı-yapı etkileşim problemidir. Bu tür problemlerin herhangi dinamik yüke karşı rezervuar bölgesinde hidrodinamik basıncı oluşup, baraj gövdesinde ek yükler meydana gelmektedir. Ayrıca, rezervuar bölgesi zemin ortamıyla temas halinde olduğundan dolayı, zemin-sıvı etkileşim problemi olup, rezervuarda oluşan hidrodinamik basınçlardan zemin bölgesine de önemli ölçüde ilave yükler aktarılır. Aynı zamanda, yapının zemin ile etkileşim halinde olduğundan dolayı yapı-zemin etkileşim problemi de ortaya çıkar. Böyle bir üç yönlü problemde, sıvı bölgesi yapı ve zeminin, yapı bölgesi sıvı ve zeminin, zemin bölgesi ise sıvı ve yapının dinamik davranışını aynı zamanda etkiler. Böylece, ortamlar aynı zamanda birbirlerinin davranışını doğrudan etkilerler. Bu tür problemlerin dinamik

davranışını incelemek için, bir takım varsayımlarla birlikte gerçek fiziksel sistemin mühendislik açısından gerçekçi modellenmeye ihtiyaç vardır. Örneğin, betondan inşa edilmiş veya inşa edilmesi planlanan bir baraj gövdesinde, deprem sarsıntısının yön değişmesi nedeni ile çekme ve basınç gerilmeler oluşur. Betonun çekme dayanımı, basınç dayanımından daha düşük olduğundan dolayı baraj gövdesinin dib bölgesinde ve kret bölgesine yakın eğimi değişen bölgelerde çatlakların hızlıca meydana gelmesi ve gelişimi tahmin edilebilmektedir. Dolayısıyla, etkin deprem bölgelerinde inşa edilmesi planlanan barajların deprem hasarlarına karşı duyarlı bir modellemeyle analizi yapılmalıdır. Çünkü, barajların dinamik yüklerden dolayı büyük hasarlar görmesi veya yıkılması çok büyük tabii, beşeri ve ekonomik afetlere yol açmaktadır. Bu afetlerin oranı bazen tahmin edilemeyecek kadar büyük olmaktadır. Dolayısıyla, barajların herhangi dinamik yüke karşı dayanıklı olması güvenlik açısından kaçınılmaz bir konu olduğu anlaşılmıştır. Bunun için, yapının davranışı ve olası hasar modlarının tespiti, kapsamlı bir modelin hazırlanması ve analiziyle gerçekleştirilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, beton ağırlık baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi ve yerhareketi etkisi altında analizinin yapılması amaçlanmıştır. Birleşik sistemin sonlu eleman modelini hazırlanırken, baraj gövdesinin dinamik davranışını önemli ölçüde değiştiren bazı parametreler; örneğin, yakın ortamların boyutu, betonun zamanla yaşlanması, sediment tabakasının etkisi ve zamanla artması dikkate alınmıştır. Ayrıca, çeşitli deprem yükleri altındaki bir barajın dinamik davranışı, sismik performansı ve yukarıda bahsedilen önemli konuları dikkate alınarak baraj gövdesinde meydana gelen olası hasarların tahmini için de incelemeler yapılmıştır. Hazırlanan sayısal modelde, rezervuar ve zemin bölgeleri gibi sonsuz ve sürekli ortamlar, yakın ve uzak bölgelere ayırarak, yakın zemin, yakın rezervuar, uzak zemin ve uzak rezervuar ortamları şeklinde isimlendirilmiştir. Yakın rezervuar bölgesi, sıvı sıkıştırılabilirlik özelliğini ve serbest yüzey dalgalarının etkisini içeren Lagrange yaklaşımıyla modellenmiştir. Sıvının uzak bölgesi ise, bu çalışmada önerilen sonsuz sıvı elemanlarla modellenmiştir. Bu sonsuz eleman modeli, literatürden seçilerek, hem zemin ve hem su ortamlarında kullanılmıştır. Bu eleman, daha önce yapılan yapı-zemin etkileşim problemlerinde uzak zemin ortamında kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında bu eleman, ilk defa su ortamında da kullanılarak sonsuz sıvı eleman olarak adlandırılmıştır. Önerilen sonsuz sıvı elemanın doğru ve etkili bir şekilde çalıştığı çözülen örneklerle denenmiştir. Baraj gövdesi ve yakın zemin bölgesi, bilinen sonlu elemanlarla modellenmiştir. Zeminin uzak bölgesi ise, üç dalga tipini içeren deplasman azaltma fonksiyonu olan sonsuz elemanlarla modellenmiştir. Sistemin birleşik hareket denklemi

kompleks frekans tanım alanında (Laplace uzayı) direkt yöntemiyle çözülmüştür. Hesaplanan kompleks katsayılı deplasman tepkiler, sayısal ters Laplace dönüşümüyle reel deplasman tepkilerine dönüştürülmüştür. Elde edilen reel deplasman tepkileri yardımıyla, sisteme ait hız, ivme, gerilmeler, asal gerilmeler gibi diğer tepkiler daha sonra türetilmiştir. Dinamik hareket denkleminin çözümü ve tepkilerin hesabı için FORTRAN 90 ve MATLAB programlama dilleri kullanılarak çeşitli bilgisayar programları hazırlanmıştır. Problemin modellenmesi ve çözümüne ilişkin varsayımlar aşağıda sıralanmıştır:

- Zemin, su ve baraj gövdesi lineer elastik davranış sergilediği kabul edilmiştir.
- Zemin bölgesi, baraj gövdesi homojen izotrop ortamlar olduğu kabul edilmiştir.
- Rezervuar bölgesinin tabanı yatay, su derinliği rezervuar boyunca sabit (H) ve baraj memba yönünde sonsuza kadar uzanmaktadır.
- Baraj-rezervuar-zemin sisteminin hareketi iki boyutlu olarak kabul edilmiştir, yani baraj eksenine dik herhangi bir düzlemdeki baraj monoltinin sonuçları aynıdır.
- Uzak zemin ve uzak rezervuar bölgelerinin baraj gövdesi üzerine etkisi olduğu ve radyasyon sönümü dikkate alınmıştır.
- Rezervuar bölgesindeki su sıkıştırılabilir olduğu ve içsel viskozitesinin olmadığı kabul edilmiştir.
- Serbest su yüzeyindeki dalgaların çalkalanması ve baraj gövdesi üzerine etkisi dikkate alınmıştır.
- Yer hareketinin düşey bileşeni sisteme uygulandığında, rezervuar altındaki ortamın esnekliği hidrodinamik basınçlar üzerinde etkisi olduğu dikkate alınmıştır.
- Yer-hareketinin yatay ve düşey yöndeki yayılma hızı sonsuz olduğu kabul edilmiştir. Yani yer-hareketi aynı anda modelin tabanındaki tüm noktalara ulaştığı ve modelin içinde aynı ivmeyle dağıldığı varsayılmıştır.

Literatürden dağınık bilgileri toparlayarak baraj-rezervuar-zemin etkileşim problemlerinin herhangi dinamik yük etkisi altındaki davranışını incelenmek üzere etkin bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Hazırlanan bilgisayar programı, bir çok farklı parametreyi (farklı sönüm modeli, betonun yaşlanma modeli vb.) kapsıyabildiği şekilde hazırlanmıştır. Geliştirilen program, zaman analizi açısından oldukça ekonomiktir. Sistemin keyfi geometrisini hesaba katabilir ve pratik uygulama için uygundur. Ayrıca, Lagrange yaklaşımıyla modellenen su ortamının uzak bölgesi için sonsuz sıvı elemanı önerilmiştir. Bu tezde, bir çok parametrik incelemeler yapılarak barajların analizi ve tasarımında önemli bilgiler verilmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, beton ağırlık barajların dinamik analizi için literatürde yapılan incelemeleri ilk zamandan itibaren ele alınarak kapsamlı bir literatür taraması hazırlanmıştır. Literatür taramasında, daha çok geliştirilen yöntemler, sonsuz boyutlu ortamların modellenmesi, sistemde enerji kaybı mekanizmasının modellenmesi, betonunun zamanla bozulması gibi konular hakkındadır. Doğru olmayan etkileri de içerebilen veya bu etkileri göz ardı edilen bir takım analitik ve yarı-analitik yöntemlerden de bahsedilmiştir. Analiz yöntemleri genellikle zaman tanım alanında veya frekans tanım alanında geliştirilmiştir. Baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminde, hidrodinamik basıncı, su sıkıştırılabilirliği, temelin kütlesi ve sönümü, rezervuar tabanındaki sediment tabakaları, sıvının serbest yüzey dalgaları, zeminin ve rezervuarın sonsuza uzanan bölgesi, radyasyon sönümü, betonun baraj ömrü boyunca farklı nedenlerden dolayı bozulması ve yaşlanması vb. gibi farklı parametreler barajların dinamik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Barajların analiz yöntemleri geliştikçe bu parametreler de kronolojik olarak analiz yöntemlerine dahil edilmiştir. Barajların gerçekçi dinamik davranışı irdelenmesinde geliştirilen analiz yöntemlerinin kapasiteleri de zamanla artmıştır. Dolayısıyla, bu karmaşık problemin dinamik analizi yapılmasında bir çok yöntem geliştirilmiş ve gerçekçi davranışı temsil edebilen yaklaşımlar ortaya koyulmuştur. Bu gelişmeleri seçici bir şekilde incelenmesi ayrı başlıklar altında yapılmıştır.

Sıvının Modellenmesi ve Hidrodinamik Basıncı

Barajların dinamik analizi yapılmasında sıvı ve katı (zemin ve baraj gövdesi) ortamları arasındaki etkileşimi hesaba katmak gerekmektedir. Bu nedenle, her hangi bir dinamik yükten dolayı rezervuar bölgesinde meydana gelen hidrodinamik basıncı hesaplamak için rezervuar suyunun modellenmesi gerekmektedir. Dinamik yüklerin titreşimli hareketleri, baraj gövdesini zorlanmış titreşim durumuna sokmaktadır. Böylece rezervuarda basınç dalgaları, gövdenin ivmesinden meydana gelir. Rezervuarda geçici olarak gelişen bu dalgalı davranış (basınç dalgası yayılımı) genellikle dalga denklemi yardımıyla matematiksel olarak araştırmacılar tarafından modellenmiştir. Dolayısıyla, baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin dinamik analizinde, rezervuar bölgesindeki hidrodinamik basınçların hesaplanması önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır. Bazı kabuller ve basitleştirmeler yapılarak sıvı ortamı genellikle üç tür yaklaşımı ile modellenir;

➤ Lagrange Yaklaşımı

- Euler Yaklaşımı
- Kütle Ekleme (Added Mass) Yaklaşımı

Euler yaklaşımında sıvı ortamının düğüm bilinmeyenleri basınç veya hız potansiyeli cinsinden düşünülürken, Lagrange yaklaşımında ise yerdeğiştirmeler cinsinden düşünülmüştür. Bilindiği üzere, katı ortamların düğüm bilinmeyenleri yerdeğiştirmeler cinsindendir. Dolayısıyla, Euler yaklaşımı (Chopra 1967a; Chakrabarti and Chopra 1972; Chakrabarti and Chopra 1973; Chopra and Gupta 1982; Hall and Chopra 1982a; Chakrabarti and Nalini 1985; Tsai and Lee 1991; Tsai *et al.* 1992; Calayır 1994) ile modellenen sıvı ortamının katı ortamlarla etkileşimini sağlayabilmek için özel arayüzey denklemlerine (sıvı ve katı elemanların düğüm bilinmeyeleri aynı cinsten olmadığından) ihtiyaç duyulurken, Lagrange yaklaşımı (Bayraktar 1991; Calayır 1994; Bayraktar *et al.* 1996; Akköse 1997; Bayraktar and Dumanoglu 1998; Bayraktar *et al.* 2005; Köseoğlu 2007; Bayram 2008) ile modellenen sıvı ortamının katı ortamlarla etkileşimi için özel arayüzey denklemlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca, Lagrange yaklaşımında düğüm bilinmeyenler arasındaki uygunluk şartı otomatik olarak sağlanmaktadır. Sıvının modellenmesinde üçüncü yaklaşım ise kütle ekleme yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, baraj gövdesinin memba yüzeyinde meydana gelen hidrodinamik basınç dağılımı, baraj ile beraber titreşen kütle dağılımı olarak düşünülmüştür. Baraj gövdesi yüksekliği boyunca, bu kütle dağılımından tekil kütleler oluşturulup, baraj memba yüzeyinde olan düğüm kütlelerine ilave kütleler olarak eklenmektedir. Böylece, hidrodinamik basınçların etkisi sisteme dahil edilmektedir.

Klasik yöntemlerde araştırmacılar, ilk olarak, barajın esnekliğini göz ardı ederek hidrodinamik basıncı baraj gövdesi rijit bir ortammış gibi kabul edip hesaplarlardı. Daha sonra, barajın dinamik davranışını incelemek için hesaplanan hidrodinamik basıncı esnek bir baraja uygulayarak dinamik tepkileri elde ederlerdi. Bu şekilde Westergaard (1933)'te hidrodinamik basıncı belirlerken, rezervuar bölgesi sabit derinlikte ve sonsuz uzunlukta olduğu, baraj ve temel ikisi rijit olduğu, barajın memba yüzeyi dikey olduğu, dış yükler harmonik olduğu ve yatay olarak baraj gövdesine uygulandığı ve sıvının sıkıştırılabilir bir ortam olmadığı varsayımları yapmıştır. Daha sonra, yukarıda bahsedilen dalga denklemi yardımıyla rezervuar ortamında hidrodinamik basınç dağılımı için analitik bir bağıntı geliştirdi. Ayrıca Westergaard, belirli bir miktar suyun sadece kütlelerini baraj gövdesi üzerine ekleyerek hidrodinamik basıncı için alternatif bir yaklaşım geliştirdi. Bulunan bu iki yaklaşımın sonuçları birbirlerine yakın olduğunu buldu. Bu nedenle, Westergaard'ın önerdiği yaklaşım, "kütle ekleme" yaklaşımı olarak bilinmektedir. Bu yaklaşımın basitliği nedeniyle, barajların

dinamik analizi ve tasarımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Baraj memba yüzeyinde ve rezervuar derinliği boyunca hidrodinamik basınçların dağılımı çeşitli araştırmacılar tarafından incelenip ya parabolik (Westergaard 1933) yada eliptik (Karman 1933; Werner and Sundquist 1949) bir değişim gösterdiğini belirtilmiştir. Kotsubo (1957)'de, Westergaard (1933)'ün yaptığı "yükün harmonik olduğu" ve "deprem periyodunun su ortamından daha büyük olduğu" varsayımlarından farklı olarak, rastgele depremlerin neden olduğu hidrodinamik basınçların hesaplanması için bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşıma göre, deprem periyodunun su ortamının periyoduna yakın olduğunda, elde edilen hidrodinamik basınçlar Westergaard'ın hesapladığı sonuçlardan daha büyük çıktığı vurgulanmıştır. Bustamante and Flores (1966)'da, 1966 nesil bilgisayarları kullanarak hesaplamada karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için hidrodinamik basınçların iki boyutlu rezervuarlarda tahmini için basit bir yöntem önerdiler. Ayrıca, depremlerin yatay bileşeni nedeniyle meydana gelen en büyük hidrodinamik basınçlar için, hidrodinamik spektrum kavramı modal analiz yönteminin geçerliliği ile geliştirdiler. Chopra (1967a)'da, hidrodinamik basınçları araştırırken su bölgesini lineer olarak sıkıştırılabilir olduğunu kabul etmiştir. Rijit baraj gövdesi varsayımıyla hidrodinamik basınçlardan doğan kuvvetlerin hesaplanması için bir ilişki geliştirdi. Suyun sıkıştırılabilirlik etkisini göz önüne alındığında, hidrodinamik basınçların kütle ekleme yaklaşımıyla temsil edilemeyeceğini vurgulamıştır. Suyun sıkıştırılmaz kabulüyle elde edilen çözümlerin, suyun sıkıştırılabilir kabulüyle elde edilen çözümler arasındaki farklılık, özellikle sistemin doğal frekanslarına yakın durumlarda büyük olduğu vurgulanmıştır. Geliştirilen matematiksel modelde, enerji kaybı modellenmediğinden düşey yer hareketinden kaynaklanan tepkilerin de çok büyük olduğu görülmüştür. Chopra (1968) çalışmasına göre, "barajın esnekliği rezervuarın esnekliğiyle karşılaştırıldığında yeterince esnekse, çok az yanlılıkla suyun sıkıştırılabilirliği göz ardı edilebilir" sonucu sunulmuştur. Ayrıca, Nath (1969)'da, rezervuarın çeşitli uzunluklarını dikkate alarak sonlu elemanlar tekniği yardımıyla düşey yer hareketi için suyun sıkıştırılabilirliğinin etkilerini araştırmıştır. Analizden elde edilen sonuç, düşey yer hareketinin belirli bir frekansında, baraj memba yüzündeki basınç katsayılarının yatay yer hareketinden kaynaklanan basınçlardan oldukça büyük olmasıdır.

Momentum dengesi yöntemini (Karman 1933) kullanan Chwang and Housner (1978) eğimli memba yüzeyi olan rijit barajların hidrodinamik basıncı dağılımı için bir yaklaşım geliştirdi. Yatay, düşey ve normal doğrultuda hidrodinamik yüklerin hesaplanması için açık bir analitik formül sundu. Normal kuvvetlerin tüm eğimler arasından 0,5 eğimi civarında sabit kaldığını buldu. Chwang (1978)'de aynı problem için iki boyutlu potansiyel akışkan teorisine

dayalı bir integral çözümü önerdi. Burada, Schwarz-Christoffel teorisini, eğimli baraj-rezervuar arayüzünün sınır haritasını çizmek için kullandı. Rezervuardaki sıvının sıkıştırılamaz ve viskoz olmadığını kabul etti. Bu iki yaklaşımla elde edilen hidrodinamik basıncın birbirleriyle makul ve uyumlu olduğu belirtilmiştir. Bir çok araştırmacı sıkıştırılamaz suyun etkileri dış yüklerin frekansından bağımsız olduğunu göstermiştir (Saini 1978; Chopra and Chakrabarti 1981). Hidrodinamik kuvvetler, rezervuar suyunun sıkıştırılabilir olduğunu düşünülerek elde edilen sonuçlara kıyas edildiğinde yeterince büyük olduğu bulunmuştur.

Sonlu eleman yöntemini kullanılarak frekans tanım alanında analiz yapan Saini *et al.* (1978)'de, hidrodinamik tepkilerinin hesaplanması için birleşik bir sonlu-sonsuz model geliştirdi. Geliştirdiği modelde, suyun sıkıştırılabilirliği dikkate alınarak uzak rezervuar bölgesi sonsuz elemanlarla modellenmiştir. Her ne kadar suyun sıkıştırılabilirlik etkilerinin hidrodinamik basıncın hesaplanması için önemli olduğu gösterilmiş olsa da, kısmen veya tamamen eğimli memba yüzlerine sahip karmaşık baraj-rezervuar sistemlerin analitik yaklaşımla çözülmesi zor olduğu anlaşılmıştır. Problemi basitleştirilerek, hidrodinamik basınçların belirlenmesinde kabul edilebilir bir analitik tekniklerin geliştirilmesi için rezervuarın sıkıştırılabilirliği genellikle ihmal edilmiştir. Geometrisi düzensiz olan rezervuarların hidrodinamik basınç hesaplanmasında, yukarıda bahs edilen zorlukları aşmak için, sonlu elemanlar yöntemi (Saini 1978; Olson and Bathe 1985a; Olson and Bathe 1985b; Sharan 1987b; Sharan 1992), sınır eleman yöntemi (Hanna and Humar 1982) ve sonlu farklar yöntemi (Hung and Wang 1987) gibi sayısal yöntemler daha sonra geliştirilmiştir. Böylece, Hanna and Humar (1982)'de, harmonik yer hareketine maruz kalan rijit ağırlık barajı-reservuar probleminde sınır eleman yöntemi kullanılarak hidrodinamik basınçların hesaplanması için bir yaklaşım geliştirdiler. Sonsuz uzunlukta olan rezervuar bölgesi sınır elemanlarla ayrıklaştırılıp, Helmholtz dalga denklemi yardımıyla bir integral denklemi geliştirildi. Geliştirilen yaklaşım, aynı zamanda farklı eğimlere sahip barajların hidrodinamik basıncını hesaplamak için de kullanıldığı ifade edilmiştir. Baraj-rezervuar etkileşim probleminde hidrodinamik basınçlarının katı elemanlarla uygun sayısal modellemesi Pelecanos *et al.* (2013) tarafından yapılmıştır. Modellemede rezervuar bölgesi, 8 düğümlü izoparametrik katı sonlu elemanlarla modellenmiştir. Elemanın düğüm bilinmeyenini yer-değiştirme cinsindendir. Rezervuar bölgesinde suyun kesme gerilmeleri ihmal edilerek sayısal çözümdeki stabilitesizliği önlemek için küçük değerli kesme modülünün kullanıldığı ifade edilmiştir. Suyu kullanan kesme modülü değeri, suyun hacimsel elastisite modülünün

%0,1'den küçük olması gerektiği ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak uyum içinde olduğu bulunmuştur.

Sonlu farklar yöntemini kullanan Hung and Wang (1987), barajların dikey ve eğimli memba yüzeylerindeki doğrusal olmayan hidrodinamik basınç tepkileri hesaplamışlardır. Bu çalışmada suyun sıkıştırılabilirliği ve derinliğinin etkisi analize dahil edilmiştir. Memba yüzey geometrisi düzensiz olan barajlarda hidrodinamik basınçların hesaplanması için yetersiz olduğu; ve sonsuz veya yarı sonsuz sıvı ortamların modellenmesinde çok sayıda düğüm noktası gerektirdiği için bu yöntemin dezavantajları olarak ifade edilmiştir (Gogoi 2006). Diğer araştırmacılar (Hatano 1950; Zangar 1952; Zienkiewicz and Nath 1963; Flores *et al.* 1969; Chakrabarti and Nalini 1985; Avilés and Sánchez-Sesma 1986; Liu 1986; Gogoi 2006; Gogoi and Maity 2010), çeşitli koşullar altında hidrodinamik basınçların hesaplanması için farklı yaklaşımları geliştirmişlerdir. Böylece geniş bir zaman içerisinde, hidrodinamik basınçların hesaplanması için geliştirilen yöntemler birbirlerinden çok farklı olsa da problemin gerçekçi davranışını simüle etmekte yine yenilikçi araştırmalara ihtiyaç vardır.

Zaman Tanım Alanında Geliştirilen Yöntemler

Bu bölümde, ağırlık barajların lineer dinamik analizini zaman tanım alanında gerçekleştiren yöntemler gözden geçirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerde, rezervuar bölgesi dahil edilerek genellikle yukarıda bahsedilen üç farklı yaklaşımla modellenmiştir. Ağırlık barajların sismik analizinde suyun sıkıştırılabilirlik özelliğini ve radyasyon sönümünün etkisini dikkate alan Chopra (1967b) ve Chopra (1968), barajın sadece temel modlarını dikkate almakla tepkileri yeteri kadar doğru hesaplayabilen bir yaklaşım sunmuştur. Barajın dinamik davranışı, rezervuar bölgesi boş ve dolu durumları için incelenmiştir. Geliştirdiği bu yaklaşımla artık baraj gövdesinin ve su bölgesinin ayrı ayrı analiz edilmesine gerek kalmamıştır. Dolayısıyla dinamik yapı-sıvı etkileşim probleminin beraberce çözümü, modların birleştirilmesi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Önceki araştırmacılar, genellikle rijit baraj üzerindeki hidrodinamik basıncı ilk olarak hesaplanıp daha sonra bu tepkiyi elastik barajlara uygulayarak, elastik barajların dinamik tepkilerini elde ederlerdi. Böylece, sıvı-yapı etkileşim probleminin birleşik analizi yerine iki ayrı sistem olarak çözülerek sistemin tepkileri elde edilirdi.

Nath (1971)'de sıvının sıkıştırılabilirliğini göz önünde bulundurarak ve radyasyon sönümünü göz ardı ederek, sonlu farklar yöntemiyle ağırlık barajlarının yatay yer hareketi etkisi altındaki dinamik davranışını araştırdı. Bu çalışmada baraj gövdesi, enkesiti sabit olmayan elastik bir konsol kiriş ile modellenmiştir. Birleşik yapı-sıvı sisteminin doğal

frekanslarını hesaplamak için bu araştırmacı, baraj ve rezervuarın ayırık temel frekansları cinsinden basit bir formül önerdi. Finn and Varoğlu (1973)'te ağırlık baraj-rezervuar etkileşim probleminin yatay yer hareketi etkisi altındaki tepkilerini sonlu elemanlar yaklaşımıyla incelemiştir. Bu amaçla, hidrodinamik basınçlar barajın yatay yer değiştirmeleri cinsinden ifade edilmiştir. Hesaplanan su basıncı, atalet kuvvetlerini aşan yük olarak hareket denkleminin yük vektörüne dahil edilmiştir. Pine Flat ağırlık barajın bir çok yer ivemesi etkisi altındaki sismik analizini sonlu elemanlar yaklaşımıyla Hall (1986) tarafından gerçekleştirdi. Su varlığının önemi, su sıkıştırılabilirliğinin etkileri ve yer hareketinin düşey bileşeni bu çalışmaya dahil edilmiştir. Ayrıca, su ortamının ilave kütle yaklaşımıyla modellenmesinin doğru olup olmadığı araştırılmıştır. Su varlığının barajların sismik tepkileri üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğunu belirtilmiştir. Guan *et al.* (1994)'te, zemin ve sıvı bölgeleri yarı sonsuz ortamlar olduğunu varsayarak zaman tanım alanında iki boyutlu baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin dinamik analizi için yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Ağırlık barajlarda çatlakların gelişimini araştırmak için lineer kırılma mekaniği ilkeleri yardımıyla sınır elemanlar yönteminde bir yaklaşım Batta and Pekau (1996) tarafından geliştirerek Koyna barajı üzerinde inceleme yapılmıştır. Rezervuarın etkilerini dikkate almak için kütle ekleme yaklaşımı kullanılmıştır.

Baraj-rezervuar sistemlerinin sonlu eleman yönteminde çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin birinde basınç ve yer değiştirme sırasıyla baraj ve rezervuarın düğüm bilinmeyenleridir. Bu yaklaşımda, birleşik sisteme ait karakteristik matrisler simetrik değildir. Ayrıca, modal analizi için, simetrik olmayan öz-değer probleminin çözülmesi gerekmektedir. Birleştirilmiş simetrik olmayan problemi çözmek yerine, ayrıştırılmış modal analiz yöntemi kullanılmıştır. Dolayısıyla, ağırlık barajların sismik analizinde ayrıştırılmış ve birleştirilmiş modal analiz yöntemleri Samii and Lotfi (2007) tarafından geliştirilerek sonuçları karşılaştırmıştır. İncelemenin sonucunda, birleştirilmiş modal analiz yönteminin ayrıştırılmış modal analiz yönteminden daha hızlı ve az sayıda birleşik modların kullanılmasıyla tepkilerin elde edilebildiği belirtilmiştir. Simetrik olmayan öz-değer problemin hesaplanması bu yöntemin dezavantajı olarak vurgulanmıştır. Burman *et al.* (2012)'de sonlu elemanlar taktiğini kullanarak ağırlık baraj-temel sistemlerinin analizi için direkt metodu formunda yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemin hızlı olduğu ve bilgisayar hafızasında az yer aldığı belirtilmiştir. Bu yöntemde rezervuar bölgesi kütle ekleme yaklaşımıyla modellenmiştir.

Chopra *et al.* (1969)'da iki boyutlu baraj-rezervuar sistemlerinin dinamik analizi için sonlu elemanlar yaklaşımını kullanarak bir model geliştirmiştir. Bu modelden elde edilen

tepkileri analitik yöntemlerden elde edilen tepkilerle karşılaştırmıştır. Su ortamı sıkıştırılabilir olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmanın sonlu eleman formülasyonunda yer değiştirmeler, su ve baraj ortamlarının düğüm bilinmeyenleri olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi, bu tip problemlerinin analizi için güçlü ve iyi sonuç verici bir yöntem olarak belirtilmiştir. Antes and Von Estorff (1987) sınır eleman yöntemini kullanılarak baraj-rezervuar ve baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin yatay ve düşey yer hareketi etkisi altındaki sismik davranışını incelemiştir. Bu çalışmada, yeni bir yaklaşım zaman tanım alanında ve frekans tanım alanında geliştirilmiştir. Yaklaşım, su ortamının sıkışabilirlik özelliği, rezervuar ortamının tabanında ve uzak bölgesinde hidrodinamik basınçların emilimi dikkate alınmıştır. Zaman ve frekans tanım alanında elde edilen tepkilerinin birbirlerine yakın olduğu belirtilmiştir. Rezervuarda radyasyon sönümlemeyi analitik olarak ve suyun sıkışabilirlik özelliğini dikkate alan Tsai and Lee (1991), zaman tanım alanında baraj-rezervuar etkileşim probleminin gerçek dinamik analizini yapabilen altı tip yaklaşımını geliştirmiştir. Baraj ve yakın su bölgeleri sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Uzak rezervuar bölgesi ise sürekli (continuum) bir ortam olarak modellenmiştir. Geliştirilen yaklaşımın tepkileri, diğer analitik yöntemlerin hesapladığı tepkilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Bayraktar *et al.* (1996) ve Bayraktar and Dumanoglu (1998) baraj-rezervuar-kaya zemin etkileşim probleminin asenkron (eş zamanlı olmayan) davranışını incelemek için Lagrange yaklaşımından yararlanmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelinde, uzak rezervuar ve uzak kaya zeminin radyasyon etkisi dikkate alınmayıp ilgili sınırlar belirli bir doğrultuda tutulmuştur. Sistemin birleşik hareket denklemi modal analiz metoduyla çözülerek dinamik tepkileri üzerinde tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, asenkron yer hareketi dikkate alındığında hidrodinamik basınçların genliği önemli ölçüde azalmıştır. Maity and Bhattacharyya (2003) sonlu elemanlar tekniğini kullanarak baraj-rezervuar sistemlerinin dinamik analizini yapabilen bir iteratif çözümleme yöntemini geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemde baraj ve rezervuar bölgeleri, birleşik sisteminin arayüzindeki etkileşim etkisini dikkate almakla ayrı ayrı çözülmüştür. Rezervuar ve baraj gövdesindeki düğüm bilinmeyenler sırasıyla basınç ve deplasmanlardır. Suyun sıkışabilirlik özelliği dikkate alınmıştır. Yöntemin doğru sonuçlar verdiği bir takım parametrik incelemelerle ispatlanmıştır. Baraj-rezervuar etkileşim probleminin sismik analizinde sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak ve barajın ayrıştırılmış mod şekillerinin yardımıyla zaman tanım alanında bir yaklaşım önerilmiştir (Lotfi 2003; Lotfi 2004). Önerilen yaklaşımın diğer yöntemler gibi etkili olduğu vurgulanmıştır. Baraj-rezervuar ve baraj-rezervuar-zemin sistemlerinin zaman tanım alanında analizi için, rezervuar dibi emilimini dahil edildiği yeni bir yöntem geliştirilmiştir (Küçükarslan 2004a; Küçükarslan 2004b). Bu yöntemde, sonsuz rezervuar için ikili karşılıklı

sınır eleman (dual reciprocity boundary element) yaklaşımı ve baraj için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen yöntemin doğru sonuçlar verdiği, bir takım parametrik incelemelerle tartışılmıştır.

Baraj-rezervuar sisteminin analizinde uygulanabilen prosedürlerden biri yalancı simetrik tekniğidir (pseudo-symmetric technique). Bu tekniği doğrulamak için bir beton ağırlık barajı üzerinde çeşitli analizler yapılmıştır (Omid and Lotfi 2007). Yaklaşımında, hareket denklemindeki simetrik olmayan katsayılar matrislerini simetrik hale getirmek için bu teknik kullanılmış ve yalancı simetrik tekniği adı verilmiştir. Zaman tanım alanında üç boyutlu baraj-rezervuar sisteminin dinamik analizi için yeni bir yaklaşım Birk and Ruge (2007) tarafından önerilmiştir. Bu yaklaşımda, rezervuar ve temelin rastgele bir geometriye sahip olup sonlu elemanlar yöntemiyle ayrıştırılmıştır. Rezervuarın uzak bölgesinde radyasyon sönümlenmesi, yarı sonsuz sıvı kanalı olarak hesaba dahil edilmiştir. Bu yöntemin ana özelliği, rezervuarın sonsuz sınırlarını yeni bir şekilde modellenmesidir. Dinamik baraj-rezervuar etkileşim probleminin analizi için sınır elemanlar yönteminin sonlu elemanlar yöntemiyle birleştirilerek yeni bir yaklaşım Seghir *et al.* (2009) tarafından geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, baraj gövdesi düğüm bilinmeyenleri yer değiştirmeler olup sonlu elemanlarla ve rezervuar bölgesi bilinmeyenleri basınç cinsinden olup sınır elemanlarla ayrıştırılmıştır. Ayrıca, sistemin hareket denklemindeki katsayılar matrisi simetrik olup mod birleştirme yöntemiyle çözülmüştür. Bu yöntemin performansı ve doğruluğu için, diğer yöntemlerle çeşitli örnekler çözülerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Rezervuar tabanındaki ve uzak sınırlarındaki frekansa bağlı sınır koşullarını hesaba katan zaman tanım alanında analizini yapan yeni bir yaklaşım Gogoi and Maity (2010) tarafından sunulmuştur. Ayrıca, sismik yükler altında baraj-rezervuar sisteminin analizi için Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü'nün (Short Time Fourier Transform STFT) dahil edilmesiyle geliştirilen uzak sınır koşulunun etkinliği de araştırılmıştır. Önerilen zaman-frekans hibrit yöntemi, baraj rezervuar sisteminin frekansa bağlı tepkilerini zaman tanım alanında hesapladığı için avantajlı bir yaklaşım olduğu vurgulanmıştır.

Frekans Tanım Alanında Geliştirilen Yöntemler

Chakrabarti and Chopra (1972) ağırlık barajları üzerine etki eden hidrodinamik basınçları düşey yer hareketi etkisi altında incelemiştir. Bulgularına göre, deprem yüklerine maruz kalan beton ağırlık barajların analizinde hidrodinamik basınçları özel bir önem taşımaktadır. Çünkü, yer hareketinin düşey bileşeni, dikey yüzeyli baraj gövdesi üzerine önemli miktarda büyük hidrodinamik kuvvetleri uygulamaktadır. Ayrıca, Chakrabarti and Chopra (1973) frekans tanım alanında dikey yüzeyli beton ağırlık baraj-rezervuar-temel

sistemlerinin dinamik analizi için ‘altyapı’ tekniği adına yeni bir yaklaşım geliştirmişler. Bu çalışmada, baraj gövdesi sonlu elemanlar yaklaşımıyla, rezervuar bölgesi ise dalga denklemi yardımıyla sonsuz uzunlukta olan bir süreklilik (continuum length) ortam şeklinde modellenmiştir. Barajın deplasman tepkileri, boş rezervuar durumundaki baraj titreşim modlarının doğrusal bir kombinasyonu olarak ifade edilmiştir. Rezervuar bölgesinde hesaplanan hidrodinamik basınçlardan doğan yükler, sistemin hareket denklemine eklenerek böylelikle birleşik sistemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Barajın ilk birkaç modunu kullanarak tepkilerin hızlı ve doğru hesaplanabilmesinden bu yaklaşımın avantajı olarak ifade edilmiştir. Bir başka araştırmalarında Chopra ve arkadaşları, alt yapı yaklaşımını daha da geliştirerek ağırlık barajların doğrusal dinamik analizi için genel bir prosedür önermişlerdir (Hall and Chopra 1980; Chopra and Chakrabarti 1981; Chopra and Gupta 1982; Hall and Chopra 1982a; Hall and Chopra 1982b; Fenves and Chopra 1984). Bu teknikte su sıkıştırılabilirliği, baraj ve temel esnekliği, rezervuar bölgesinin rastgele geometriye sahip olabildiği dikkate alınmıştır. Baraj-rezervuar-kaya zemin etkileşimi dikkate alan bu yaklaşım, baraj, rezervuar ve kaya zemin olmak üzere üç alt yapıdan oluşmaktadır. Baraj gövdesi sonlu elemanlarla ayrıştırılırken, rezervuar ve zemin bölgesi ise sırasıyla sonsuz uzunlukta bir süreklilik ve viskoelastik ortamlar olarak modellenmiştir. Barajın deplasmanları, baraj-kaya zemin sistemine ait doğal modlarının doğrusal kombinasyonu ile ifade edilmiştir. Ayrıca, Bouaanani *et al.* (2002) frekans tanım alanında altyapı yaklaşımını kullanarak ağırlık barajlarda buz örtüsünün varlığını dikkate alınarak buz-baraj-rezervuar-zemin etkileşim problemini incelemişlerdir. Bu çalışmada, buz örtüsünün varlığı, rezervuardaki hidrodinamik basınç dağılımının yanı sıra barajın ivmeleri ve frekans tepki eğrileri üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir. Mei *et al.* (1979) suda titreşen yapıların gerçek analizinde basit ifadeler türetip, yapı-sıvı etkileşim probleminin çözümü için de daha genelleştirilmiştir. Bunun için, lineer kiriş ve akustik teorileri kullanılarak basit bir baraj-kiriş modeli hazırlamışlardır. Kapalı formda geliştirilen formüller hibrit eleman yöntemi yardımıyla sayısal olarak frekans tanım alanında çözülmüştür.

Beton ağırlık barajların, baraj-rezervuar ve rezervuar-temel etkileşimi etkilerini dikkate alınarak, yatay ve düşey harmonik yer hareketindeki tepkileri hesaplamak için altyapı yöntemine dayalı analitik bir prosedür Fenves and Chopra (1983) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde rezervuar tabanındaki hidrodinamik basınç dalgalarının temel ortamına kısmi olarak emilimi dahil edilmiştir. Ayrıca, mevcut altyapı sistemini alüvyon ve tortular dahil olmak üzere beton ağırlık barajların dinamik analizi için genişletmişlerdir (Fenves and Chopra 1984). Daha sonra, ağırlık barajlarının dinamik davranışında önemli parametreleri tanıtarak

iki durumu kapsayan frekans tanım alanında basit bir yaklaşım geliştirmişler (Fenves and Chopra 1985c; Fenves and Chopra 1987). Durumlar, rijit temel kayası üzerinde oturan baraj-rezervuar ve esnek temel kayası üzerinde oturan baraj-temel etkileşim problemleridir. Bu iki farklı durumunun sadece temel titreşim modundaki tepkileri hesaplanmasında eşdeğer bir tek serbestlik dereceli sistem modellenmiştir. Ayrıca, maksimum deformasyonlar ve eşdeğer yanal kuvvetler, belirli bir yer hareketi için tepki spektrumu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu araştırmacılar, baraj-rezervuar, baraj-kaya zemin, baraj-rezervuar-kaya zemin etkileşimi ve rezervuar dibi emme etkileri içeren genel bir yaklaşımı geliştirmişlerdir (Fenves and Chopra 1985b). Lotfi *et al.* (1987) iki boyutlu baraj-rezervuar-temel kaya etkileşim probleminin lineer analizinde tüm etkileri dikkate alınarak frekans tanım alanında yeni bir sonlu eleman yaklaşımı önerdiler. Bu yaklaşımda temel bölgesi homojen katmanlı ortam olarak modellenebildiği belirtilmiştir. Baraj, baraj-rezervuar, baraj-temel ve baraj-rezervuar-temel sistemleri için sonuçlar elde edilmiş ve üzerinde tartışılmıştır. Bu yaklaşımda, rezervuar-temel etkileşiminin sınır koşulları simülasyonunun önemli hatalara yol açabileceği vurgulanmıştır. Daha sonra, Humar and Jablonski (1988) ağırlık barajı-rezervuar sistemlerinin sismik analizini sınır eleman yöntemiyle gerçekleştirdiler. Ayrıca, Dominguez and Medina (1989) ve Medina and Dominguez (1989), frekans tanım alanında iki boyutlu bir baraj-rezervuar-kaya zemin sisteminin dinamik analizi için sınır eleman yaklaşımını kullanmışlar. İlgili araştırmalarda yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. Böylece, ağırlık barajı-rezervuar sistemlerinin iki boyutlu dinamik analizi için sediment ve temel etkileri dahil olmak üzere sonlu elemana dayalı yeni yaklaşımlar zaman zaman geliştirilmiştir (Bougacha and Tassoulas 1991c; Bougacha and Tassoulas 1991a; Bougacha and Tassoulas 1991b). Bu araştırmacılar, sedimenti iki fazlı bir ortam (su ile doymuş viskoelastik ortam- (fluid-filled, poroelastic solid)) olarak modelleyerek su, sediment ve temel arasındaki etkileşimi tanıyan hiper-elementler geliştirmişlerdir. Çözölen örneklerden elde edilen sonuçlar, sediment tabakasının baraj gövdesi davranışını etkilediği belirtilmiştir. Sonlu ve sonsuz elemanları kullanılarak rezervuar tabanındaki sedimentin fiziksel ve mekanik özelliklerini göz önünde bulunduran Valliappan and Zhao (1992), ağırlık baraj-rezervuar-zemin sistemi için yeni bir model geliştirmişlerdir. Bu sistemlerde sediment tabakası, sistemin enerji kaybı ve su sediment ara yüzeyine gelen dalgalarının büyütölme görevini yaptığı sonucuna varılmıştır. Sonlu eleman, sınır eleman, modal analiz ve altyapı yöntemlerinin kombinasyonu ile baraj-rezervuar etkileşim problemlerin çözöümü için Tsai *et al.* (1992) tarafından yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, sonlu eleman ve sınır eleman arasındaki arayüzey ve sistemin diğör matrisleri simetrik olmadığından yöntemin zorluk tarafı olarak belirtilmiştir.

Yansıyan dalgaların sonsuza doğru gitmesi, rezervuar tabanında dalgaların emilimi, zemin ile rezervuarın birleşimi, rezervuarda hidrodinamik basıncı gibi bu parametreler sistemin davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bunun için, bir boyutlu dalga yayılma modeli (basitleştirilmiş yöntem) veya esnek zemin ile su arasındaki birleşimini sağlayan titiz yöntemleri (genel yöntem) kullanılarak, rezervuar-zemin ve yapı-rezervuar etkileşim problemleri çözülebilmektedir. Titiz yöntemin hesaplama boyutu fazla olduğundan, arayüzey birleşimini ihmal edilip tek boyutlu dalga yayılım modeli kullanılarak basit yöntemiyle çözüm yapılabilir. Dolayısıyla, Chandrasher and Humer (1993), titiz ve basitleştirilmiş yöntemleri geliştirerek ağırlık barajların sismik tepkileri üzerinde karşılaştırmalı incelemeler yapmışlardır. İncelemenin sonucunda, sunulan iki yöntemin birbirleriyle yakın sonuçlar verdiği ve titiz yönteminin analiz çabası fazla olduğu belirtilmiştir. Sonuç itibarıyla, baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin karmaşık topoğrafik koşulları nedeniyle, sonlu elemanlar yöntemi, gerek sıvı bölgesi modellenmesinde, gerek zemin bölgesi modellenmesinde, gerek bu ortamların birbirleriyle karşılıklı etkileşiminin modellenmesinde, gerek zemin ve su ortamlarındaki sonsuza uzanan bölgelerinin modellenmesinde ve bunların birleşik analizi, yukarıda yapılan geniş bir literatür araştırmasıyla daha güçlü ve elverişli bir yöntem olduğu kabul edilmiştir. Bununla birlikte, yakın bölgelerinin fazla uzunlukta ve derinlikte alınması, sonsuza uzanan ortamların göz önüne bulundurulması, sistemdeki serbestlik dereceleri önemli ölçüde artmasına sebep olup analiz süresi oldukça uzun olmaktadır. Dolayısıyla, sonlu elemanlar yönteminin etkinliğini arttırmak için, sonsuza uzanan bölgelerinin alternatif modellenmesi ve yakın bölgelerinin boyutlarını uygun bir şekilde kısa alınması önerilmektedir. Yakın rezervuar ve yakın zemin bölgesi, barajdan kısa bir mesafede kesmek ve yansıyan dalgaların sonsuza radyasyonunu hesaba katmak için uygun bir sonsuz sınır koşulu geliştirmek gerekmektedir. Bunun için nice araştırmacılar yeni modeller geliştirmişlerdir.

Birleşik Sistemde Etkileşim Mekanizması ve Enerji Kaybı

İnşaat mühendisliği kapsamında inşa edilen yapılar, daha büyük sistemlerin bir ögesidir. Farklı ögelerin birleşmesi, genel bir sistemi inşa etmektedir. Yapılar, deprem gibi geçici dinamik yüklere maruz kaldıklarında, tüm sistemin diğer ögeleriyle etkileşime geçip aralarında enerji transferi gerçekleşir. Bu karşılıklı etkileşim sonucunda yapının dinamik davranışı, tüm ögelerin malzeme özellikleri, etkileşim mekanizması ve dinamik yükleme türüne bağlı olarak değişmektedir. Barajlar, zemin ve su ile beraberce bu mekanizmayı yaşamakta olan devasa yapılardır. Barajların, zemin ve su ile olan dinamik etkileşimi, arayüzeylerinde meydana gelen mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olmaktadır. Dinamik

analizinde özel yaklaşımlara ihtiyaç duyan bu tür etkileşim problemleri, zemin ve rezervuar gibi, yapıdan daha büyük öğeleri içermektedir. Genel sistemin boyutu oldukça büyük olup, tüm öğelerin sonlu elemanlar gibi yöntemlerle modellenmesi ve çözümü çok zaman aldığından neredeyse imkansızdır. Bu nedenle, yapının dinamik davranışını inceleyen araştırmacılar genellikle yapı ve yapıya yakın bölgelerle ilgilenmişlerdir. Böylece, devasa boyuta sahip genel sistemi küçük boyuta sahip sisteme, doğru bir şekilde indirgenerek çözümüyle uğraşmışlardır. Ayrıca genel sistemi, yakın ve uzak bölgelere bölünerek uzak bölgenin sınırlarında yapay sınır koşulları koyulmaktadır. Uzak bölgeler genellikle sonlu elemanlar yaklaşımından daha farklı yaklaşımlarla modellenebilir. Uzak bölgelerin en az bir doğrultusu sonsuz olduğu, malzeme özelliği homojen izotrop olduğu ve lineer davranış gösterdiği kabulleriyle makul bir şekilde modellenebilir. Dolayısıyla, sonsuz uzunlukta olan uzak bölgelerinin gerçek ve tüm boyutlarını dikkate alınmasına ve modellenmesine gerek kalmamıştır. Sadece uzak bölgelerinin yapıya olan dinamik etkisini dikkate almak ve uygun bir şekilde modellenmesi yeterlidir.

Yukarıda bahsedilen ve aralarında enerji transferi yaşanan ortamlarda enerji kaybının yaşanması tabii bir davranıştır. Bunun için, dinamik baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminde enerji kaybı mekanizması, bir araya gelen üç ana kaynağı içermektedir. Bu ana kaynaklar sırasıyla alt başlıklarda açıklanarak literatürde yapılan modellenmeleri ile ilgili çalışmalar özet olarak verilmiştir.

Radyasyon sönümleme

Sonsuz boyuta sahip bir birleşik probleminin uzak bölgeleri, dalga dinamiğinde önemli görevi taşımaktadırlar. Bu bölgeler, sonsuz yönde hareket eden dalgaları yakın bölgelere geri döndürmeme görevini yerine getirirler. Dalgalar enerjiyi yakın bölgelerden uzak bölgelere geri dönüşümsüz olarak aktarıp sistemde enerji kaybı mekanizmasını sebep olurlar. Bu mekanizma, radyasyon sönümlemesi olarak adlandırılır ve böylelikle, yakın bölgelerdeki enerjiyi absorbe ederek yapının dinamik tepkisini önemli ölçüde azaltırır. Bu tür mekanizmada, radyasyon sönümlemesinin doğru bir şekilde modellenmesi araştırmacıların odak noktası olmuştur. Dolayısıyla, sonsuz bölgeleri modellemek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan birisi yansıtmayan sınır koşulları (non-reflecting, or radiating, or, transmitting boundary conditions) olup normal, sabit ve kayıcı sınır koşullarından farklıdır. Diğer sınır koşulu türü ise, sonsuz bölgenin sınırlarına yerleştirilebilen visküz sönümleyicilerdir. Bu tür sınır koşulları sonlu elemanlar yaklaşımında kolaylıkla kullanılabilir. Bu iki türün dışında, sonlu ve sonsuz elemanların birleşmesiyle modellenen sınır koşullarıdır. Ayrıca, sonlu ve sınır elemanların birleşmesiyle de sınır

koşulların modellenmesi mümkün olmuştur. Böylece, sonlu elemanlar yakın bölgede ve sınır elemanlar ise uzak bölgelerin sınırlarında yerleştirilerek dalgaların geçirgenliğini sağlamaktadır. Sınır eleman yaklaşımıyla uzak bölgelerin modellenmesi, analitik olarak geliştirildiğinden radyasyonu tam olarak karşılanmaktadır. Ölçekli sınır eleman (scaled boundary element) yöntemi veya tutarlı sonsuz sonlu eleman hücre (consistent infinite finite element cell) tekniği, sonsuz bölgelerde radyasyon sönümlemesini sağlayan diğer alternatif yaklaşımlardır. Yukarıda bahs edilen çeşitli yaklaşımlar kısa bir şekilde alt başlıklarda bahsedilmiştir.

Zemin bölgesinde keskin bir empedans farkı olmadıkça (rijit ortam), barajdan yansıyan deprem dalgalar genellikle geri dönmeyecektir. Radyasyon sönümü olarak adlandırılan bu enerji yayılımı mekanizması, zemin bölgesindeki deprem dalgaları için önemlidir. Ancak, yüksek frekanslar dışında meydana gelen rezervuar bölgesindeki hidrodinamik dalgaları için daha az önemlidir (Fenves and Chopra 1985a; Løkke 2019).

Sonlu eleman yöntemi

Birçok karmaşık problemlerin statik ve dinamik analizini kolaylıkla yapabilen sonlu eleman yöntemi, güçlü bir sayısal yaklaşımdır. Bu yöntem, 1960'lı yıllardan beri zemin-yapı etkileşim probleminin dinamik analizinde çok yaygın olarak kullanılmıştır. Bu yöntemle, problemlerin modellenmesinde karşılaşılan zorlukların (örneğin, homojen olmayan malzeme durumları, karmaşık geometri, doğrusal olmayan davranış ve çeşitli mühendislik zorlukları gibi durumlar) üstesinden kolaylıkla gelinebilmektedir. Bu yöntemle bir problemi modellenirken, yakın bölgelerin boyutlarını uygun bir şekilde seçilmesi, sonsuz bölgelerin radyasyon sönümlemesini doğru bir şekilde sağlanması ve rijitliğinin hesaplanması gibi hususlar zaman alıcıdır ve bu parametreleri dikkate almakla yöntemin etkinliği artmaktadır. Bu amaçla ilk defa Lysmer and Kuhlemeyer (1969), dalgaların sonsuz sınırlarda yansıtılmaması için sınırlarda viskoz sönümleyiciler kullanılarak bir sınır koşulu modeli sunmuşlardır. Geliştirilen bu viskoz sınırı koşulu, 53 yıldır mühendislik mekaniğinde ve ADINA, ANSYS, ABACUS gibi genel amaçlı sonlu eleman programlarında emici sınırı (absorbing boundary) olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Fiziksel yorumu viskoz sönümleyici olduğundan ve sonlu eleman yaklaşımında kullanılışı kolay olduğundan popüler bir sınır koşuludur. Daha sonra, Ang and Newmark (1971) tarafından geliştirilen genel sınır koşulu, esas olarak dalga denklemindeki atalet kuvvetlerinin 'D'Alembert kuvvetlerinin' adım adım transferi fikrine dayalı olarak geliştirilmiştir. Lindman (1973) ve Lindman (1975) geliştirdiği sınır koşulları modeline yakın ilişkili bir takım diğer sınır koşulları bir kaç yıl sonra akustik dalga denklemi için Engquist and Majda (1977) tarafından ve elastik dalga denklemi için

Clayton and Engquist (1977) tarafından geliştirilmiştir. Engquist and Majda (1977) tarafından geliştirilen sınır koşulları, kartezyen ve silindirik koordinatlara göre tanımlanan akustik ve elastik dalgalar için karmaşık olduğu ifade edilmiştir. Bu yaklaşım, sözde diferansiyel operatörlerin (pseudo-differential operators) oransal yaklaşımına dayanmasına ve Lysmer and Kuhlemeyer (1969) sınır koşulundan oldukça farklı olmasına rağmen, akustik dalgalar için en basit sınır koşulu, Lysmer and Kuhlemeyer (1969)'un viskoz sınır koşuluna eşdeğerdir. Yukarıda bahsedilen yerel (zaman veya yere bağlı sınır koşuludur) ve tutarlı olmayan sınır koşulları doğru sonuçlar verse de, büyük hesaplama çabası gerektirdiğinden ve geniş yakın bölge alanı gerektirdiğinden baraj-rezervuar problemi için uygun değildir.

Saini *et al.* (1978), baraj-rezervuar sisteminde hidrodinamik basınçları sonlu elemanlar yaklaşımıyla modellerken rezervuar bölgesinin büyük bir kısmını hesaba katmak için iki farklı dalgayı dikkate alınarak bir sınır koşulu geliştirmiştir. Birincisi, sınıra doğru ilerleyen dalgalar diğeri ise sınırdan geri dönen dalgalardır. Geliştirilen sınır koşulu, dalga denkleminden türetilmiştir (Zienkiewicz and Newton 1969). Tüm bu yerel emici sınır koşulları, sonlu fark yönteminde oldukça geniş kullanılmıştır. Birçok araştırmacı, bunların uygulanması, doğruluğu ve istikrarı için araştırmalar yapmışlardır. Bu sınır koşullarla ilgili ayrıntılı bir genel bakış, Givoli (2013)'ün çalışmasında bulunabilir. Ancak, bu sınır koşulları, sonlu elemanlar yönteminde daha az etkiye sahiptir. Sonlu eleman yaklaşımını kullanılarak uzak sınırların modellenmesinde ilk araştırmacılardan biri Cohen (1980), elastik dalga dinamiği problemleri için asimptotik tekniği ile, paraksiyel sınır koşulları olarak adlandırdıkları sınır koşullarını geliştirmiştir. İki boyutlu durumda, paraksiyel sınır koşulları, Engquist and Majda (1977) sınır koşullarına eşdeğerdir. Paraksiyel sınır koşulları sayısal analizlerde kullanıldığında, Lysmer and Kuhlemeyer (1969) geliştirdiği sınır koşullarından daha iyi olmadığı belirtilmiştir. Liao and Wong (1984) sınırlarda veya sınır noktalarına yakın düğümlerdeki hareketi daha önceki zamanlarda ekstrapolasyonla tahmin ederek bir sınır koşulu geliştirmiştir. Bu kavram, Engquist and Majda (1977)'nin geliştirdiği sınır koşulları ailesine çok yakındır. Ayrıca, Bayliss and Turkel (1980) ve Feng (1983) tarafından geliştirilen yerel yansıtmayan sınır koşulları, geliştirilen diğer sınır koşullarının tasarlanma biçimleri, sonuçları ve performansları bakımından farklılık göstermiştir. Konuyla ilgili inceleme, Givoli (2013)'te yapılmıştır. Kausel (1988), literatürde en yaygın ve iyi bilinen yansıtmayan sınır koşullar modelini incelemiştir (Lysmer and Kuhlemeyer 1969; Ang and Newmark 1971; Engquist and Majda 1977; Liao and Wong 1984). Yazar, bu sınırların matematiksel olarak eşdeğer olduğunu ve bu nedenle karşılaştırılabilir dalga emilme özelliklerine sahip olmaları

gerektiğini vurguladı. Bu nedenle, çeşitli sınır koşullar modeli esasen bir ve aynı sınır mekanizmasının alternatif gerçekleştirmeleridir ifadesini belirtmiştir.

Kellezi (2000) sonlu eleman yaklaşımında alternatif bir sınır koşulu geliştirdi. Bu yerel sınır koşulu, simetri rijitlik ve sönüm matrisilerle tanımlanmıştır. Yerel bir sınır koşulu olduğundan sistemin hareket denkleminde yer almaktadır. Hem zaman tanım alanında ve hem frekans tanım alanındaki analizlerde kullanılabilir. Eleman matrisleri için açık formüller ilgili makalede verilerek geliştirilen yaklaşımın doğruluğu için sayısal örnekler çözülmüştür. Zhao and Liu (2003) ve Liu zaman tanım alanında kesilmiş sınırı (truncated boundary) üzerinde yansıtmayan sınır koşulu geliştirmek için operatör bölme yöntemini (operator splitting method) kullanmıştır. Önceki geliştirilen yapay sınır koşullarıyla karşılaştırıldığında, bu yaklaşımın daha kolay ve anlaşılır olduğu belirtilmiştir. Yerel ve yerel olmayan sınır koşulları arasındaki en geniş karşılaştırmalı çalışma Givoli and Patlashenko (1998) tarafından yapılmıştır. Hall and Chopra (1982b), yakın rezervuar bölgeyi sonlu elemanlarla ve uzak bölgeyi sürekli bir ortam kabuluyla modellemişlerdir. Bu iki modellemenin birleşmesiyle rezervuar bölgesinde radyasyon etkisi dikkate alınmıştır. Ayrıca, bu modellemede sonlu eleman ağının çok sık olması gerektiğinden ve uzak bölgelerden geriye dönen dalgaların emilimi sağlandığından bahs edilmiştir. Geliştirilen sınır koşulu, zaman tanım alanında ve frekans tanım alanındaki analizlere kullanılabilirliği ifade edilmiştir.

Sharan (1985a) ve Sharan (1985b) harmonik yatay yer hareketine maruz kalan barajların üzerindeki hidrodinamik basıncın analizinde radyasyon sönümünün etkilerini modellemek için bir sonlu eleman tekniği geliştirmiştir. Rezervuar suyunun sıkıştırılabilir olduğu kabul edilerek dinamik analizler frekans tanım alanında yapılmıştır. Yazarın sunduğu sınır koşulu, herhangi dış yük frekansı için uygun olduğunu ve Sommerfeld (1949) radyasyon koşuluna göre daha etkili olduğunu belirtilmiştir. Sharan (1985a)'nın bir diğer çalışmasında, sıvı bölgesinin yüksekliğine bağlı ve yapıya daha yakın mesafede radyasyon sınır koşulu geliştirilmiştir. Ayrıca Sharan (1986)'da yeni bir sınır koşulu, her yönde sonsuz sıkıştırılmaz sıvı ile çevrelenen iki boyutlu yapılar için geliştirilmiştir. Sharan (1992)'de sonlu eleman veya sınır eleman tekniğinde kolaylıkla uygulanabilen rezervuar dibi dalga emilimi göz önünde bulundurarak sonsuz rezervuar için frekansa bağlı bir radyasyon sınır koşulu önerilmiştir. Önerilen sınır koşulunun dezavantajı, uzayda yerel olmaması ve sınır koşulunu tanımlayan sonsuz serisinin yalnızca ilk teriminden oluşmasıdır. Yukarıda bahsedilen ve Sharan'a ait geliştirilen bütün sınır koşulları sıvı bölgesi için yapılmıştır.

Maity ve Bhattacharyya (1999)'da harmonik yer hareketine maruz kalan barajlar üzerindeki sıkıştırılabilir suyun hidrodinamik basıncının sonlu elemanlar metodunu

kullanılarak radyasyon sönümünün etkilerini modelleyebilmek için basit ve etkili bir uzak sınır koşulu önerilmiştir. Önerilen sınır koşulu, yapıdan nispeten küçük bir mesafeye yerleştirilebilir, bu da analiz süresini azaltmaktadır. Geliştirilen sınır koşulunun dezavantajları ise, rezervuarın temel frekansından daha yüksek frekanslara sahip dış yüklere karşı iyi sonuçlar vermediği, rezervuarın yüzeyindeki dalgaların hesaba katılmadığı ve rezervuarın dibindeki dalgaların emiliminin dikkate alınmamasıdır. Ayrıca, bu sınır koşulunun frekansa bağlı bir yaklaşım olduğundan zaman tanım alanındaki analizlerinde kullanılması verimli olmadığı belirtilmiştir. Son 50 yılda sunulan, yansıtmayan sınır koşulu modelleri üzerinde incelememe yapan ve sıfır-dereceli sınır koşulundan Sommerfeld (1949) yüksek dereceli sınır koşullarına kadar gelişimini gözden geçiren Givoli (2004), yansıtmayan koşullarının baraj-rezervuar etkileşim problemler için daha pratik, kolay uygulanabilir ve hesaplama açısından verimli olduğunu vurgulamıştır.

Sonlu-sonsuz eleman yöntemi

Sonsuz sınırların modellenmesi, özel olarak geliştirilmiş sonsuz elemanlarla da gerçekleştirilebilmektedir. Bu yaklaşım ile yakın bölge, sonlu elemanlarla ve uzak bölge ise sonsuz elemanlarla modellenmektedir. Aynı teknik bu tez çalışmasında da uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar verilmiştir (Rasa and Budak 2021; Rasa *et al.* 2022; Rasa *et al.* 2023c; Rasa *et al.* 2023a). Sonsuz elemanların şekil fonksiyonları, temel çözümün (fundamental solution) özel formundan elde edilmektedir. Bu tür modelleme türü çoğunlukla frekans tanım alanı ile sınırlıdır. Sonsuz sınırlarda kullanılan sonsuz elemanın n . düğümü için frekansa bağlı şekil fonksiyonu, ξ - η doğal koordinat sisteminde ayarlanmaktadır. Geliştirilen sonsuz elemanların şekil fonksiyonları tasarımında dalga azaltma parametresi, dalganın türü ve hızı ve dalganın frekansı yer almaktadır. Bu modellenme türü, sonsuz bölgelerde radyasyonu iyi bir şekilde sağlayabildiği için sonlu eleman yönteminde daha etkili bir yaklaşım olarak bilinmektedir. Ayrıca, dünya çapında araştırmacılar arasında popülerlik kazanmıştır. Bu yaklaşımın başlanıçları Bettess (1977), Bettess (1980), Bettess and Bettess (1984), Bettess and Bettess (1991a) ve Bettess and Bettess (1991b) tarafından yapıldığı anlaşılmıştır. Daha sonra, Medina and Penzien (1982), Valliappan and Zhao (1992), Khalili *et al.* (1997) ve Yerli *et al.* (1998) tarafından farklı sonsuz elemanlar modeli başarıyla geliştirmişlerdir. Bettess (1980) sonsuz elemanlar yöntemini kısaca gözden geçirerek yeni yaklaşımlar geliştirmiştir. Ayrıca, geliştirdiği sonsuz eleman için uygulanacak programlama teknikleri, esneklik ve olası problemler hakkında alternatif çözümler sunup örneklerle birlikte tartışmıştır. Beer and Meek (1981) uzak bölgelerin sonsuz elemanlarla ekonomik modellenmesini sağlayan parametrik bir çalışma yürütmüştür. Geliştirdiği sonsuz eleman tipinin iki veya üç boyutlu

problemlerde iyi sonuçlar verdiği örneklerle göstermiştir. Sonsuz ortamlarda dairesel, kare ve küresel açıklıklar için birkaç örnek problemi çözerek sonuçlarını diğer sayısal ve teorik çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Olson and Bathe (1985b), sıvı-yapı etkileşim probleminin geçici dinamik tepkilerinin incelemesinde yeni bir sonsuz eleman tipini Çift Asimptotik Yaklaşımını kullanılarak geliştirmiştir. Geliştirilen sonsuz eleman tipinin düşük ve yüksek frekanslarda iyi sonuçlar verdiği bir takım örnek problemlerle gösterilmiştir. Häggblad and Nordgren (1987), doğrusal olmayan zemin probleminin geçici tepkileri hesaplanmasında yeni sonsuz eleman tipini geliştirdi. Geliştirilen sonsuz eleman tipi, Lysmer and Kuhlemeyer (1969) viskoz sönümleyicileri içermektedir. Elemanın doğruluğu bir takım statik ve dinamik problemlerin çözümüyle ispatlanıp makul sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Yapı-zemin etkileşimi probleminde iki boyutlu tabakalı yarı-sonsuz zemin bölgesi için Yun *et al.* (2000) tarafından frekansa bağlı analitik sonsuz elemanlar geliştirilmiştir. Önerilen sonsuz eleman tipini kullanılarak, elemanın kütle ve rijitlik matrisleri, uzak zemin ortamında dalga yayılma özelliklerini temsil eden analitik frekans ve sabit matris formlarında elde edilebilmektedir. Geliştirilen sonsuz elemanın, literatürde verilen örnekleri çözülerek iyi ve doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca, bu sonsuz eleman modeli zaman tanım alanındaki çözümlerde de kullanılabildiği belirtilmiştir.

Sonlu-sınır eleman yöntemi

Bu teknik, bir çok araştırmacı tarafından zemin-yapı, zemin-yapı-sıvı etkileşim problemlerinin sonsuza uzanan bölgelerinin modellenmesinde kullanılmıştır. Dinamik çözümler zaman ve frekans tanım alanında yapılmıştır. Bu yaklaşımın avantajı, uzak bölgelerinin sonlu elemanlarla ayrıklaştırılmamasıdır. Ayrıca, az uzunlukta yakın bölgelerin dikkate alınmasıyla uygun olup sonsuz bölgelerdeki radyasyon, Sommerfield radyasyon koşullarına denk gelmektedir. Yani, radyasyon sönümlenme parametresi analitik olarak hesaba katılmaktadır. Bu nedenle, bu teknikte, sonsuz bölgelerin sonlu elemanlarla modellenmesine gerek yoktur. Bu tekniğin dezavantajı, sistem matrisinin simetrik olmaması ve negatif olmasıdır. Ayrıca, bu yöntem anizotropik bölgeler için, malzeme ve geometri değişimleri bakımından doğrusal olmayan analizi için ve karmaşık geometrisi olan problemlerin incelenmesi için uygun değildir. Sınır eleman yönteminde, sadece bölgenin yüzeyleri sınır elemanlarla ayrıklaştırılması gerekir, diğer sayısal tekniklerle karşılaştırıldığında, hesaplama çabası açısından genel olarak daha az maliyetli bir yöntemdir.

İzotrop ve homojen ortamların modellenmesinde sonsuz bölgeler dahil olmak üzere Touhei and Ohmachi (1993) tarafından Sınır İntegral Denklem Yöntemi veya Sınır eleman Yöntemi kullanılmıştır. Dinamik yüklere maruz kalan yapı-sıvı etkileşim probleminin zaman tanım alanında incelenmesi, sonlu elemanlar yöntemin, sınır eleman yöntemiyle birleştirilerek Estorff and Antes (1991) tarafından yapılmıştır. Bu incelemede, lineer elastik yapıyı sonlu elemanlarla ve sıvının sonsuz bölgesi dahil olmak üzere sınır elemanlarla ayrıklaştırılarak yeni bir sonlu-sınır eleman prosedürü geliştirilmiştir. Bu tekniğin diğer yaklaşımlara göre kolay olduğu ve doğrusal olmayan problemlere genişletilebilirliği belirtilmiştir.

Sınır eleman yöntemi, yapı-zemin etkileşim problemlerinin dinamik analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yarı sonsuz zemin ortamının modellenmesi için güçlü bir yöntemdir, çünkü sadece yarı sonsuz ortamın sınırları sınır elemanlarla ayrıklaştırılır. Böylece, hesaplama maaliyeti az olup zemin bölgesindeki radyasyon koşulu da otomatik olarak hesaba katılmaktadır. Altyapı yöntemine dayalı olarak, yapının ve yapıya yakın bölgeyi sonlu elemanlar yöntemiyle ayrıklaştırıldığı ve sonsuz zeminin sınır elemanlar yöntemiyle modellendiği birçok hibrit yöntem (birleştirme yöntemi) önerilmiştir (Zienkiewicz *et al.* 1977). Zaman tanım alanında iki ve üç boyutlu elastik temel-zemin etkileşim probleminin dinamik davranışı incelenmesinde yeni bir sınır-sonlu eleman yaklaşımı geliştirilmiştir (Karabalis and Beskos 1984; Spyarakos and Beskos 1986). Araştırmacılar, esnek zemin bölgeyi sonlu elemanlarla modellerken, sonsuz zemin ortamını sınır elemanlarla modellemişlerdir. Geliştirilen yaklaşımın, parametrik incelemelerle doğru sonuç verdiği ispatlanmıştır. Zaman tanım alanında baraj-rezervuar-zemin sistemlerinin dinamik analizi için sonlu eleman ve sınır eleman yöntemleri ile birleştiren Touhei and Ohmachi (1993), yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Formülasyonda, katı ve sıvı ortamlarının hareket denklemleri birleştirilmesinde ağırlıklı kalıntı prosedürü (weighted residual procedure) uygulanmıştır. Sonunda, Newmark beta prosedürüne benzer bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritma, baraj-temel ve rezervuar-temel etkileşimlerinin tüm etkileri dikkate alınmıştır. Ayrıca, temel ve rezervuar sınırlarındaki hem elastodinamik hem de hidrodinamik dalgaların emilimi hesaba katılmıştır.

Zemin-yapı etkileşim probleminin dinamik analizi için sonlu elemanlar, sınır elemanlar, sonsuz elemanlar ve sonsuz sınır elemanları birleştirilerek Chuhan *et al.* (1999) tarafından yeni bir model sunulmuştur. Geliştirilen modelde sonsuz tabakalı zeminin radyasyon etkileri dahil edilmiştir. Zemine ait yakın bölgenin doğrusal olmayan analizi için eşdeğer bir doğrusal yaklaşım kullanılmıştır. Ayrıca, kaya ve zeminin elastisite modüllerinin oranını değiştirilerek yapı ve zemin tepkisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Model, bir takım

örneklerle doğrulanmıştır. Ayrıca, sonlu eleman-sınır eleman yöntemleri birleştirilerek yeni bir model sunan Yazdchi *et al.* (1999), yapı-zemin etkileşim probleminde yapının ve temel malzemesinin farklı rijitlik oranlarıyla yapının genel davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu incelemede, baraj-temel birleşik probleminin dinamik davranışı da incelenmiştir. Analizde yapı, sonlu elemanlarla ve yarı sonsuz zemin bölgesi ise sınır elemanlarla modellenmiştir. Pratik durumlar için deprem öncesi yüklere (su basıncı, yapının ağırlığı vs.) bağlı başlangıç koşullarının analize dahil edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Sınır eleman yöntemi yardımıyla yapı-zemin etkileşim probleminin üç boyutlu dinamik analizi için yeni yaklaşımlar geliştirilerek incelenmiştir (Dravinski 1982; Wong 1982; Reinoso *et al.* 1997). Problemdeki uzak sınırlar, sınır elemanlarla modellenerek böylece radyasyon koşulları gerçek bir şekilde analize dahil edilmiştir. Geliştirilen yöntem, çözülen örneklerle doğrulanmıştır. Sınır eleman yönteminde geliştirilen yöntemlerde, Green fonksiyonlarının hesaplanması genellikle uzun olduğundan bir dezavantajı olabilir. Bunun yanı sıra, geoteknik problemleri için yetersiz kalabilir. Ayrıca, sadece lineer analizler için sınırlıdır. Sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yöntemi, karmaşık geometrili problemler için daha iyi olabilir, ancak tüm bölgelerin elemanlarla ayrıştırılması gerekmektedir.

Rezervuar alt sınırlarında sönümleme

Baraj-rezervuar ve baraj-rezervuar-zemin etkileşim problemindeki rezervuar bölgesinin altı, anakaya, alüvyon, silt ve oldukça değişken sediment malzemelerden oluşan bir tabakadır. Bu tabakanın temeli veya kendisi rijit bir ortam kabulüyle baraj için elde edilen dinamik tepkiler, esnek bir ortamı kabulüyle elde edilen dinamik tepkilerden farklıdır. Çünkü, hidrodinamik dalgalardan doğan yükler rijit ortama varıldığında yansıtılırken, esnek ortama varıldığında bir kısmı veya tamamı absorbe edilir. Hidrodinamik dalgaların enerjisi rezervuar sınırlarında iki mekanizma tarafından absorbe edilir; 1) zemin-rezervuar etkileşimi nedeniyle dalga enerjisi yarı-sonsuz zemin bölgesine aktarılır, ki bu durum yukarıdaki radyasyon sönümleme alt başlığında detayları ile anlatılmıştır, ve 2) rezervuar sınırlarında biriken sediment tabakasında absorbe mekanizmasıdır. İkinci durumundaki enerji absorbe mekanizması için literatürde geliştirilen yaklaşımlardan burada özet olarak bahsedilmiştir.

Rezervuar sınırlarında biriken sedimentlerin etkilerine ilişkin araştırmacıların çoğu, zemin-rezervuar etkileşiminin göz ardı edildiği ve sedimentlerin etkisi, bir boyutlu dalga yansıma katsayısı (α) ile modellendiği alt yapı yönteminin sonuçlarına dayanmaktadır (Fenves and Chopra 1985a; Tan and Chopra 1995a). Ayrıca, araştırmacılar sediment tabakası için iki tür malzeme modelini geliştirmişlerdir; 1) iki fazlı sıvı doygun (fluid saturated) poroelastik malzeme; ve 2) viskoelastik malzeme. Bu iki tür malzeme modeli içinden en gelişmiş iki

fazlı sıvı doymuş poroelastik malzemesidir (Domínguez *et al.* 1997). Sediment tabakası tamamen sıvı doymun bir ortam olarak kabul edildiğinde barajların dinamik tepkisi üzerinde çok az etkisi olduğu görülmüştür. Ancak, kısmen sıvı doymun bir ortam kabul edildiğinde barajların dinamik tepkisi üzerinde büyük bir etkisi olduğu görülmüştür (Domínguez *et al.* 1997; Maeso *et al.* 2004). Sediment tabakasını viskoelastik bir ortam olarak ele alan Lotfi *et al.* (1987) ve Medina *et al.* (1990) barajların sismik davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İnceleme çeşitli örnekle çözülmüştür. Viskoelastik malzemenin özellikleri, bilinen elastisite modülü E_{sed} , Poisson oranı ν_{sed} , malzeme yoğunluğu ρ_{sed} ve malzeme sönüm oranıyla ζ_{sed} tanımlanabilmektedir. Viskoelastik malzemenin özellikleri baraj alanlarında nadiren ölçülmüştür, ancak literatürde nehir deltası çökelleri ve deniz sualtı çökelleri için veriler mevcuttur (Hamilton 1971). Viskoelastik malzeme modeli sonlu elemanlar yönteminde sediment tabakasının modellenmesinde uygun görülmüştür. Bu şekilde modellenen sedimentlerin baraj tepkileri üzerinde çok az etkisi olduğu belirtilmiştir (Løkke 2019).

Birçok araştırmacı rezervuar tabanındaki hidrokinamik basınç dalgalarının kısmi emilimi için, sönümlemeyi temsil eden bir sınır koşulu modeli geliştirmişlerdir (Sharan 1992; Chandrashaker and Humar 1993; Tan and Chopra 1995b; Hatami 1997). Bunun için, rezervuar tabanı boyunca dalga emilimi, tek boyutlu dalga yansıtma katsayısıyla gerçekleştirilmiştir. Dalga yansıtma katsayısı, rezervuar dibinde yansıyan hidrokinamik basınçların genliğiyle, rezervuar dibine gelen dikey dalgalarının genliği oranıyla hesaplanmaktadır (Sharan 1992). Sediment tabakasının beton ağırlık barajların dinamik davranışına etkisi bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Bougacha and Tassoulas 1991c; Bougacha and Tassoulas 1991a; Bougacha and Tassoulas 1991b). Sediment tabakası, iki fazlı (yani sıvı doymun ve gözenekli elastik katı) bir ortam olarak modellenmiştir. Analizde, baraj, su, sediment ve temel arasındaki tüm etkileşim etkileri hesaba dahil edilmiştir. Bu incelemenin sonucunda, tamamen suya doymun sediment tabakasının dinamik tepkilere etkisi çok düşük olurken, kısmen suya doymun sediment tabakasının dinamik tepkilere etkisi önemli olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, sediment tabakasının dinamik tepkilere etkisi, ortamın doymunluk derecesine (degree of saturation) ve sediment tabakasının malzeme özelliğine bağlıdır. Sınır eleman yöntemiyle keyfi şekilleri olan viskoelastik ve suya doymun ortamlar arasındaki dinamik etkileşimi incelenmek üzere yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir (Domínguez *et al.* 1993). Bu yaklaşımda, rezervuar, temel ve sediment etkileşim etkileri dikkate alınarak beton ağırlık barajın sismik analizi yapılmıştır. Sediment tabakasının sıkıştırılabilirliğinin baraj tepkisi üzerinde önemli olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca,

tamamen su doygun sediment tabakasının baraj davranışına önemli derecede etkili olmadığı ve genel olarak sediment tabakasının etkisi barajın dinamik davranışının tahmini için önemli olduğunu belirtmiştir.

Malzeme sönümü

Beton baraj gövdesi ve zemin bölgesindeki malzeme sönümünün modellenmesi, lineer davranış aralığında bile oldukça belirsiz bir kavramdır. Bu mekanizmanın fenomenolojik (olgusal) modellenmesi, betonun ve zeminin dinamik yükler altındaki enerji yutma davranışıyla ilgili deneysel verilerin yeterli olmadığından pratik değildir (Bhattacharjee and Leger 1993). Bu eksikliklere rağmen, matematiksel kolaylıklarından dolayı Rayleigh sönümü veya modal sönümü (viskoz) ve histeretik sönüm gibi idealize edilmiş sönüm modelleri geliştirilmiştir. Barajların dinamik analizinde sönüm parametresinin nasıl düşünüldüğüne bağlı olarak, sabit bir değer (histeretik) veya değişken değerler (Rayleigh sönümü) şeklinde tasarlanabilir. Malzeme sönümünün frekansa bağlı olmadığı düşünülüyorsa, viskoz sönümü yerine histeretik sönüm kavramı geçerlidir. Ayrıca, frekanslardan bağımsız histeretik sönümü, hareket denklem takımına karmaşık rijitlik matrisi şeklinde dahil edilir. Bu nedenle, sistemin reel rijitlik matrisi, karmaşık rijitlik matrisi ile değiştirilir (Gutierrez and Chopra 1976; Gutierrez and Chopra 1978),

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K}(1 + i \eta), \quad \eta = 2 \zeta \quad (1)$$

Bu denklemde, η histeretik sönümü ve ζ ise viskoz sönüm parametresidir. Diğer alternatif sönüm modeli, frekansa bağlı olarak değiştiği kabulü yapılarak, kütle ve rijitlik matrislerinin kombinasyonu ile oluşan viskoz Rayleigh sönümüdür (Clough and Penzien 1975). Yani,

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{K} + \beta \mathbf{M} \quad (2)$$

Bu bağıntıda α ve β Rayleigh sönümündeki bilinmeyen parametreleri olup her bir mod için,

$$\zeta_n = \frac{\alpha}{2 \omega_n} + \frac{\beta \omega_n}{2} \quad (3)$$

şeklinde frekansa bağlı modal sönüm oranları hesaplanabilir. Bu bağıntıda, ζ_n sabit bir değer olduğunda, α ve β katsayıları seçilen n 'inci ve m 'inci farklı modal (ω_n ve ω_m) frekanslarla,

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2 \zeta}{\omega_n + \omega_m} \begin{Bmatrix} \omega_n \omega_m \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

şeklinde hesaplanabilmektedir. Barajların lineer olmayan dinamik analizlerinde Rayleigh sönümünün yukarıda geliştirdiği şekliyle kullanılması, kütle matrisinden dolayı sahte sönümleme kuvvetleri (spurious damping forces) meydana gelebilir (El-Aidi and Hall 1989b;

El-Aidi and Hall 1989a). Dolayısıyla, lineer ötesi analizlerde Rayleigh sönümünün modifiye edilmesi gerekmektedir. Yani, rijitlik orantılı sönüm matrisinin kullanılması gerekmektedir.

Betonun Yaşlanması

Beton ağırlık barajları, büyük bir miktarda suyu rezervuar bölgesinde tuttukları için genellikle su bölgesiyle temas halindedirler. Beton gözenekli bir malzemedir, bu nedenle, su ile etkileşime giren çok geniş bir iç ortamı bulunmaktadır (Steffens *et al.* 2003; Gogoi 2006). Beton ile su arasındaki etkileşimden kılcal yüzeylerde, kılcal kuvvetler gelişerek kılcal yüzey gerilmelere sebep olmaktadır. Bu tip gerilmelerin doğuşu, malzemenin su doygunluk oranına göre değişmektedir. Betonda su doygun gözeneklerinin zamanla artışı, malzeme mukavemetini giderek düşürmektedir. Ayrıca malzemenin homojen olmaması ve homojen olmayan nem nedeniyle yapısal deformasyonlar meydana gelmektedir. Mikro düzeydeki deformasyonlar, mikro çatlaklara neden olup böylece büyük gerilimlere yol açabilir. Ayrıca, barajlar kullanım ömrü boyunca, ağır çevre koşullarına, depremlerin neden olduğu çeşitli yükleme türlerine, patlamalara bağlı darbelere, malzeme bozulmasını etkileyebilecek donma ve çözölmeye maruz kalan yapılardır. Dolayısıyla beton malzemesi zaman içerisinde mukavemetini bu sebeplerden dolayı kaybedip yaşlanma olarak adlandırılan bir sürece girmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, betonun zamanla bozulması veya beton ağırlık barajların yaşlanması bir araştırma parametresi olarak seçildiğinden literatürde sunulan betonun bozulma modellerinden özet olarak bahsedilmiştir.

Baraj yapıları genellikle 100 yıllık uzun bir tasarım ömrü için inşa edilirler. Bu süre zarfında, çevresel yükler ve baraj yapısının rezervuar suyu ile doğrudan teması nedeniyle beton özellikleri giderek bozulur. Sonuç olarak, hidro-kemo-mekanik eylemler nedeniyle betonun mukavemetinde ciddi bozulmalar meydana gelir. Mikro çatlakları oluşturan kalsiyum liçi (Le Bellégo *et al.* 2000) ve alkali-agrega reaksiyonu (AAR) (Grimal *et al.* 2010), belki de ömür boyunca beton malzemenin özelliklerini bozan ana kimyasal eylemlerdir. Öte yandan, beton malzemesi 28 gün boyunca ilk mukavemetini daha hızlı kazanır, ancak bu durum ömür boyunca yavaş gelişir ve böylece devam eder (Withey 1961; Washa *et al.* 1989; Dolen 2007). Bu nedenle, betonun yaşa bağlı dayanım artışı ve yaşa bağlı dayanım azalması veya bozulması, barajların sismik analizinde dikkate alınması gereken kaçınılmaz faktörlerdir. Withey (1961), Washa *et al.* (1989) ve Dolen (2007)'nin öncü çalışmaları, birçok araştırmacı tarafından kullanılarak betonun yaşa göre dayanım kazanımını tanımlayan ampirik denklemler geliştirmişlerdir (Gogoi and Maity 2007; Azizan *et al.* 2017; Gorai and Maity 2021). Geliştirilen ampirik denklemlerde betonun yaşlanma etkisini dikkate alınmamışlardır. Washa *et al.* (1989) ve Dolen (2007)'nin öncü çalışmaları, betonun bozulmuş ve bozulmamış elastik

modülü arasında bir ilişki geliştirmek için Gogoi and Maity (2007) tarafından kullanılmıştır. Daha sonra, beton ağırlık baraj-rezervuar ve beton ağırlık baraj-rezervuar-temel etkileşim problemlerinin sismik analizinde yaşa bağlı bir bozulma indeksi geliştirdiler. Beton barajların yaşlanma etkisinin, barajların uzun ömürleri boyunca güvenlik değerlendirmesinde önemli bir konu olduğunu vurgulanmışlardır. Gorai and Maity (2021), betonun kimyasal-mekanik bozulmasını göz önünde bulundurarak, beton ağırlık barajı-rezervuar-sediment etkileşim problemindeki barajın sismik performansı incelemesini yapmışlardır. Betonun elastisite modülünün yaşlar ilerledikçe azaldığı, baraj gövdesinin daha esnek olduğu ve deplasmanlarının da arttığı görülmüştür.

Literatür Üzerinde Tartışma

Barajların dinamik yükler altındaki davranışının incelenmesi, yapı-zemin, yapı-sıvı ve yapı-zemin-sıvı etkileşimi dikkate alınarak onlarca çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, yukarıdaki bölümde detaylarıyla verilmiştir. Çalışmalar, genellikle sonlu eleman, sınır eleman, sonlu-sınır eleman yöntemleri yardımıyla çeşitli parametreler üzerinde yapılmıştır. Bazıları farklı çözüm yöntemi geliştirerek, bazıları yeni bir model sunarak, bazıları varsayımlar üzerinde iyileştirmeler yapılarak ve bazılarıda önemli parametreleri dikkate alınarak barajların dinamik davranışını incelemiştir. Yukarıda yapılan geniş literatür incelemesi sonucunda aşağıdaki maddeler özetlenebilir:

- Sonlu elemanlar yöntemi, barajların dinamik analizinde basit olması, herhangi bir gelişigüzel geometriyi, baraj gövdesi ve zemin ortamındaki heterojenliği temsil etmesi gibi belirgin bir avantaja sahiptir. Bu nedenle, güçlü bir yöntem olarak bilinmektedir.
- Sonlu eleman yöntemi, birçok problemin dinamik analizi için yaygın olarak kullanılırsa da, sınır eleman yöntemi, uzak ortamların sınırlarını, homojen olmayan zemin ortamını iyi modelleyebidiğinden dolayı geniş çapta benimsenmiştir. Uzak ortamların sınırları ve toprak ortamının sonlu eleman veya sınır eleman tekniğini kullanarak modellenmesi başlı başına karmaşık bir problemidir.
- Sonlu eleman ve sınır eleman yöntemlerinin birleşmesiyle geliştirilen modeller, problemi daha iyi tanımlamak için ve çözüm sonuçları daha gerçeğe yaklaştırmak için avantajlıdır.
- Geliştirilen modeller, zaman tanım alanında, frekans tanım alanında veya kompleks frekans tanım alanında sonuç vermektedir.
- Zaman tanım alanında geliştirilen yöntemler için, uzak zemin ortamlarında radyasyon sönümü veya dalgaların geçirgenliğini sağlayan çeşitli modeller, örneğin viskoz sınır

ve sönümlü yapay sınırı gibi sınır tanımı geliştirilmiştir. Diğer taraftan, frekans tanım alanında geliştiren yöntemler için ise sonsuz elemanlar gibi modeller geliştirilmiştir.

- Barajların sonlu eleman yöntemiyle incelenmesinde, yok denecek kadar çok az sayıda, yakın ortamların boyutunun dinamik tepkiler üzerine olan etkisi incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda, elde edilen sonuçların çok tutarlı olmadığı görülmüştür. Daha geniş bölgeleri dikkate almakla farklı sınır koşulları dikkate alınarak tutarlı sonuç ortaya konulabilir.
- Betonun yaşlanma süreci, beton yapının rijitlik kaybına yol açar. Betonun yaşlanması, hidro-kemo-mekanik etkiler gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. Çeşitli zararlı kimyasal içerikli suların betonun gözenekli yapısına sızması, yapının rijitliğinin azalmasına neden olur.
- Betonun zaman içinde farklı nedenlerden dolayı bozulması ve barajların dinamik tepkileri üzerindeki etki literatürde çok az sayıda çalışmalarla incelenmiştir. Bu konuda, daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu düşünülmüştür.
- Mevcut olan barajların güçlendirmesi için, baraj gövdesinde aşırı gerilme tepkilerinden oluşan hasarların tahmin edilmesi, beton malzemesinin yaşla birlikte bozulma etkilerini dikkate alan yaşlanan baraj-rezervuar, ve baraj-rezervuar-zemin etkileşim sisteminin birleşik analizi gereklidir.
- Ayrıca, yeni inşa edilecek veya inşa edilmiş barajların çeşitli deprem yüklerine karşı davranışı ve performansının incelenmesi için yukarıda bahsedilen durumları dikkate alınarak davranışı üzerinde değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir.

Yukarıda özetlenen literatürün incelenmesi sonucunda bulunan boşluklar, bu tezin araştırma konusu ve kapsamını oluşturmuştur. Ayrıca, bu tez çalışmasında, literatürden destek alınarak yeni ve etkin bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, ağırlık baraj geometri değişkenliğine açık olablilen, sediment tabakasını dikkate alabilen, betonun yaşlanma etkisini içeren, sistemin sönümü histeretik veya Rayleigh olarak seçilebilen ve barajın çeşitli deprem yüklerine karşı performansını ölçebilen bir model olduğu ifade edilebilmektedir.

MATERYAL ve METOT

Bu tez çalışmasında, ağırlık baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin deprem yükleri altındaki iki boyutlu lineer elastik tepkileri üzerinde bir inceleme planlanmıştır. Bu problemin modellenmesinde sonlu eleman yöntemi bir çok sayısal yöntemlerden daha uygun, elverişli ve güçlü bir araç olduğundan dolayı seçilmiştir. Ağırlık barajların vadi boyunca uzunluğu, barajın yükseklik ve taban genişliğinin 2,5 katından, genellikle daha büyük olduğundan dolayı düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınması önerilmiştir (Rea *et al.* 1974). İncelenen problem, düzlem şekil değiştirme problemi olarak ele alınarak baraj, rezervuar ve zemin ortamları için matematiksel temel bağıntıları çıkarılmıştır. Daha sonra, çıkarılan temel bağıntıları kullanılarak ilgili ortamın sonlu eleman bağıntıları elde edilmiştir. Ortamların sonlu eleman yöntemiyle modellenmesinde, sadece rezervuar ortamının Lagrange yaklaşımındaki temel bağıntıları ve sonlu eleman formülasyonu çıkarılmıştır. Rezervuar ortamının sonlu eleman hareket denklemi enerji prensibi yardımıyla elde edilmiştir. Zemin ve gövdenin sonlu eleman hareket denklemleri ise aynı prensib yardımıyla de elde edilebilmektedir. Bu sistemin sonlu eleman formülasyonunda toplam üç tane hareket denklemi üç farklı ortam için elde edilmiştir. Bu üç farklı ortamlarının arasındaki sınır koşulları dikkate alınarak, baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin birleşik hareket denklemi elde edilmiştir. Sistemin birleşik hareket denklemi, direkt yöntem ve modal analiz yöntemiyle çözülebildiği ifade edilerek ilgili matematiksel bağıntıları verilmiştir.

Zemin ve su ortamlarındaki sonsuza uzanan uzak bölgelerinin sonsuz elemanlar modellenmesinde kullanılan matematiksel bağıntılar, ayrı alt başlıkta verilmiştir. Yansıyan dalgaların sonsuz ortamlarda yayılımı, hızı ve tipleri hakkında bilgiler ilgili başlıkta verilmiştir. Ortamların sonlu elemanlarla modellenmesinde kullanılan matematiksel bağıntılarının daha açık ve anlaşılır olabilmesi için ve ayrıca, sıvı ve katı elemanın rijitlik ve kütle matrislerinin hesaplanması için ayrı bir alt başlık açarak gereken açıklamalarla açık bağıntıları verilmiştir. Birleşik problemi, yukarıda bahsedilen yöntemlerle çözümünü gerçekleştirildikten sonra, sisteme ait dinamik tepkilerinin (gerilmeler, hidrodinamik basınçlar vs.) hesaplanmasındaki matematiksel bağıntıları ayrı bir alt başlığa verilmesi uygun görülmüştür. Birleşik probleminin dinamik tepkilerini önemli ölçüde etkileyen betonun zamanla yaşlanması, alternatif bir parametre olarak ele alınmıştır. Betonun yaşlanma modeli Gogoi and Maity (2007), Azizan *et al.* (2017) ve Gorai and Maity (2021)'den alınarak parametrik incelemeler

alt bölümlerde yapılmıştır. Ayrıca, beton ağırlık barajlarının lineer dinamik tepkilerini ele alınarak sismik performans analizi için yapılan incelemelerde kullanılan model ise Ghanaat (2002) ve Ghanaat (2004b)'ye göre yapılmıştır. Bu bölümün sonunda, FORTRAN 90 programlama dilinde yazılan modelin doğrulanması için literatürden 8 farklı örnek seçilerek karşılaştırmalı sonuçları tablolar ve şekiller halinde sunulmuştur.

Sıvı Ortamının Lagrange Yaklaşımıyla Modellenmesi

Bu yaklaşımda, sıvı ortamının sonlu eleman düğüm bilinmeyenleri, katı ortamlar gibi yerdeğiştirmeler cinsindendir. Bu iki ortamın birbirleriyle etkileşimini sağlamak için her hangi özel ara yüzey denklemlerinin ek olarak oluşturulmasına gerek yoktur. İki ortam arasındaki müşterek düğüm noktalarında uygunluk şartı ve denge denklemleri otomatik olarak sağlanmaktadır. Sıvı sisteminin kütle ve rijitlik matrisleri, nispeten küçük bant genişliğe sahiptir. Dolayısıyla, sisteme ait denklem takımının çözümü de kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

Lagrange yaklaşımıyla modellenen sıvı, standart katı eleman rijitlik matrisinin uygun bir şekilde değiştirilmesi fikriyle ortaya çıkmıştır. Standart katı elemanın rijitlik matrisi hacimsel elastisite modülü ve kayma modülü cinsinde türetildiği aşıkardır. Dolayısıyla, sıvı ortamını viskoz olmayan, rotasyonel olmayan (dönmeyen), yerdeğiştirmeleri küçük ve sözde elastik (pseudo-elastic) bir ortam olarak kabul edip kayma modülü sıfır verilerek modellenmeye çalışılmıştır (Akkas *et al.* 1979). Bu şekilde modellenen elemanın modal analizini (frekanslar ve modların değerlendirilmesi) yapıldıklarında bir çok sayıda sıfır-enerji modu (hour-glass modes), sıvının kayma modülünü sıfır verildiğinden (tekil rijitlik matrisi oluşmasından) ortaya çıkmıştır. Bu sıfır enerji modu ortadan kaldırmak için bir takım alternatif çözümler zaman zaman geliştirilmiştir. Söz konusu kayma modülünün çok küçük değer alınmasıyla, veya sıvı elemanın yerdeğiştirmelerine dönme kısıtlaması getirmek suretiyle sıfır-enerji modlarının ortadan kaldırma yolları olarak belirlenmiştir (Calayır 1994). Bir diğer alternatif yol ise, sıvı elemanın rijitlik matrisini indirgenmiş sayısal integrasyon mertebeleriyle hesaplanarak sıvının serbest yüzeyindeki yüzey salınım hareketini (sıvının çalkalanması) de hesaba katılmasıdır (Hamdi *et al.* 1978; Wilson and Khalvati 1983). Sıvı serbest yüzeyinde olan düğümlerinin düşey doğrultularına ek rijitlikler gelinmesiyle tekillik şartı ortadan kalkmaktadır. Bunun için araştırmacılar tarafından çeşitli sıvı eleman modelleri geliştirilmiştir. Bunların içinden, Wilson and Khalvati (1983) tarafından geliştirilen dokuz düğümlü sıvı sonlu elemanın iyi sonuçlar verdiği ve bir çok yapı-sıvı etkileşim probleminde uygulanarak başarılı olduğu görülmüştür (Bayraktar 1991; Bayraktar *et al.* 1996; Bayraktar

and Dumanoglu 1998; Köseoğlu 2007; Bayram 2008; Akköse and Şimşek 2010). Yapılan bu araştırmalarda, sıvı elemanın stabilitesi teorik çalışmalarla denenmiştir.

Zemin-yapı-sıvı etkileşim probleminin sonlu elemanlar ve benzeri yöntemlerle dinamik analizini gerçekleştirebilmek için lineer denklem takımının çözülmesi gerekmektedir. Ayrıca, lineer denklem takımının tek bir çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Tek çözüme ulaşılabilmesi için, sistemin rijitlik matrisi tekil bir matris olmaması gerekmektedir. Tekil rijitlik matrisi genellikle iki nedenle ortaya çıkmaktadır. Birincisi, düşük integrasyon mertebeleriyle hesaplanan rijitlik matrisi ve diğeri ise, sistemde toplam düğüm bilinmeyen sayısı, entegrasyon noktalarındaki bağımsız bilinmeyenlerin sayısından büyük olmak suretiyle de tekil rijitlik matrisi ortaya çıkmaktadır (Zienkiewicz *et al.* 2000; Zienkiewicz *et al.* 2005). Stabil olmayan bir sistemin rijitlik matrisi her zaman tekil olup, sıfır-enerji modları içermektedir. Sıfır-enerji mod kavramı, rijit cisim hareketi olmayan, ama sıfır deplasman enerjisi içeren bir düğümün deplasman vektörüdür (Calayır 1994; Cook 2007). Dolayısıyla rijitlik matrisinin tekillik şartı için, sistemde mevcut olan bilinmeyenlerin sayısı, sistemin bütün Gauss noktalarında mevcut olan bağımsız yerdeğiştirmelerin sayısına eşit veya daha küçük olmak zorundadır. Bu kavram doğrulama kısmında uygulamalı olarak rijit sıvı tankının modal analizinde de anlatılmıştır.

Sıvı ortamının temel bağıntıları

Sıvı ortamını Lagrange yaklaşımıyla modellemek için, sıvı elemanının düğüm noktaları küçük yerdeğiştirmeler yaptığı, rotasyonel olmadığı, viskoz olmayan ve lineer-elastik davranış sergilediği kabulleri yapılmıştır. Bunun için sıvının temel bağıntıları Wilson and Khalvati (1983) ve Calayır (1994)'teki formülasyonlarına göre burada verilmiştir. Bu özelliklere sahip sıvının basınçla hacimsel şekildeğiştirme arasındaki ilişki,

$$P = \beta \epsilon_v \quad (5)$$

ifadesiyle belirlenmiştir. Bu ifadede P , β ve ϵ_v sırasıyla sıvının basıncı, hacimsel elastisite modülü ve hacimsel şekildeğiştirmesidir. Burada ilk olarak üç boyutlu bir sıvı elemanın hacimsel şekildeğiştirmesi, rotasyon bağıntıları ve rotasyonla ilgili gerileme bağıntıları verilerek daha sonra formülasyonlar iki boyuta indirgenmektedir. Üç boyutlu bir sıvı elemana ait hacimsel şekildeğiştirmesi,

$$\epsilon_v = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

ifadesiyle gösterilmiştir. Bu ifadede $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial y}$ ve $\frac{\partial w}{\partial z}$ sırasıyla sıvının x , y ve z doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenlerini göstermektedir. Sıvı elemanlarının rotasyonel olmadığı,

cezalandırma metotları vasıtasıyla Clough and Penzien (1975) ve Zienkiewicz *et al.* (2005) veya büyük değerli kısıtlama parametresi Wilson and Khalvati (1983) ve Calayır (1994) ile gerçekleştirilmektedir. Yani, sıvı elemanın rotasyonunu kısıtlamak için gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarına kısıtlama parametresi (ek rijitlikler) yerleştirilir. Üç boyutlu bir sıvı elemanın üç tane rotasyonel bağıntısı vardır. Bu bağıntılar,

$$\begin{aligned} W_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ W_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ W_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

şeklindedir. Elemanın dönmesiyle meydana gelen gerilmeler ise,

$$\begin{aligned} P_x &= \alpha_x W_x \\ P_y &= \alpha_y W_y \\ P_z &= \alpha_z W_z \end{aligned} \quad (8)$$

ifadelerle hesaplanmaktadır. Bu bağıntılarda görülen P_i, α_i ve W_i ($i = x, y, z$) sırasıyla elemanın ilgili gerilme, kısıtlama parametresi ve dönmesini göstermektedir. Dolaysı ile, üç boyutlu sıvı elemanın gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı, Denklem 5 ve 8'den yararlanılarak,

$$\begin{Bmatrix} P \\ P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_v \\ W_x \\ W_y \\ W_z \end{Bmatrix} \quad \text{veya} \quad \underline{\sigma} = \underline{C} \underline{e} \quad (9)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu bağıntıda $\underline{\sigma}$, $\underline{e}$ ve $\underline{C}$ sırası ile elemanın gerilme vektörü, şekil değiştirme vektörü ve elastisite matrisini (malzeme matrisi) göstermektedir. Bu bağıntıyı iki boyutlu durumuna indirgenmesinde, malzeme matrisi 2x2 bir kare matrise dönüşmektedir. Çünkü, iki boyutlu bir elemanın bir tane dönme bağıntısı vardır. Dolaysı ile, iki boyutlu bir sıvı elemanın gerilme-şekil değiştirme bağıntısı,

$$\begin{Bmatrix} P \\ P_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & 0 \\ 0 & \alpha_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_v \\ W_z \end{Bmatrix} \quad \text{veya} \quad \underline{\sigma} = \underline{C} \underline{e} \quad (10)$$

şeklinde yazılmaktadır. Sıvı sisteminin hareket denklemi enerji prensibinden faydalanılarak belirlenmiştir. Bir sıvı sistemin potansiyel enerjisi iki türden ibarettir. Birisi sistemin toplam şekildeğiştirme enerjisi olup,

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \int e^T C_f e \, dv \quad (11)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Diğeri ise, hacimde değişim olmadan yerdeğiştirme enerjisidir (Greeves 1991). Sıvı sistemlerinin önemli davranışlarından biri de düşey doğrultuda

yerdeğiştirme davranışı olup genellikle su depolarının ve rezvuarlarının yüzey kısmında küçük frekanslarla meydana gelmektedir. Bu tip hareketlerin potansiyel enerjisi uç boyutlu bir sistemde,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \int U_{sf}^T \rho g U_{sf} dA \quad (12)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda, ρ, g ve U_{sf} sırasıyla, sıvının kütle yoğunluğu, yerçekimi ivmesi ve sıvı serbest yüzeyindeki düşey yerdeğiştirmeleridir. Denklem 11 ve (12)'yi toplanarak sıvı sisteminin toplam potansiyel enerjisi $\pi_t = \pi_e + \pi_s$ elde edilebilmektedir. Sıvı sisteminin dinamik davranışı incelendiğinden dolayı, sıvı sisteminin kinetik enerjisi,

$$T = \frac{1}{2} \int \rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 \right] dA \quad (13)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bu ifadede, $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)$, sıvı elemanın x ve y doğrultusundaki hız bileşenini göstermektedir.

Sıvı ortamının sonlu eleman bağıntıları

Bu tez çalışmasında, sıvı sisteminin sonlu eleman matrisleri izoparametrik sonlu eleman formülasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Aynı durum, katı elemanlar için de geçerlidir. İzoparametrik formülasyonunda genel eksen takımıyla doğal eksen takımı beraber kullanılmaktadır. Ayrıca, elemanın global koordinatlarındaki düğüm yerdeğiştirmeler ve koordinat belirlenmesinde aynı şekil fonksiyonları kullanıldığından izoparametrik sonlu elemanlar denilmektedir. Bu eksen takımların iki boyutlu durumunda, karteziyen (x, y) ve boyutsuz (ξ, η) eksen takımından oluşmaktadır. Sonlu elemanın koordinatları genellikle genel eksen takımında tanımlanmakta olup,

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^n N_i v_i \quad (14)$$

bağıntısıyla doğal koordinatları cinsinden hesaplanmaktadır. Bu denklemde u ve v sırasıyla sonlu elemanın herhangi bir noktasına ait yatay ve düşey yerdeğiştirmeleridir. N_i, u_i ve v_i ise, sırasıyla n düğümlü sonlu elemanın i 'inci düğümüne ait enterpolasyon şekil fonksiyonu, i 'inci düğümünün x koordinati ve y koordinati doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenleridir. Eğer Denklem 14, Denklem 6 ve 7'nin iki boyutlu durumu için gereken yerlerine konulursa,

$$\epsilon_v = \frac{\partial N^T}{\partial x} u + \frac{\partial N^T}{\partial y} v \quad (15)$$

$$W_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial N^T}{\partial y} u - \frac{\partial N^T}{\partial x} v \right)$$

ifadesi elde edilmektedir. Bu ifadelerde N , sıvı sonlu elemanın şekil fonksiyonları vektörü ve u, v ise, elemanın yatay ve düşey dorultusundaki düğüm deplasmanlarıdır. Bu ifadenin bir eleman için matrisel hali,

$$\underline{e}^e = \mathbf{B}^e \underline{U}^e \quad (16)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu ifadede, $\mathbf{B}^e$ tek elemana ait şekildeğiştirme matrisini ifade etmektedir. Bu aşamada, Denklem 16'yı, Denklem 11'in yerine konarak,

$$\pi_e = \frac{1}{2} \underline{U}^T \mathbf{K} \underline{U} \quad (17)$$

ifadesi elde edilmektedir. Bu ifadede $\underline{U}$, sıvı sisteminin düğüm yerdeğiştirme vektörünü, ve $\mathbf{K} = \sum \mathbf{K}^e$ ise sıvı sisteminin rijitlik matrisini göstermektedir. Tek bir elemanın rijitlik matrisi,

$$\mathbf{K}^e = \int_A \mathbf{B}^{eT} \mathbf{C} \mathbf{B}^e dA \quad (18)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Aynı şekilde, sıvı sisteminin yüzey salınımından dolayı meydana gelen potansiyel enerjisi, Denklem 12'ye göre,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \underline{U}_{sf}^T \mathbf{S}_f \underline{U}_{sf} \quad (19)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu ifadede $\underline{U}_{sf}$, sıvı sisteminin yüzey serbest düğümlerinin düşey doğrultusundaki yerdeğiştirme vektörünü gösterirken, $\mathbf{S}_f = \sum \mathbf{S}_f^e$ ise, sıvı sisteminin serbest yüzeyindeki tek boyutlu sıvı sonlu elemanın rijitlik matrisini göstermekte ve tek bir eleman için,

$$\mathbf{S}_f^e = \int_L \mathbf{N}_s^T \rho g \mathbf{N}_s dL \quad (20)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Sıvı sisteminin yüzey elemanı, üç boyutlu problemlerde iki boyutlu bir eleman olması gerekirken, iki boyutlu problemlerde ise tek boyutlu eleman olması gerekmektedir. Bu denklemde $\mathbf{N}_s$ tek boyutlu sıvı sonlu elemanın şekil fonksiyonu matrisidir. Aynı şekilde Denklem 13'te verilen sistemin kinetik enerjisinden,

$$T = \frac{1}{2} \underline{\dot{U}}^T \mathbf{M} \underline{\dot{U}} \quad (21)$$

ifadesiyle elde edilmektedir. Bu ifadede $\underline{\dot{U}}$, sıvı elemanın düğümsel hız vektörüdür. $\mathbf{M} = \sum \mathbf{M}^e$ ise, sıvı sisteminin yayılı kütle matrisi olup tek bir elemanın kütle matrisi,

$$\mathbf{M}^e = \int_A \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} dA \quad (22)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bu ifadede $\mathbf{N}$, sıvı sonlu elemanın şekil fonsiyonları matrisidir. Yukarıda verilen Denklem 17, 19, 21 enerji bağıntıları Lagrange Denklemi 23'ün gereken yerlerine koyulursa,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \pi_t}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (23)$$

şeklinde sıvı sisteminin hareket denklemi elde edilebilmektedir. Lagrange denkleminde görülen q_i ve Q_i sırasıyla sonlu elemanın i düğümüne ait genelleştirilmiş koordinatı ve yükünü göstermektedir. Sıvı sisteminin sönümsüz sonlu eleman hareket denklemi,

$$\mathbf{M}_s \ddot{\underline{U}}_s + \mathbf{K}_s \underline{U}_s + \mathbf{S}_s \underline{U}_{sf} = \underline{P}_s$$

veya

$$\mathbf{M}_s \ddot{\underline{U}}_s + \hat{\mathbf{K}}_s \underline{U}_s = \underline{P}_s \quad \text{burada,} \quad \hat{\mathbf{K}}_s = \mathbf{K}_s + \mathbf{S}_s$$

şeklinde elde edilmektedir. Denklem 24'te görülen $\mathbf{M}_s$ ve $\hat{\mathbf{K}}_s$ sırasıyla sıvı sisteminin kütle ve serbest yüzey rijitliğini de içeren rijitlik matrisidir. Ayrıca, $\ddot{\underline{U}}_s$, $\underline{U}_s$ ve $\underline{P}_s$ ise sırasıyla sıvı sisteminin ivme, deplasman ve zamanla değişen dinamik yük vektörüdür.

Aynı prosedürü takip edilerek baraj gövdesi ve zemin ortamının sönümsüz sonlu eleman hareket denklemi sırasıyla,

$$\mathbf{M}_b \ddot{\underline{U}}_b + \mathbf{K}_b \underline{U}_b = \underline{P}_b \quad (25)$$

$$\mathbf{M}_z \ddot{\underline{U}}_z + \mathbf{K}_z \underline{U}_z = \underline{P}_z \quad (26)$$

şeklinde elde edilebilmektedir. Denklem 24-26'da görülen s, b ve z alt indeksler sırasıyla sıvı, baraj gövdesi ve zemin ortamına ait hareket denklemleri ifade etmektedir.

Ortak Sistemin Hareket Denklemi ve Çözümü

Lagrange yaklaşımıyla modellenen sıvı ortamının, baraj gövdesi ve zemin bölgesiyle dinamik etkileşimini sağlatabilmek için, sıvı-yapı ve sıvı-zemin arasındaki ara yüzey sınır şartlarının dikkate alınması gerekmektedir. Lagrange yaklaşımıyla modellenen sıvı ortamının viskoz olmayan bir ortam olarak kabul edildiğinden, etkileşim ara yüzeyindeki normal yerdeğiştirmeler sürekli ve teğet yerdeğiştirmeler ise süreksiz olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla, etkileşim arayüzeyinde, katı kısmının pozitif yüzey ve sıvı kısmının negatif yüzey olarak kabul edip,

$$\underline{U}_n^- = \underline{U}_n^+ \quad (27)$$

şartı belirlenmiştir (Akkas *et al.* 1979). Bu bağıntıdaki katı-sıvı arayüzey şartının sağlanabilmesinde ara yüzeye normal doğrultuda karşılıklı düğümler arasına yeteri derecede rijit kafes elemanlar yerleştirilmesi (Akkas *et al.* 1979) veya arayüzeyindeki düğüm

noktalarına uygun bir şekilde cezalandırma metodunun (Bathe 2006) uygulanması gerekmektedir. Bu şartın sağlatılmasında, kafes elemanların kullanılması cezalandırma metodundan daha elverişli olduğu vurgulanmıştır (Calayır 1994).

Sıvı, baraj gövdesi ve zemin ortamlarının sönümsüz sonlu eleman hareket denklemleri sırasıyla Denklem 24, 25 ve 26’da türetilmiştir. Denklem 27’de önerilen sınır şartı dikkate alınarak, yatay ve düşey yer hareketi etkisi altında zemin-yapı-sıvı etkileşim probleminin sönümsüz birleşik hareket denklemi,

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \mathbf{U} = -\mathbf{M} \mathbf{1}^x a_g^x(t) - \mathbf{M} \mathbf{1}^y a_g^y(t) \quad (28)$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu denklemde, $\mathbf{M}$ ve $\mathbf{K}$ sırasıyla ortak sisteme ait (zemin-yapı-sıvı) kütle ve rijitlik matrisidir. $\ddot{\mathbf{U}}$ ve $\mathbf{U}$ sırasıyla sistemin rölatif ivme ve yerdeğiştirme vektörü olup,

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^T &= \langle u_1^x \quad u_1^y \quad u_2^x \quad u_2^y \quad \dots \quad u_n^x \quad u_n^y \rangle \\ \ddot{\mathbf{U}}^T &= \langle \ddot{u}_1^x \quad \ddot{u}_1^y \quad \ddot{u}_2^x \quad \ddot{u}_2^y \quad \dots \quad \ddot{u}_n^x \quad \ddot{u}_n^y \rangle \end{aligned} \quad (29)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, u_n^x n’inci düğümün x doğrultusundaki deplasmanı ve u_n^y ise n’inci düğümün y doğrultusundaki deplasmanı göstermektedir. Ayrıca, $\mathbf{1}^x$ ve $\mathbf{1}^y$ sırasıyla x doğrultusundaki birim vektörü ve y doğrultusundaki birim vektörü olup,

$$\begin{aligned} \mathbf{1}^x &= \langle 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad 0 \rangle \\ \mathbf{1}^y &= \langle 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad \dots \quad 0 \quad 1 \rangle \end{aligned} \quad (30)$$

şeklinde düzenlenmektedir. $a_g^x(t)$ ve $a_g^y(t)$ sırasıyla yatay ve düşey doğrultuda etki eden serbest-alan (free-field) yer ivmesidir. Denklem 28’de sönüm parametresini ($\mathbf{C}$) Rayleigh sönümü ($\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$) olarak göz önüne alındığında, zemin-yapı-sıvı etkileşim probleminin sönümlü hareket denklemi

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \mathbf{U} = -\mathbf{M} \mathbf{1}^x a_g^x(t) - \mathbf{M} \mathbf{1}^y a_g^y(t) \quad (31)$$

şeklinde elde edilmiş olur (Gutierrez and Chopra 1976). Denklem 31, zemin-yapı-sıvı sistemine ait ortak hareket denklemini temsil edip herhangi bir sistemin dinamik hareket denklemiyle aynı formattadır. Yapı analizinde kullanılan herhangi bir çözüm yöntemi, zemin-yapı-sıvı etkileşim probleminin çözümüne de uygulanması mümkündür. Katı-sıvı etkileşim problemlerinin dinamik analizindeki Lagrange yaklaşımının seçilmesi bu sebepten dolayı daha çok tercih edilmiştir.

Dinamik zemin-yapı-sıvı etkileşim probleminin davranışını anlatan Denklem 31, üç farklı yöntemle çözülmesi mümkündür; 1) zaman tanım alanında adım adım integrasyon metodu, 2) sistemin bir kaç temel modunu dikkate alınarak mod birleştirme metodu (modal

analiz), ve 3) hareket denklem takımını frekans tanım alanına/Laplace uzayına dönüştürülerek frekans tanım alanındaki/Laplace metodu. Laplace uzayında elde edilen kompleks tepkiler daha sonra ters Fourier dönüşümü vasıtası ile zaman tanım alanındaki tepkiler dönüştürülür. Bu üç alternatif çözüm teknikleri, günümüzdeki bilgisayarlara yazılması kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında sayısal Modal analiz metodundan ve sayısal Laplace uzayındaki çözüm yönteminden alt başlıklarda özet olarak bahsedilmiştir.

Modal analiz yöntemi

Modal analiz yönteminde, Denklem 28’de verilen sistemin sönümsüz hareket denkleminin serbest halini göz önüne bulundurularak zemin-yapı-sıvı etkileşim probleminin her bir modu için Φ_n doğal mod vektörü ve ω_n doğal frekansı,

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \Phi = 0 \quad (32)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanabilir. Sistemin yerdeğiştirme tepkileri modların süperpözesi kavramıyla,

$$\underline{U}(t) = \sum_{i=1}^n \Phi \underline{q}_n(t) \quad (33)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu bağıntıda n , sistemin mod sayısını gösterirken, $\underline{q}_n(t)$ ise genelleştirilmiş koordinatı göstermektedir. Sistemin sönüm parametresini Rayleigh sönümü ($\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$) olarak ele alınıp Denklem 33’ü Denklem 31’in gereken yerlerine konarak bazı matematiksel işlemlerin ardından, n adet tipik ayrıklaştırılmış modal denklemler,

$$\ddot{\underline{q}}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{\underline{q}}_n + \omega_n^2 \underline{q}_n = P_n(t)/M_n \quad (34)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu bağıntıda görülen $\ddot{\underline{q}}_n$, $\dot{\underline{q}}_n$ ve $\underline{q}_n$ sırasıyla n . modal denklemin genelleştirilmiş ivme, hız ve deplasman vektörüdür. ζ_n ve ω_n ise n ’inci modun sönüm oranı ve açısal frekansını temsil etmektedir. Ayrıca, bu denklemde görülen $P_n(t)$ ve M_n sırasıyla,

$$\begin{aligned} M_n &= \Phi_n^T \mathbf{M} \Phi_n \\ P_n(t) &= -\Phi_n^T \mathbf{M} \underline{1}^x a_g^x(t) - \Phi_n^T \mathbf{M} \underline{1}^y a_g^y(t) \end{aligned} \quad (35)$$

n ’inci moda ait kütle ve dış yüküdür. Denklem 34’te verilen ikinci dereceden diferansiyel denklemi, sayısal integrasyon tekniklerinden biri (örneğin, Wilson-Teta) metodunuyla her bir mod için hesaplanabilmektedir. Daha sonra, sistemin gerçek koordinatındaki tepkiler, Denklem 34’te hesaplanan $\underline{q}_n(t)$ ’yi Denklem 33 yerine konarak modların katkısıyla elde edilmektedir.

Direkt yöntem

Bu bölümde, Denklem 31’de verilen hareket denkleminin Laplace uzayına dönüşümü hakkında matematik işlemler özet olarak verilmiştir. Bunun için, zamana bağlı $U(t)$ fonksiyonunun Laplace uzayında dönüşümü,

$$L[U(t)] = \hat{U}(s) = \int_0^{\infty} U(t) e^{-st} dt \quad s = a + i\omega \quad (36)$$

ifadesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu ifadede s bir kompleks sayı olup Laplace uzayındaki değişken parametresini temsil etmektedir. Ayrıca birinci ve ikinci dereceden diferansiyel denklemlerin çözümü, Denklem 36’da yazılan ifadesi yardımı ile elde edilmesi mümkündür. Yani,

$$\begin{aligned} L[\dot{U}(t)] &= s\hat{U}(s) - U(0) \\ L[\ddot{U}(t)] &= s^2\hat{U}(s) - sU(0) - \dot{U}(0) \end{aligned} \quad (37)$$

şeklinde dönüştürülebilmektedir (Zill 2020). Denklem 36 ve 37’de yazılan ifadeleri Denklem 31’de gereken yerine konarak bazı düzenlemelerin ardından birleşik sistemin Laplace uzayındaki hareket denklemi,

$$(s^2\hat{\mathbf{M}} + s\hat{\mathbf{C}} + \hat{\mathbf{K}})\hat{\underline{\mathbf{U}}} = -\hat{\mathbf{M}}\underline{\mathbf{1}}^x \hat{a}_g^x(s) - \hat{\mathbf{M}}\underline{\mathbf{1}}^y \hat{a}_g^y(s) \quad (38)$$

şeklinde elde edilmektedir. Denklem 31’de sistemin sönümü, frekansa bağlı bir parametre olarak düşünülüyorsa, viskoz sönümü, veya frekasta bağımsız bir parametre olarak düşünülüyorsa, sabit histeretik sönüm modeli olarak modellenebilmektedir. Viskoz sönüm modeli, frekansların artışıyla lineer olarak artış gösterdiği, ve sabit histeretik sönüm medeli ise frekansların artışıyla sabit kaldığı anlaşılmaktadır. Bu iki çeşit sönüm modelleri, i. frekansta eşit sönüm yüküne sahip olurlar. Dolayısıyla, viskoz ve sabit histeretik sönüm parametreleri arasındaki ilişki $\eta = 2 \zeta$ şeklinde türetilmiştir (Gutierrez and Chopra 1976). Ayrıca, yukarıda yazılan hareket denkleminde sabit histeretik sönümü verildiğinde,

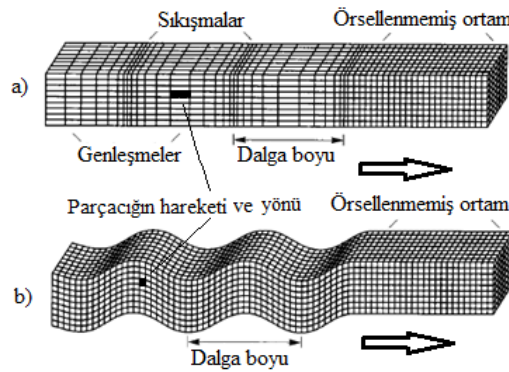
$$((1 + i\eta)\hat{\mathbf{K}} + s^2\hat{\mathbf{M}})\hat{\underline{\mathbf{U}}} = -\hat{\mathbf{M}}\underline{\mathbf{1}}^x \hat{a}_g^x(s) - \hat{\mathbf{M}}\underline{\mathbf{1}}^y \hat{a}_g^y(s) \quad (39)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu hareket denklemlerinde görülen $\hat{a}_g^x(s)$ ve $\hat{a}_g^y(s)$ sırası ile Laplace uzayına dönüştürülmüş yatay ve düşey yer ivmesidir. $\hat{\underline{\mathbf{U}}}$ ve η ise sistemin Laplace uzayına dönüştürülmüş deplasman vektörü ve histeretik sönüm parametresini göstermektedir. Histeretik sönüm parametresi viskoz sönümün iki katıdır ($\eta = 2 \zeta$) (Gutierrez and Chopra 1976). Denklem 39’da verilen hareket denkleminde bakıldığında, ikinci dereceden diferansiyel denklem takımı yerine, Laplace uzayına dönüştürülmüş kompleks katsayılı, lineer cebrik denklem takımıdır. Lineer cebrik denklem takımı Cholesky algoritması yardımıyla çözümlenerek

sistemin kompleks katsayılı deplasmanları elde edilir. Laplace uzayında elde edilen kompleks katsayılı büyüklükler daha sonra, (Durbin 1974)'te geliştirdiği sayısal ters Laplace yöntemi ile zaman tanım alanındaki reel tepkilere dönüştürülebilmektedir.

Uzak Bölgelerin Sonsuz Elemanlarla Modellenmesi

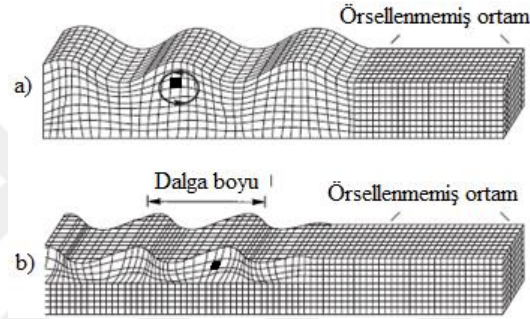
Uzak bölgelerin sonsuz elemanlarla modellenmesine geçmeden önce, zemin ortamında dalga yayılımı ve dalga tiplerinden ilk olarak bahsetmenin gerekli olduğu düşünülmüştür. Daha sonra, zemin ve su olmak üzere uzak bölgelerin sonsuz elemanlarla modellenmesi hakkında bilgi verilecektir. Zemin ortamı, sürekli ve yarı-sonsuz bir ortamdır. Bu ortamın sonlu elemanlarla modellenmesi için bazı basitleştirmeler yapmak gerekmektedir. Örneğin, homojen, izotrop, bir ortam gibi düşünülmesi modellemede kolaylık sağlamaktadır. Zemin ortamının statik durumu göz önünde bulundurularak ufak bir parçacığı (sonlu eleman) incelendiğinde, bu elemanın her halükarda dengede olması gerekmektedir. Aynı şekilde, atalet etkilerini dikkate alınarak dinamik durumunda da dengede kalması gerekmektedir. Bu elemanın statik veya dinamik denge durumlarını incelenmek, klasik dalga denklemine götürmektedir. Klasik dalga denklemi Navier–Stokes denklemi olarak bilinmektedir. Bu dalga denklemi, zemin gibi sürekli ortamlarda dalga tipleri ve ilgili dalganın hızı için analitik formüller vermektedir. Yarı-sonsuz zemin ortamında dalgalar genellikle cisim ve yüzey dalgaları olmak üzere iki çeşit dalga türünden ibarettir. Cisim dalgası kendi sınıfında basınç ve kayma dalga türlerine ayrılır (Şekil 2). Ayrıca, yüzey dalga sınıfı ise Rayleigh ve Love dolga türlerine ayrılır (Şekil 3).



Şekil 2. Cisim dalgaları ve parçacığın hareketi: a) P dalgası; b) S dalgası

Basınç dalgası, boyuna dalgası (P dalgası) olarak bilinmektedir. Bu tür dalgaların ortam içerisinde $c_p = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}}$ hızı ile ilerler. Bu ifadede λ Lamé sabiti, G kayma modülü ve ρ ise ortamın birim ağırlığıdır. Ses dalgasına benzeyen P dalgasının yönü, dalganın ilerleme yönü ile paralel olup, geçtikleri ortamda önce sıkışma sonra genişmeyi meydana getirmektedirler (Şekil 2a). Cisim dalga türlerinden bir diğeri ise S dalgası veya kayma dalgasıdır. Bu tür

dalgalarda ortamda kayma deformasyonlarına neden olur. S dalgasının titreşimi dalga ilerleme yönüne diktir (Şekil 2b). Kayma dalgası, enine veya kısaca S dalgası olarak adlandırılan bu tür dalgalarda ortam içinde $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ hız ile ilerlerler. P ve S dalgalarının etkileşimi sonucundan zeminin yüzeyine yakın bölgelerde meydana gelen yüzey dalgaları, mühendislik açısından iki çeşidi olan Rayleigh ve Love dalgaları önemlidir (Şekil 3). Rayleigh dalgaları etkisinde olan bir eleman veya parçacığın hem yatay ve hem düşey yönde ilerlerken, Love dalgaları etkisi altında ise sadece yatay yönde ilerlemektedir. Rayleigh ve cisim dalgaları (P ve S dalgaları) arasındaki hız ilişkileri Poisson oranına (ν) bağlı bir katsayı olarak ifade edilmektedir (Kramer 1996; Kramer 2003). Ayrıca cisim ve yüzey dalgalarının arasındaki hız ilişkileri $c_P > c_S > c_R$ şeklindedir.



Şekil 3. Yüzey dalgaları: a) Rayleigh dalgası; b) Love dalgası

Zeminin sonsuza uzanan doğrultusunda sonsuz elemanlarının kullanılma sebebi, o doğrultuda deplasmanların giderek azalmasını ve yansıyan dalgalarının geçirgenliğini sağlamaktır. Dinamik zemin-yapı veya zemin-yapı-sıvı etkileşim problemlerin sonsuza uzanan bölgelerinde sonsuz elemanlarının matematiksel formüllerini oluştururken, dalga yayılımının genlik azalması ve faz gecikmesini dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle, karmaşık deplasmanlı şekil fonksiyonlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Sonsuz elemanların deplasmanları genellikle karmaşık sayılar olduğundan, sistemin hareket denklemi harmonik yük etkisi altındaysa frekans tanım alanına veya yer hareketi etkisi altındaysa Laplace uzayına dönüştürülmesi gerekmektedir.

Zemin bölgesinin sonsuza uzanan doğrultusunda, yedi düğümlü azalan fonksiyonlu sonsuz eleman modeli bu tez çalışmasında kullanılmıştır (Şekil 4). Şekil 4'ten görüldüğü gibi elemanın bir doğrultusu sonsuza giderken (ξ yönü, $0 \leq \xi \leq \infty$), diğer doğrultusu ise sonlu bir boyuta gitmektedir (η yönü, $-1 \leq \eta \leq +1$). Gerçek elemanla referans eleman arasındaki geometrik dönüşümü,

$$x = \sum_{i=1}^5 M_i x_i, \quad y = \sum_{i=1}^5 M_i y_i \quad (40)$$

şeklinde yapılmaktadır. Bu bağıntıdaki M_i 'ler geometrik şekil fonksiyonlarını temsil edip,

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{1}{2} (1 - \xi)(1 - \eta) \\ M_2 &= 0 \\ M_3 &= \frac{1}{2} (1 - \xi)(\eta + 1) \\ M_4 &= \frac{1}{2} \xi(1 - \eta) \\ M_5 &= \frac{1}{2} \xi(1 + \eta) \end{aligned} \quad (41)$$

ifadeleri ile hesaplanmaktadır (Chuhan and Chongbin 1987). Kullanılan yedi düğümlü azalan fonksiyonlu sonsuz elemanın herhangi bir noktasındaki deplasmanları ise,

$$u = \sum_{i=1}^7 N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^7 N_i v_i \quad (42)$$

bağıntıların yardımı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda, u ve v sırasıyla x ve y doğrultularındaki düğüm deplasmanları göstermektedir. Kullanılan sonsuz elemanın interpolasyon şekil fonksiyonları N_i ise,

$$\begin{aligned} N_1(\xi, \eta, s) &= P_1(\xi, s) \left[\frac{1}{2} \eta(\eta - 1) \right] \\ N_2(\xi, \eta, s) &= P_2(\xi, s)(1 - \eta^2) \\ N_3(\xi, \eta, s) &= P_3(\xi, s) \left[\frac{1}{2} \eta(\eta + 1) \right] \\ N_k(\xi, \eta, s) &= P_k(\xi, s) \left[\frac{1}{2} (1 - \eta) \right] \quad k = 4, 6 \\ N_k(\xi, \eta, s) &= P_k(\xi, s) \left[\frac{1}{2} (\eta + 1) \right] \quad k = 5, 7 \end{aligned} \quad (43)$$

ifadelerle hesaplanmaktadır. Bu bağıntılarda görülen $P_k(\xi, \omega)$ fonksiyonu, deplasman yayılma fonksiyonu olup üç dalga tipini içeren sonsuz elemanın k 'inci düğümü için,

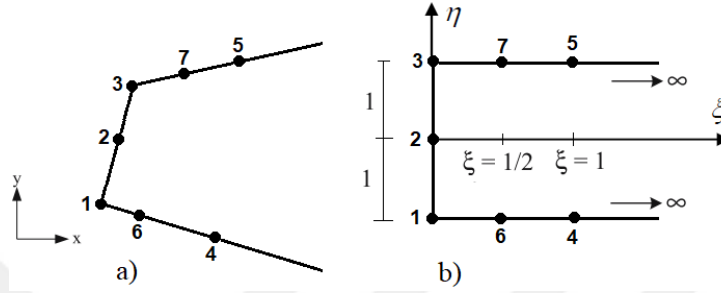
$$P_k(\xi, s) = ae^{-(\alpha+\beta_1)\xi} + be^{-(\alpha+\beta_2)\xi} + ce^{-(\alpha+\beta_3)\xi} \quad \beta_i = \frac{s}{c_i} L, i = 1, 2, 3 \quad (44)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Yerli 1998; Yerli *et al.* 1998). Bu ifadelerde görülen s , α ve β_i sırasıyla Laplace uzayındaki kompleks değişkeni, deplasman genlik azaltma parametresi ve dalga tiplerini temsil etmektedir. Sonsuz ortamlarda deplasman genlik azaltma parametresi (α), çözümün ne şekilde olduğu varsayımına bağlı olarak seçilmektedir (Bettess and Bettess

1984). Ayrıca, c_i ve L ise sırası ile ortamda dalga hızını (c_p, c_s, c_R) ve elemanın sonsuza uzanan doğrultusundaki düğümler arasında olan mesafeyi gösterip,

$$L = \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2} \quad (45)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Denklem 44'te üç tip elastik dalgaların süperpozisyonunu göstermektedir. Bu ifadelerde bulunan a , b ve c katsayıları üç tip dalganın var olduğunu dikkate alınarak hesaplanmalıdır.



Şekil 4. Yedi düğümlü sonsuz eleman; a) gerçek eleman, b) referans eleman

Dolayısıyla, Denklem 42'de u veya v elemanın sonsuza uzanan bir kenarı (1 ile 4 düğümlerinin bulunduğu kenar veya 3 ile 5 düğümlerinin bulunduğu kenar (Şekil 4) için uygulanıp gerekli düzenlemeler yapılarak üç dalga tipini içeren yedi düğümlü sonsuz elemanın deplasman yayılma fonksiyonları,

$$\begin{aligned} P_k(\xi, \omega) &= \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\frac{1}{2}(3\alpha + \beta_2 + \beta_3)} \left(e^{-\frac{1}{2}\beta_2} - e^{-\frac{1}{2}\beta_3} \right) \right] e^{-(\alpha + \beta_1)\xi} \\ &+ \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\frac{1}{2}(3\alpha + \beta_3 + \beta_1)} \left(e^{-\frac{1}{2}\beta_3} - e^{-\frac{1}{2}\beta_1} \right) \right] e^{-(\alpha + \beta_2)\xi} \\ &+ \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\frac{1}{2}(3\alpha + \beta_1 + \beta_2)} \left(e^{-\frac{1}{2}\beta_1} - e^{-\frac{1}{2}\beta_2} \right) \right] e^{-(\alpha + \beta_3)\xi}, k = 1, 2, 3 \\ P_k(\xi, \omega) &= \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\frac{\alpha}{2}} \left(e^{-\frac{1}{2}\beta_2} - e^{-\frac{1}{2}\beta_3} \right) \right] e^{-(\alpha + \beta_1)\xi} + \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\frac{\alpha}{2}} \left(e^{-\frac{1}{2}\beta_3} - e^{-\frac{1}{2}\beta_1} \right) \right] e^{-(\alpha + \beta_2)\xi} \\ &+ \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\frac{\alpha}{2}} \left(e^{-\frac{1}{2}\beta_1} - e^{-\frac{1}{2}\beta_2} \right) \right] e^{-(\alpha + \beta_3)\xi}, k = 4, 5 \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} P_k(\xi, \omega) &= \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\alpha} (e^{-\beta_3} - e^{-\beta_2}) \right] e^{-(\alpha + \beta_1)\xi} + \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\alpha} (e^{-\beta_1} - e^{-\beta_3}) \right] e^{-(\alpha + \beta_2)\xi} \\ &+ \left[\frac{1}{\Delta} e^{-\alpha} (e^{-\beta_2} - e^{-\beta_1}) \right] e^{-(\alpha + \beta_3)\xi}, k = 6, 7 \end{aligned}$$

şeklinde elde edilmektedir (Yerli 1998). Burada Δ ise,

$$\begin{aligned} \Delta &= e^{-\frac{3\alpha}{2}} \left\{ e^{-\frac{1}{2}(\beta_1 + \beta_2)} \left[e^{-\frac{1}{2}\beta_1} - e^{-\frac{1}{2}\beta_2} \right] + e^{-\frac{1}{2}(\beta_2 + \beta_3)} \left[e^{-\frac{1}{2}\beta_2} - e^{-\frac{1}{2}\beta_3} \right] \right. \\ &\quad \left. + e^{-\frac{1}{2}(\beta_3 + \beta_1)} \left[e^{-\frac{1}{2}\beta_3} - e^{-\frac{1}{2}\beta_1} \right] \right\} \end{aligned} \quad (47)$$

ifadesi şeklindedir. Sönümlü ve sönümsüz hareket denklemlerinde görülen yakın bölgelerinin rijitlik ve kütle matrisleri, Laplace parametresinden (s) bağımsız olduğundan dolayı sadece bir defa kurulması yeterlidir. Ancak, uzak bölgelere ait bu matrisler Laplace uzayına bağlı olduğundan dolayı her adımda hesaplanması gerekmektedir. Yukarıda hesaplanan deplasman yayılma fonksiyonları, uzak bölgelerde kullanılan sonsuz elemanın rijitlik ve kütle matrislerinin kurulmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, Denklem 43'te yazılan sonsuz elemanın interpolasyon şekil fonksiyonlarını kullanılarak elemanın rijitlik ve kütle matrisleri,

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_Z^e &= h_e \int_{-1}^1 \int_0^\infty \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} |J| d\xi d\eta \\ \mathbf{M}_Z^e &= h_e \int_{-1}^1 \int_0^\infty \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} |J| d\xi d\eta \end{aligned} \quad (48)$$

ifadelerle hesaplanmaktadır. Denklem 48'de görülen sonlu integral, standart sayısal Gauss integrasyon yöntemi ile hesaplanırken, sonsuz integral ise Newton-Cotes yöntemi ile hesaplanmaktadır. Fakat, sonsuz elemanının şekil fonksiyonlarında deplasman yayılma fonksiyonu cinsinden ifade edildiğinden dolayı sonsuz yöndeki tipik integral terimi özel olarak geliştirilmiş (Abramowitz 1964) sayısal Newton-Cotes yöntemi ile,

$$I = \int_0^\infty F(\xi) e^{-\left(\alpha + \frac{\beta_i + \beta_j}{2}\right)\xi} d\xi \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (49)$$

şekilinde düzenlenerek hesaplanması gerekmektedir. Bu konu ile ilgili detaylı bilgiler Abramowitz (1964) ve Yerli (1998)'de mevcuttur.

Bu bölümde açıklanan yedi düğümlü, azalan fonksiyonlu ve üç dalga tipini içeren sonsuz eleman modelinin rijitlik matrisi rezervuar bölgesi için uygun bir şekilde düzenlenerek rezervuarın sonsuza uzanan bölgesinde de kullanılmıştır. Sonsuz elemanın sıvı ortamında kullanılması ve doğru sonuçlar verdiği konusunda örnekler çözülerek denenmiştir. Örneklerden bir tanesi Koyna barajı-rezervuar etkileşimi problemi olup, sonuçları doğrulama kısmında verilmiştir. Lagrange yaklaşımıyla modellenen rezervuar ortamında radyasyon sönümü böylece dikkate alınmıştır. Ayrıca, Lagrange yaklaşımında yukarıda bahsedilen yedi düğümlü azalan fonksiyonlu sonsuz elemanın modifiyesi ile sonsuz sıvı elemanlar oluşturularak ilk defa bu tez çalışmasında kullanılmıştır ve doğru çalıştığı, ilerideki bölümlerde çözülen örneklerle açıklanmıştır.

Birleşik Sistemin Yakın Bölgelerinde Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri

Baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin sonlu eleman modelinde, baraj gövdesi ve yakın zemin bölgesinde sekiz düğümlü izoparametrik sonlu elemanlar kullanılırken, yakın rezervuar bölgesinde ise dokuz düğümlü izoparametrik sıvı elemanlar kullanılmıştır. Rezervuar ortamında kullanılan dokuz düğümlü sıvı elemanı Wilson and Khalvati (1983) tarafından geliştirilerek su ortamının davranışını uygun bir şekilde sergilediği çeşitli örneklerle denenmiştir. Ayrıca, üç düğümlü tek boyutlu elemanlar, yüzey dalgaları dikkate almak için rezervuarın yüzeyinde kullanılmıştır. Bu sonlu elemanlara ait şekil faksiyonları, kütle ve rijitlik matrislerinin hesaplanması vb. parametreler sonraki alt başlıklarda açıklanmıştır.

Katı sonlu eleman

Yakın zemin ve baraj gövdesi olmak üzere bu iki bölgede sekiz düğümlü izoparametrik sonlu elemanlar kullanılmıştır (Şekil 5). Bu elemana ait kütle ve rijitlik matrisleri kartezyen ve doğal koordinatlarında sırasıyla,

$$\mathbf{K}_b^e = h_e \iint_{A_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dA = h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} |J| d\xi d\eta$$
$$\mathbf{M}_b^e = h_e \iint_{A_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dA = h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} |J| d\xi d\eta$$

ifadelerle hesaplanmaktadır. Bu ifadelerde görülen $\mathbf{B}$, $\mathbf{D}$ ve $\mathbf{N}$ sırasıyla elemanın yer değiştirme-şekil değiştirme matrisi, malzeme matrisi ve şekil fonksiyonları matrisidir. Ayrıca, dA , $|J|$, h_e ve ρ sırasıyla elemanın alanı, doğal koordinatları kartezyen koordinatlarına dönüştüren Jakobian matrisinin determinantı, elemanın kalınlığı ve birim ağırlığıdır. Doğal ve kartezyen koordinatlar arasındaki ilişki,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \mathbf{J} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix}$$

veya

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix}$$

ifadelerle tanımlanmaktadır. Burada $\mathbf{J}$, 2x2 Jakobian matrisidir. Sekiz düğümlü katı sonlu elemanın şekil fonksiyonlarına bağlı deplasman matrisi $\mathbf{B}$,

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \dots \quad \mathbf{B}_8] \quad (52)$$

burada,

$$[\mathbf{B}_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, \dots, 8 \quad (53)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu ifadelerde görülen N_i , sekiz düğümlü katı elemanın i . düğümlüne ait şekil fonksiyonudur. Bu elemanın köşe düğüm noktalarında şekil fonksiyonları,

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (\xi \xi_i + \eta \eta_i - 1)$$

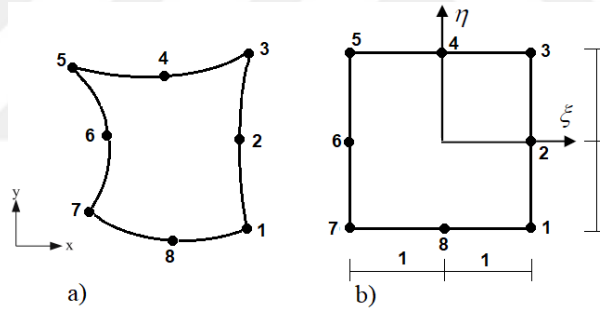
kenar orta noktalarında ($\xi_i = 0$ için);

$$N_i = \frac{1}{2} (1 - \xi^2) (1 + \eta \eta_i) \quad (54)$$

kenar orta noktalarında ($\eta_i = 0$ için);

$$N_i = \frac{1}{2} (1 + \xi \xi_i) (1 - \eta^2)$$

şeklinde ifade edilmiştir (Reddy 2004).



Şekil 5. Sekiz düğümlü katı sonlu eleman; a) gerçek eleman, b) referans eleman

Denklem 50’de görülen $\mathbf{D}$, 3x3 malzeme matrisi olup düzlem şekildeğiştirme durum için,

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 \\ \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (55)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem 55’te görülen E , G ve ν sırasıyla elemanın malzemesine ait elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranıdır (Chandrupatla and Belegundu 2021). Ayrıca, $\mathbf{N}$ şekil fonksiyonları matrisi olup,

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & N_8 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & \dots & 0 & N_8 \end{bmatrix} \quad (56)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

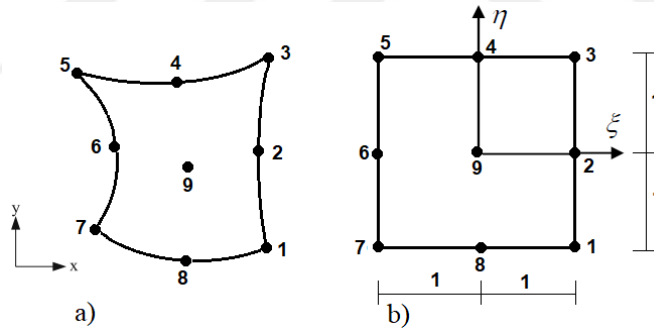
Sıvı sonlu eleman

Yakın rezervuar bölgesinde dokuz düğümlü izoparametrik sıvı sonlu elemanlar kullanılmıştır (Şekil 6). Bu elemana ait kütle ve rijitlik matrisleri kartezyen ve doğal koordinatlarında sırasıyla,

$$\mathbf{K}_s^e = h_e \iint_{A_e} \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} dA = h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} |\mathbf{J}| d\xi d\eta \quad (57)$$

$$\mathbf{M}_s^e = h_e \iint_{A_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dA = h_e \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} |\mathbf{J}| d\xi d\eta$$

ifadelerle hesaplanmaktadır. Bu ifadelerde görülen $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{N}$ sırasıyla elemanın yer değiştirme-şekil değiştirme matrisi, malzeme matrisi ve şekil fonksiyonları matrisidir. Ayrıca, dA , $|\mathbf{J}|$, h_e ve ρ sırasıyla elemanın alanı, doğal koordinatları kartezyen koordinatlarına dönüştüren Jakobian matrisinin determinantı, elemanın kalınlığı ve birim ağırlığıdır. Doğal ve kartezyen koordinatlar arasındaki dönüşüm matrisi $\mathbf{J}$ olup daha önce Denklem 51’de katı eleman için gösterilmiştir. Sıvı eleman için de aynı bağıntı kullanılabilir.



Şekil 6. 4/9 değişken düğüm noktalı sıvı sonlu eleman; a) gerçek eleman, b) referans eleman

Bu elemana ait $\mathbf{C}$ malzeme matrisi Denklem 10’da verilmiştir. Elemanın şekil değiştirme matrisi ise,

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \dots \quad \mathbf{B}_9] \quad (58)$$

burada,

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial N_i}{\partial y} & -\frac{1}{2} \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad (59)$$

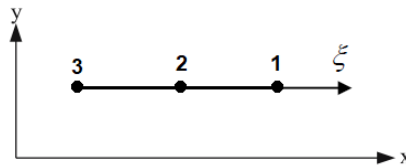
şeklinde ifade edilmiştir. Bu ifadedelerde görülen N_i , dokuz düğümlü sıvı elemanın i ’inci düğümüne ait şekil fonksiyonudur. Bu elemana ait şekil fonksiyonları,

$$\begin{aligned}
N_1 &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) - \frac{1}{2}N_7 - \frac{1}{2}N_8 - \frac{1}{4}N_9 \\
N_2 &= \frac{1}{2}(1 + \xi)(1 - \eta^2) - \frac{1}{2}N_9 \\
N_3 &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) - \frac{1}{2}N_5 - \frac{1}{2}N_8 - \frac{1}{4}N_9 \\
N_4 &= \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta) - \frac{1}{2}N_9 \\
N_5 &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) - \frac{1}{2}N_5 - \frac{1}{2}N_6 - \frac{1}{4}N_9 \\
N_6 &= \frac{1}{2}(1 - \xi)(1 - \eta^2) - \frac{1}{2}N_9 \\
N_7 &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) - \frac{1}{2}N_6 - \frac{1}{2}N_7 - \frac{1}{4}N_9 \\
N_8 &= \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 - \eta) - \frac{1}{2}N_9 \\
N_9 &= (1 - \xi^2)(1 - \eta^2)
\end{aligned} \tag{60}$$

şeklinde ifade edilmiştir (Bathe 2006). Ayrıca, sıvının yüzeyinde tek boyutlu sıvı elemanın rijitlik matrisi Denklem 20’de verilen denklemlerle hesaplanır. İlgili elemanın şekil fonksiyonları,

$$\begin{aligned}
N_1 &= \frac{1}{2}(1 + \xi) - \frac{1}{2}(1 - \xi^2) \\
N_2 &= (1 - \xi^2) \\
N_3 &= \frac{1}{2}(1 - \xi) - \frac{1}{2}(1 - \xi^2)
\end{aligned} \tag{61}$$

ifadelerler şeklindedir (Bathe 2006).



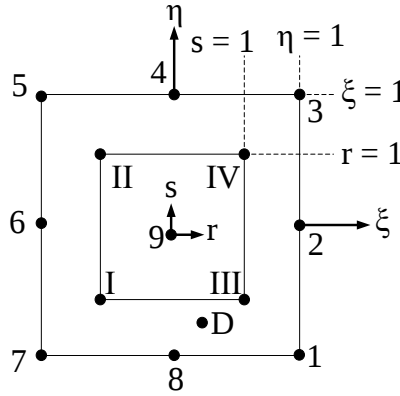
Şekil 7. 2/3 değişken düğüm noktalı tek boyutlu yüzey sıvı sonlu eleman

Hidrodinamik Basınçlar ve Gerilmelerin Hesaplanması

Sıvı elemanlara ait hidrodinamik basınçlarının ve katı elemanlara ait gerilmelerinin hesaplanmasında kullanılan formüller bu bölümde anlatılmıştır. Sıvı elemanın köşe düğümlerindeki veya elemanın içinden seçilen herhangi bir noktanın hidrodinamik basınçlarını hesaplamak için, Denklem 16’yı Denklem 10’un gereken yerine konarak,

$$\underline{\sigma}_i = \begin{Bmatrix} P \\ P_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & 0 \\ 0 & \alpha_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial N_i}{\partial y} & -\frac{1}{2} \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \Rightarrow \underline{\sigma}_i = \mathbf{C} \mathbf{B} \underline{U}^e, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad (62)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemde, $\underline{\sigma}_i$ ve $\underline{U}^e$ sıvı elemanın i 'inci düğümüne ait gerilme vektörü ve düğüm deplasman vektörüdür; $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{B}$ matrisleri ise elemanın malzeme ve yerdeğiştirme-şekil değıştirme matrisleridir. Böylece, sıvı elemanın herhangi bir i . düğümüne ait hidrodinamik basıncı hesaplanmış olunur. Ancak, bu şekliyle hesaplanan gerilmelerin süreksiz olduğu Hinton and Campbell (1974)'te ifade edilmiştir. Elemanın gerilmelerini hesaplanırken düğüm noktaları en iyi seçenek olabilir, ama düğüm noktaları yardımıyla elde edilen gerilme sonuçları doğru sonuçlardan daha uzak çıktığı yine Zienkiewicz *et al.* (2005)'te vurgulanmıştır. Şekil 8'de gösterilen sıvı elemanın Gauss noktalarında veya $r = 0$ ve $s = 0$ noktasında gerilmeler daha doğru hesaplandığı belirtilmiştir (Calayır 1994). Şekil 8'de gösterilen dokuz düğümlü sıvı elemanın Gauss noktaları, $r = s = \pm 1/\sqrt{3}$ değerleri alan noktalardır. Bu elemanın Gauss noktalarındaki düzeltilmemiş gerilmeler enterpolasyon usulıyla hesaplanıp, daha sonra elemanın herhangi bir noktasındaki düzeltilmiş gerilmeler ise ekstrapolasyon usulıyla hesaplanmaktadır. Elemanın düğüm noktalarındaki düzeltilmiş gerilmelerinin elde edilişı, yumuşatma tekniğiyle (smoothing technique) Hinton and Campbell (1974)'te yapılmıştır.



Şekil 8. Gerilmelerin Gauss noktalarından ekstrapolasyonunda kullanılan tabii koordinatlar

Şekil 8'de (r, s) ve (ξ, η) sırasıyla elemanın ve Gauss noktalarının tabii koordinatlarıdır. r koordinatı ξ koordinatıyla ve s koordinatı η koordinatıyla orantılıdır. IV nolu Gauss noktasını dikkate aldığında, bu noktada $r = s = 1$ ve $\xi = \eta = 1/\sqrt{3}$ 'dir. Buradan,

$$r = \xi \sqrt{3}; \quad s = \eta \sqrt{3} \quad (63)$$

olarak bulunur. Elemanın herhangi bir D noktasındaki düzeltilmiş gerilmeler,

$$\hat{P}_D = \sum_{i=1}^4 h_i P_i \quad (64)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda, $\hat{P}_D$ elemanın D noktasındaki düzeltilmiş gerilmeleri ifade etmektedir. h_i ve P_i ise sırasıyla i. Gauss noktasına ait şekil fonksiyonu ve düzeltilmemiş gerilmeyi göstermektedir. h_i şekil fonksiyonları,

$$\begin{aligned} h_1 &= \frac{1}{4}(1+r)(1-s) \\ h_2 &= \frac{1}{4}(1+r)(1+s) \\ h_3 &= \frac{1}{4}(1-r)(1+s) \\ h_4 &= \frac{1}{4}(1-r)(1-s) \end{aligned} \quad (65)$$

şeklinde verilmektedir. Böylece, elemanın herhangi bir noktasındaki hidrodinamik basıncı sırasıyla Denklem 62-65'in yardımıyla hesaplanabilmektedir. Denklem 62'yi kullanılarak sıvı elemanın dört tane Gauss noktalarındaki düzeltilmemiş gerilmeleri bulup, D noktasının koordinatlarını Denklem 63 yerine konarak r ve s hesaplanır. Hesaplanan r ve s koordinatları Denklem 65 yerlerine konarak şekil fonksiyonlar hesaplanır. Hesaplanan şekil fonksiyonları Denklem 64'ün yerlerine konarak D noktasında düzeltilmiş hidrodinamik basınç tepkisi elde edilmiş olunur (Calayır 1994). Ayrıca, sıvı elemanın dört köşe düğüm noktalarındaki (1, 3, 5 ve 7 düğümü, Şekil 8) hidrodinamik basınçlar, dört Gauss noktasında hesaplanan düzeltilmemiş gerilmeleri kullanarak ekstrapolasyon usuluyula,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \\ \sigma_5 \\ \sigma_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c & a \\ b & a & a & c \\ a & c & b & a \\ c & a & a & b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_I \\ \sigma_{II} \\ \sigma_{III} \\ \sigma_{IV} \end{Bmatrix} \quad a = -0.5 \quad b = 1 - \sqrt{3}/2 \quad c = 1 + \sqrt{3}/2 \quad (66)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda, σ_1 , σ_3 , σ_5 ve σ_7 sıvı elemanın köşe düğümlerindeki hidrodinamik basınçları içeren düzeltilmiş gerilmeleri belirlerken, σ_I , σ_{II} , σ_{III} ve σ_{IV} ise dört Gauss noktasında ve Denklem 62 ile hesaplanan düzeltilmemiş gerilmeleridir. Denklem 66'da verilen ekstrapolasyon matrisi içinde görülen a, b ve c katsayıları, elemanın ilgili düğümünde olan ξ ve η değerleri ilk olarak Denklem 63'te konup daha sonra Denklem 65 yardımıyla elde edilmiştir. Böylece, rezervuar bölgesindeki hidrodinamik basınçlar hesaplanmış olur.

Yukarıda bahsedilen yol takip edilerek katı elemanlarının düğüm noktalarındaki gerilme tepkileri de aynı şekilde hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla, elemanın köşe düğüm noktalarındaki gerilmeler,

$$\underline{\sigma}_i = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{D} \mathbf{B} \underline{U}^e, i = 1, 2, 3, \dots, 8 \quad (67)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Bu ifadede görülen σ_x ve σ_y i'inci düğüme ait normal gerilmeler ve τ_{xy} ise kayma gerilmesidir. Ayrıca, $\mathbf{D}$, $\mathbf{B}$ ve $\underline{U}^e$ sırasıyla Denklem 55'te verilen elemanın malzeme matrisi, Denklem 52'de verilen yer değiştirme matrisi ve düğüm deplasman vektörüdür. Elemanlar arasındaki müşterek düğümlerde bu tepkileri yumuşatmak için, hesaplanan gerilmelerinin ortalaması alınmıştır.

Betonun Yaşa Bağlı Bozulma Modeli

Betonun bozulması, kendisine uygulanan gerilmelere veya yüklere dayanabilecek net alandaki azalmayı tanımlar. Betondaki hasarın uzantısı Ghrib and Tinawi (1995)'te bir ortotropik indeks olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$d_{gi} = \frac{\Omega_i - \Omega_i^d}{\Omega_i} = 1 - \frac{\Omega_i^d}{\Omega_i} \quad (68)$$

burada Ω_i ve Ω_i^d bozulmuş malzemenin sırasıyla i doğrultusundaki toplam alanı ve net alanı gösterir. d_{gi} indeksi 0 ile 1 arasında bir aralığa sahiptir. 0 indeksi hiç bozulma olmadığını ve 1 indeksi ise malzemenin tamamen bozulduğunu gösterir. $i = 1, 2$, iki boyutlu durumda Kartezyen koordinatlarda karşılık gelen x ve y eksenleri gösterir. Böylece, düzlem şekil değiştirme durumunda ortotropik bozulmuş malzeme matrisi aşağıdaki şekilde yazılır:

$$D_d = \frac{E_d}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu)X_1^2 & \nu X_1 X_2 & 0 \\ \nu X_1 X_2 & (1-\nu)X_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)X_1^2 X_2^2}{(X_1^2 + X_2^2)} \end{bmatrix}, \text{burada } \begin{pmatrix} X_1 = 1 - d_{g1} \\ X_2 = 1 - d_{g2} \end{pmatrix} \quad (69)$$

Bu denklemde E_d ve ν sırasıyla malzemenin bozulma olmadan elastik modülünü ve Poisson oranını ifade eder. Denklem 69'da, eğer $d_g = d_{g1} = d_{g2}$ olursa, betonun izotropik bozulması,

$$D_d = (1 - d_g)^2 D \quad (70)$$

şekilde yazılır. Burada, D_d ve D matrisleri sırasıyla bozulmuş ve bozulmamış malzeme matrisini temsil eder. Betonun ömür boyunca basınç dayanımındaki artış ve kemo-mekanik etkiler nedeniyle dayanım kaybı, hizmet ömrü boyunca aynı anda meydana gelir. Bu gerçeklik, çeşitli araştırmalarla deneysel olarak kanıtlanmıştır (Gogoi and Maity 2007; Pan *et al.* 2013a). Malzemenin bozulması, kemo-mekanik eylemlerin neden olduğu toplam

gözeneklilik ϕ kavramıyla yorumlanabilir. Malzemenin toplam gözenekliliği, başlangıç gözeneklilik ϕ_0 , kimyasal nedenlerden gözeneklilik ϕ_c ve mekanik nedenlerden gözeneklilik ϕ_m olmak üzere üç kaynağı içerir. Kemo-mekanik gözeneklilik, kimyasal ve mekanik etkilerden dolayı aynı anda meydana gelir. Dolayısıyla, toplam gözeneklilik kavramı Kuhl *et al.* (2004) tarafından,

$$\phi = \phi_0 + \phi_c + \phi_m \quad (71)$$

şeklinde açıklanmıştır. Bu denklemde mekanik gözeneklilik, mekanik etkilerden dolayı mikro çatlakların oluşması ve yayılması ile meydana gelir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$\phi_m = (1 - \phi_0 - \phi_c) d_m \quad (72)$$

Burada d_m Gogoi and Maity (2007)'de geliştirilen mekanik hasar fonksiyonudur. Mekanik hasar indeksi ve diğer parametreler hakkında ayrıntılı bilgi Kuhl *et al.* (2004) ve Gogoi and Maity (2007)'de verilmiştir.

AAR eylemlerinin yol açabileceği kimyasal gözeneklilik, bu araştırmaya dahil edilen beton bozulmasının bir başka nedenidir. AAR nedeniyle betonun zamana bağlı bozulması deneysel olarak Pan *et al.* (2013b)'de önerilen ampirik denklemle,

$$\phi_c = d_{AAR} = \frac{\epsilon_{AAR}}{\epsilon_{AAR} + 0.003} \quad (73)$$

şekilde belirlenmiştir. Burada d_{AAR} ve ϵ_{AAR} , sırasıyla AAR eylemlerden oluşan hasar ve gerinimidir. Beton malzemesindeki zamana bağlı AAR gerinimi Azizan *et al.* (2017)'de incelenerek daha sonra ampirik bir denklemle,

$$\epsilon_{AAR} = 0.00435 t^{1.1163} \quad (74)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemde t zamanı (yıl) ifade eder. Betonun toplam gözenekliliği ve dayanım kazancının bir fonksiyonu olarak betonun zamana bağlı bozulan elastik modülü Gogoi and Maity (2007) tarafından aşağıdaki ifade ile tanımlanmıştır:

$$E_m = (1 - \phi)^{\frac{t}{\tau_a}} E_0 \quad (75)$$

Bu denklemde τ_a , malzemenin tasarım ömrünü ifade eder. Ayrıca, betonun bozulmamış elastisite modülü Gorai and Maity (2021)'de aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır:

$$E_0 = 5000 \sqrt{f(t)} \quad (76)$$

Bu denklemde zamana bağlı fonksiyon $f(t)$, betonun t yaşındaki basınç dayanımını ifade eder. 50 yıllık betonun basınç dayanımındaki kazanımı deneysel olarak Washa *et al.* (1989) (Washa *et al.* 1989) tarafından incelenmiştir. Washa *et al.* (1989)'da rapor edilen deneysel

veriler üzerinde eğri uydurma tekniği Azizan *et al.* (2017) ile, betonun dayanım kazancı için zamana bağlı bir fonksiyon Gorai and Maity (2021) tarafından,

$$f(t)=3.57\ln(t)+44.33 \quad (77)$$

şeklinde önerilmiştir. Denklem 75'ten betonun t yaşındaki bozulmuş elastik modülünü ve Denklem 76'dan betonun t yaşındaki bozulmamış elastik modülünü belirledikten sonra, izotropik bozulma indeksi, Denklem 68'in değiştirilmiş formu ile aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$d_g=1-\frac{E_m}{E_0} \quad (78)$$

Bu indeks son olarak, betonun bozulan malzeme matrisini hesaplamak için Denklem 70'e dahil edilir ve böylece, betonun zaman içerisindeki bozulma oranı mekanik ve kimyasal etkilere dolayı hesaplanmış olunur.

Bilgisayar Programları

Ağırlık barajların dinamik davranışını incelenmek üzere hazırlanan FORTRAN 90 bilgisayar programları, yukarıdaki bölümlerde anlatılan sonlu eleman bağıntıları kullanılarak bu başlık altında doğrulanması yapılmıştır. Yazılan bilgisayar programlarının genel akış şeması Şekil 9'da verilmiştir. Ayrıca, farklı parametrik incelemelerde hazırlanan bilgisayar programların akış şeması ise ilgili bölümde verilmiştir. Bu programların doğru sonuçlar verdiğine kanaat getirmek için, daha önce yayınlanan makaleler ve doktora tezlerinden örnek seçilerek sonuçları üzerinde karşılaştırmalı incelemeler yapılmıştır. Bu incelemelerde genellikle üç çeşit analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, seçilen sistemin doğal frekansları, statik analizi ve dinamik analizi yapılmıştır. Bu analizler 3 farklı ana başlıklar altında gerçekleştirilmiştir.

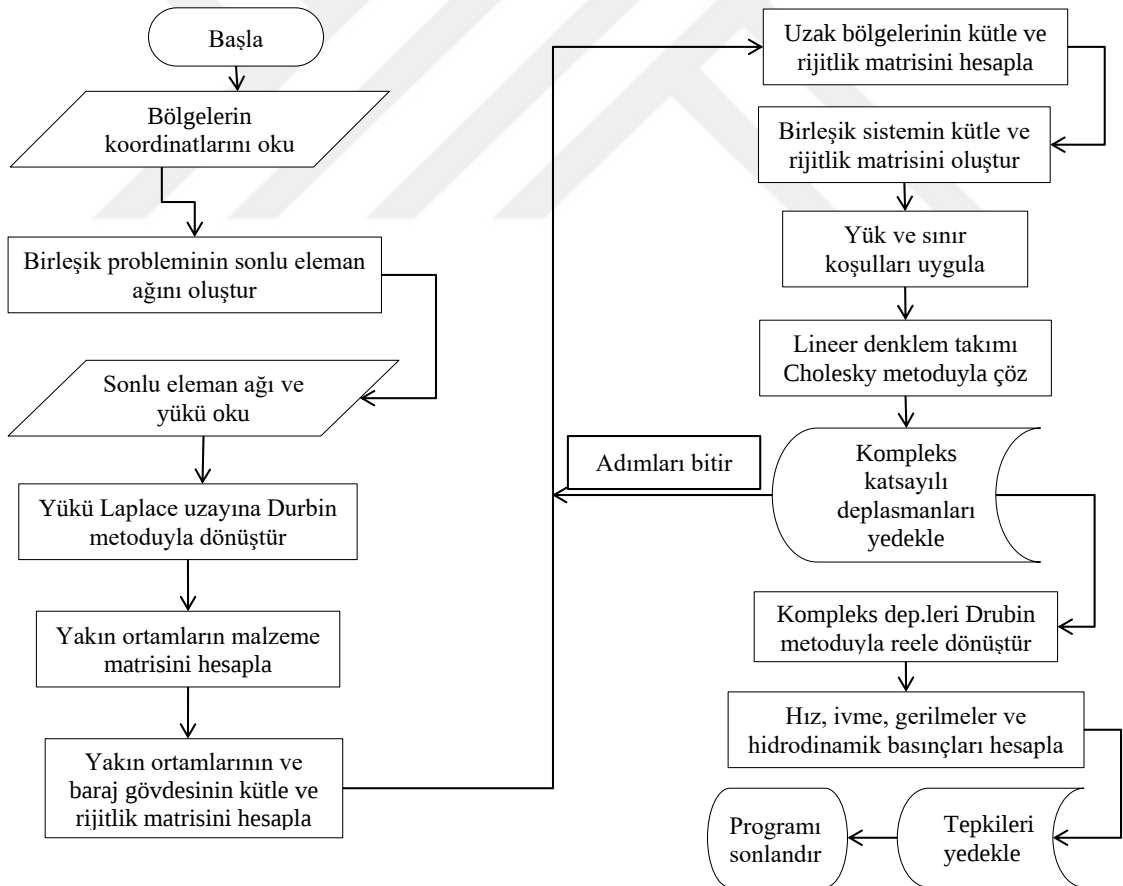
Doğal frekanslar analizi

Bu bölümde dört farklı problemin doğal frekans analizi (Rasa 2017; Rasa and Özyazıcıoğlu 2021), ilgili problemin sınır koşulları dikkate alınarak Denklem 32'nin yardımıyla hesaplanmıştır.

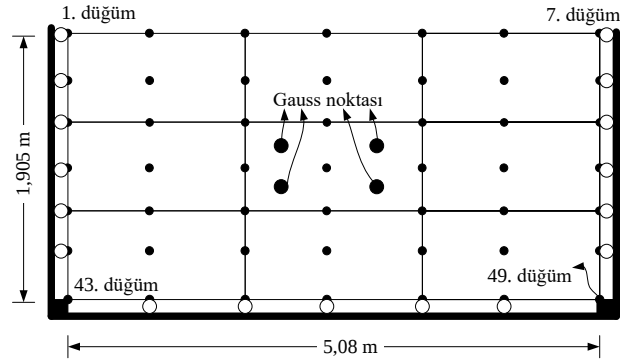
Rijit sıvı tankının doğal frekansları

Şekil 10'da gösterilen ve Akköse and Şimşek (2010)'dan seçilen rijit sıvı tankının modal analizini yapmak için, tankın doğal frekansları ve doğal modları üzerinde inceleme yapılmıştır. Rijit tankın içindeki sıvı, Lagrange sıvı sonlu elemanlarla modellenmiştir. İki

boyutlu rijit sıvı tankının teorik stabilite testleri için 9 düğüm noktalı sıvı sonlu elemanlarla tek boyutlu üç düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır. Sıvı tankın sonlu eleman ağı, düğüm noktası sayısı, sınır koşulları, boyutu ve Gauss noktası sayısı Şekil 10’da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Şekil 10’da gösterilen rijit sıvı tankının sonlu eleman ağında, toplam 9 tane sıvı sonlu eleman ve 49 düğüm noktası mevcuttur. Her bir düğümün 2 tane yerdeğiştirme bileşeni olduğuna göre sistemde toplam 98 tane serbestlik derecesi mevcuttur. Rijit sıvı tankının düşey duvarlarıyla temas halinde olan sıvı sonlu elemanlarının yatay yerdeğiştirmeler yapamadığı, dibindeki duvarıyla temas halinde olan sıvı sonlu elemanların düşey yerdeğiştirmeler yapamadığı varsayılmıştır. Dolayısıyla, toplam 98 serbestlik derecesinden 21 tanesi tutulu olduğundan 77 tane aktif serbestlik derecesi kalmaktadır. Lagrange sıvı sonlu elemanının katsayılar matrisleri hesaplanmasında 2x2 indirgenmiş sayısal integrasyon yöntemi Wilson and Khalvati (1983) önerisiyle kullanıldığından, her bir elemenda toplam 4 adet Gauss noktası bulunmaktadır. Her bir Gauss noktası ise sıvının sıkışabilirlik ve rotasyonsuzluk parametrelerini içerilmesinden toplam 2 bağımsız serbestlik derecesine sahiptir.



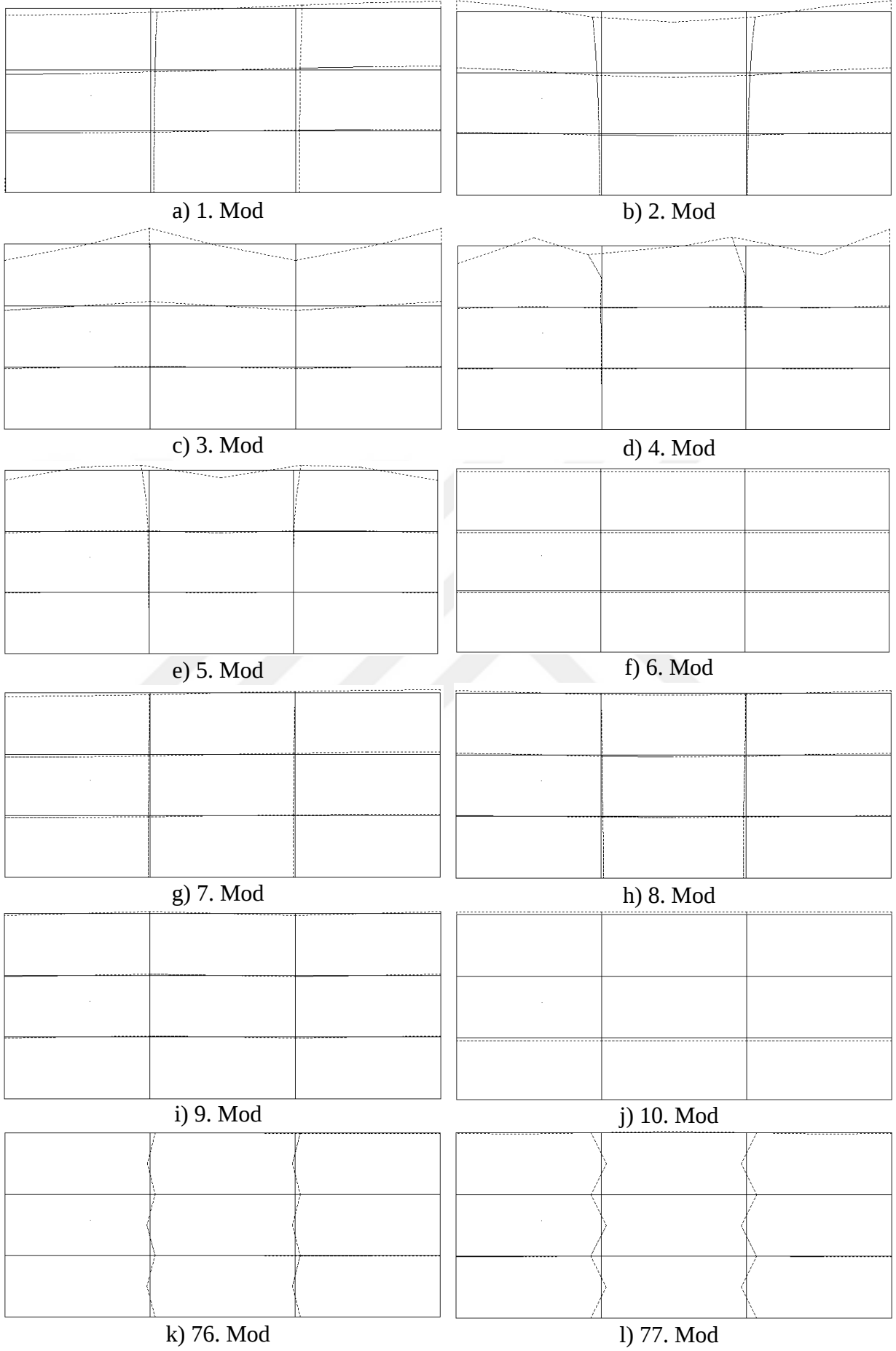
Şekil 9. Baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminin dinamik analizindeki akış şeması



Şekil 10. Rijit sıvı tankının sonlu eleman ağı

Şekil 10’da gösterilen modelin 9 tane sıvı sonlu eleman ile toplam 36 adet Gauss noktası ve 72 adet bağımsız serbestlik derecesi ortaya çıkmıştır. Sistemdeki 77 aktif serbestlik derecesinden 72 bağımsız serbestlik derecesini çıkarıldığında, 5 adet aktif serbestlik derecesi kalır. Dolayısıyla, 5 tane sıfır-enerji moduyla tekil (stabil olmayan bir sistem) bir sistem olarak ortaya çıkmaktadır. Sistemde tekillik şartını ortadan kaldırmak için, sıvı yüzeyindeki salınımı, Denklem 20’nin yardımıyla hesaplanıp ek rijitlikler halinde ilgili düğüm noktalarının düşey doğrultularına dahil edilerek gerçekleştirilmektedir.

Bunun için, rijit sıvı tankının yüzeyinde 7 tane düğüm bulunmaktadır; sıvının yüzey salınım davranışından, bu 7 düğümün düşey doğrultularına ek rijitlikler gelerek sistemin tekilliği ve sıfır-enerji modları yok olmaktadır (yani stabil bir sistem elde edilir). Bu sıvı tankının modal analizi sonucunda 36 tane rotasyonel, 36 tane hacim değişim ve 5 tane yüzey salınım modları ve frekansları elde edilmiştir. Seçilen örneğin boyutları, sıvı elemanın malzeme özelliği, Lagrange sıvı sonlu elemanların hesaplanmasında kullanılan sayısal entegrasyon meterbesi, sıvı elemanın dönme kısıtlama parametresi vs. bilgiler Akköse and Şimşek (2010)’da verilenlerle birebir aynısı burada alınmıştır. Sıvı elemanın dönme kısıtlama parametresi, sıvının hacimsel elastisite modülünün (1-1000) katına kadar alınması Calayır (1994)’te ve (1-100) katına kadar alınması Wilson and Khalvati (1983)’te önerilmiştir. Burada dönme kısıtlama parametresi, hacimsel elastisite modülünün 100 katı alınmıştır. Sıvı tankının ilk 10 doğal frekansı Tablo 1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca, rijit sıvı tankına ait 5 yüzey salınım mod şekilleri, ilk 5 hacim değişim mod şekilleri ve son 2 rotasyonel mod şekilleri Şekil 11’de verilmiştir. Sıvı tankının modal analizi daha önce bir çok araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Dolayısıyla, Lamb (1924) ve Wilson and Khalvati (1983)’te aynı rijit sıvı tankının birinci yüzey salınım frekansı analitik çözümlemeyle 0,356 Hz ve 0,3565 Hz olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Olson and Bathe (1983)’te aynı rijit sıvı tankının ilk hacim değişim frekansı ise 188,8 Hz olarak elde edilmiştir.



Şekil 11. Rijit sıvı tankının mod şekilleri

Tablo 1. Rijit sıvı tanka ait modal frekanslarının karşılaştırılması (Hz)

Mod nomarası	Bu çalışma	Akköse and Şimşek (2010)	Wilson and Khalvati (1983)	Lamb (1924)	Olson and Bathe (1983)
1	0,3567	0,3561	0,3560	0,3565	-
2	0,5503	0,5436	-	-	-
3	0,6785	0,6342	-	-	-
4	0,6880	0,7477	-	-	-
5	0,7653	0,7574	-	-	-
6	188,9	188,8	-	-	188,8
7	236,1	235,7	-	-	-
8	342,2	336,3	-	-	-
9	467,1	423,8	-	-	-
10	568,8	565,1	-	-	-

Hazırlanan FORTRAN 90 programıyla hesaplanan birinci yüzey salınım frekansı ve ilk hacim değişim frekansı sırasıyla 0,3567 Hz ve 188,9 Hz olarak elde edilmiştir. Tablo 1’de verilen karşılaştırmalı sonuçlara bakıldığında, FORTRAN 90 programıyla hesaplanan sonuçlar literatürdeki sonuçlarla oldukça yakın hesaplandığı tespit edilmiştir. Hesaplanan sonuçların analitik çözümlere de yakın olduğu görülmüştür.

Koyna barajının doğal frekansları

Koyna beton ağırlık barajı, Hindistan Maharashtra bölgesinde 1964 yılında inşa edilmiştir. Koyna barajının doğal frekansları bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Chopra and Chakrabarti 1973; Nayak and Maity 2013). Baraj gövdesinin ilk 4 doğal frekansları Tablo 2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Barajın malzeme özelliği, sonlu eleman ağı, gövdenin boyutları vs. bilgiler Chopra and Chakrabarti (1973) ve Nayak and Maity (2013)’te verilmiştir. Tablo 2’ye bakıldığında FORTRAN 90 programıyla hesaplanan doğal frekanslar, Chopra and Chakrabarti (1973) ve Nayak and Maity (2013)’te verilen sonuçlarla oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Koyna barajın doğal frekansları (Hz)

Mod nomarası	Bu çalışma	Chopra and Chakrabarti (1973)	Nayak and Maity (2013)
1	19,3	19,27	19,29
2	51,06	51,5	51,01
3	69,6	67,56	69,59
4	100,3	99,73	100,22

Sarıyar barajı-rezervuar etkileşim probleminin doğal frekansları

Sakarya nehri üzerinde inşaa edilen Sarıyar barajın doğal frekansları Köseoğlu (2007) tarafından incelenmiştir. İncelemede Sarıyar barajı rezervuar ile etkileşim halindeki doğal frekansları burada tekrar incelemeye alınmıştır. Sarıyar barajı-rezervuar etkileşim probleminin

doğal frekansları Mulsapf ve Stocalf programlarıyla ilgili kaynakta hesaplanmıştır. Problemin malzeme özelliği, sonlu eleman ağı vs. bilgiler Köseoğlu (2007)'de verilmiştir.

Tablo 3. Sarıyar barajı-rezervuar etkileşim problemin frekansları (Hz)

Mod nomarası	Bu çalışma	Mulsapf Köseoğlu (2007)	Stocalf Köseoğlu (2007)
1	3,9775	3,9597	3,9088
2	4,5720	4,5470	4,5017
3	5,4050	5,3731	5,2977
4	7,1236	7,0776	6,9878
5	9,4425	9,1705	8,6770
6	11,649	10,8559	9,2392
7	12,685	11,0612	11,1966
8	12,903	12,1340	11,9014
9	13,306	12,7356	12,4248

Sıvı ve katı ortamları arasındaki etkileşimi sağlamak için, sıvı ve katı arasında rijit kafes elemanlar yerleştirilmiştir. Kafes elemanın uzunluğu ve rijitliği sırasıyla 0,001 m ve 2×10^{12} MPa olarak seçilmiştir. Rezervuarda kısıtlama parametresi, sıvı hacimsel elastisite modülünün 100 katı alınmıştır. Rezervuarda salınım mod frekansları dışında sistemin ilk dokuz temel frekansları Tablo 3'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 3'e bakıldığında, FORTRAN 90 programıyla hesaplanan doğal frekanslar Mulsapf ve Stocalf programlarının verdiği sonuçlara yakın davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Aradaki farkın, özdeğer probleminin çözüm tekniğinden, Mulsapf ve Stocalf programlarında kütle matrisinin elle hesaplanıp programa verildiğinden kaynaklandığı düşünülmüştür (Köseoğlu 2007).

Sarıyar barajı-rezervuar-zemin etkileşim probleminin frekansları

Sarıyar barajı-rezervuar-temel etkileşim probleminin doğal frekansları yukarıda belirtildiği aynı programlarla Köseoğlu (2007)'de hesaplanmıştır. Rezervuarda salınım mod frekansları dışında sistemin ilk on temel frekansları Tablo 4'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 4'e bakıldığında, FORTRAN 90 programıyla hesaplanan sonuçlar Köseoğlu (2007)'deki sonuçlara benzerlik gösterdiği görülmüştür. Aradaki farkın, özdeğer probleminin çözüm tekniğinden ve Mulsapf ve Stocalf programlarında kütle matrisinin elle hesaplanıp programa verildiğinden kaynaklandığı düşünülmüştür (Köseoğlu 2007).

Statik analizi

Sarıyar baraj-zemin probleminin statik analizi Bayraktar (1991)'de yapılmıştır. İlgili kaynaktan seçilen örneğin sonlu eleman ağı, eleman numaraları ve düğüm numaraları Şekil

12a’da ve FORTRAN 90 programıyla çizilen sonlu eleman ağı ise Şekil 12b’de gösterilmiştir. Bayraktar (1991)’de, baraj gövdesi ve temeli dört noktalı sonlu elemanlar kullanılarak toplam 99 düğüm noktasından ve 73 tane sonlu eleman ile ağı oluşturulmuştur. Temel bölgesi üç farklı malzeme özelliğini içeren farklı tabakalardan oluşturulmuştur. Adı geçen örneğin malzeme özelliği, modelin boyutları, hidrostatik yükler vs. Bayraktar (1991)’de mevcuttur.

Tablo 4. Sarıyar barajı-rezervuar-temel etkileşim problemin frekansları (Hz)

Mod numarası	Bu çalışma	MULSAPF Köseoglu (2007)	STOCALF Köseoglu (2007)
1	3,3558	4,1110	3,9356
2	4,1912	4,9386	4,6580
3	5,3857	6,3248	6,4623
4	6,5579	6,7784	8,3334
5	7,0956	7,4882	8,8034
6	7,5572	8,6564	9,2812
7	7,5863	8,9572	9,5823
8	8,8943	9,7912	10,9269
9	9,4465	10,1923	11,5009
10	9,9825	10,6952	11,7478

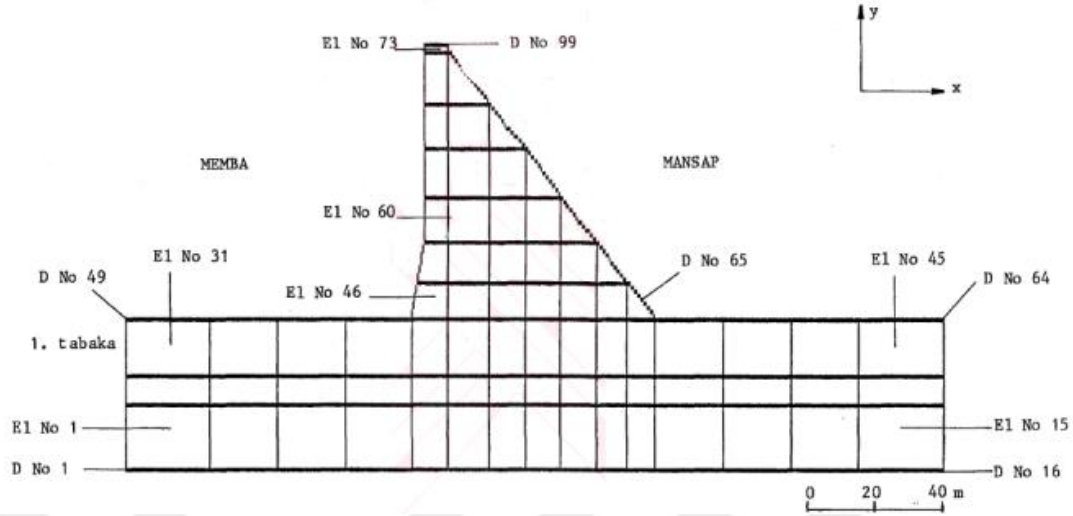
Bu örneğin yeniden sonlu eleman ağı, sekiz noktalı sonlu elemanlar kullanılarak toplam 315 düğüm noktasından ve 88 sonlu elemandan oluşturulmuştur (Şekil 12b). Baraj gölündeki sıvının hidrostatik basıncı, tekil yükler olarak rezervuarın belirli düğümlerine etki ettirilmiştir. Burada modelin sonlu eleman ağı üzerinde iyileştirmeler yapıldığından ve dört düğüm noktalı sonlu eleman yerine sekiz düğüm noktalı sonlu eleman kullanıldığından, Şekil 12b’de gösterilen yeni modelin sonuçları da nispeten farklı çıkacağı beklenmektedir.

Tablo 5. Sarıyar baraj-zemin etkileşim probleminin statik yük altındaki deplasmanlar (mm)

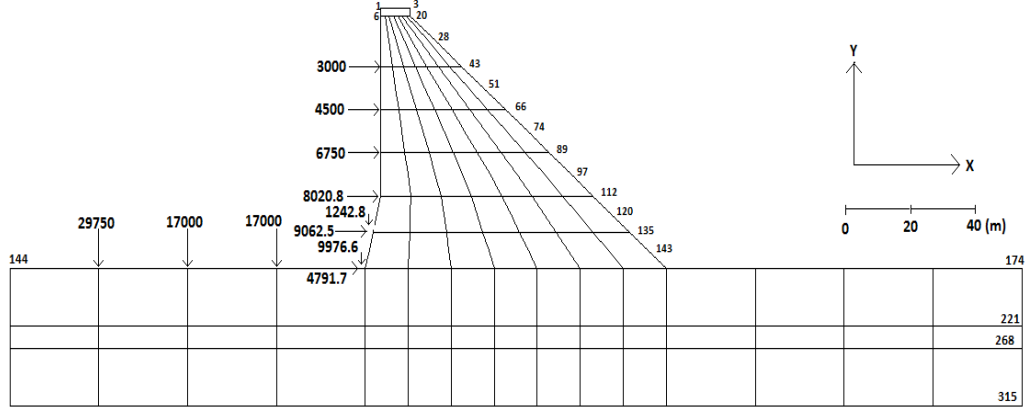
Durum	99. düğüm (Bayraktar 1991)		3. düğüm (Bu çalışma)	
	Yatay	Düşey	Yatay	Düşey
Baraj dolu temel eğilebilir	7,9	1,27	8,7	1,42
Baraj dolu temel ankastre	5,17	1,03	5,29	1,04
Baraj boş temel eğilebilir	-4,64	-4,94	-4,59	-6,45

Bayraktar (1991)’deki modelin 99’uncu düğüm noktası, yeni modelin 3’üncü düğüm noktasına denk gelmektedir. İki modelde düğüm numarası farklı ama aynı elemanın en köşede seçilen 3’üncü düğüm noktasının yatay ve düşey doğrularındaki statik yerdeğiştirmeleri incelenmiştir. Üç farklı durumu içeren bu modelin statik sonuçları Tablo 5’te karşılaştırılmıştır. Tablo 5’e bakıldığında hesaplanan statik yerdeğiştirmeler, Bayraktar (1991)’de verilen sonuçlarına benzerlik göstermektedir. Ancak ortaya çıkan fark, sonlu eleman ağı üzerinde iyileştirmeler yapıldığından, dört düğüm noktalı sonlu eleman yerine

sekiz düğüm noktalı sonlu eleman kullanılmasından ve sayısal Gauss integrasyonu mertebelerinin farklı seçilmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür.



a) Problemin sonlu eleman ağı (Bayraktar 1991)



b) FORTRAN 90 programıyla çizilen sonlu eleman ağı

Şekil 12. Sarıyar beton ağırlık barajı-zemin probleminin sonlu eleman ağı

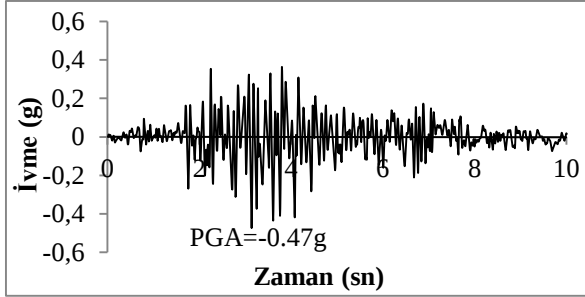
Dinamik analiz

Hazırlanan FORTRAN 90 programının dinamik analizindeki sonuçları doğrulamak için üç farklı örnek üzerinde inceleme yapılmıştır. Örnekler alt başlıklarda sunulmuştur.

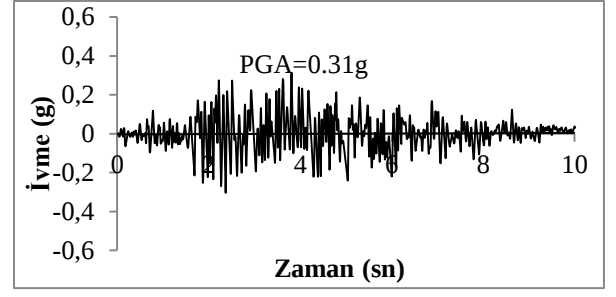
Koyna barajın dinamik analizi

Bir çok araştırmacının inceleme konusu olan bu barajın deprem yüklerine karşı dinamik analizi, 1967 Koyna depreminin yatay bileşeni ekisi altında modların birleştirme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (Chopra and Chakrabarti 1971; Chopra and Chakrabarti 1973). Bu incelemelerde kullanılan Koyna depreminin yatay ve düşey bileşeni Şekil 13a'da verilmiştir. Çözülen örnekte baraj gövdesine %5 viskoz sönümü verilerek ilk beş modu dikkate alınıp kret noktasındaki zamanla değişen deplasmanları hesaplanmıştır. İlgili problemin boyutu, sonlu eleman ağı, malzeme özellikleri vs. bilgiler Chopra and Chakrabarti

(1971) ve Chopra and Chakrabarti (1973) verilmiştir. Bu problemi çözmek için, FORTRAN 90 programlama dilinde yazılan programında Wilson-Teta (Wilson *et al.* 1972) yöntemini kullanılarak dinamik analizi yapılmıştır.

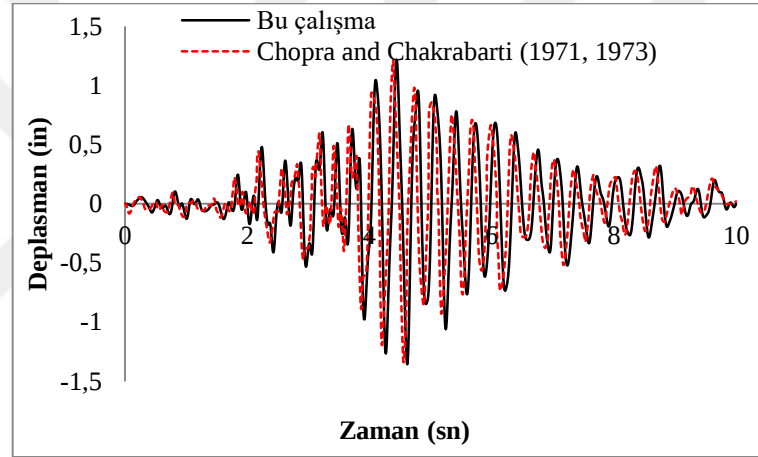


a) Yatay ivme bileşeni

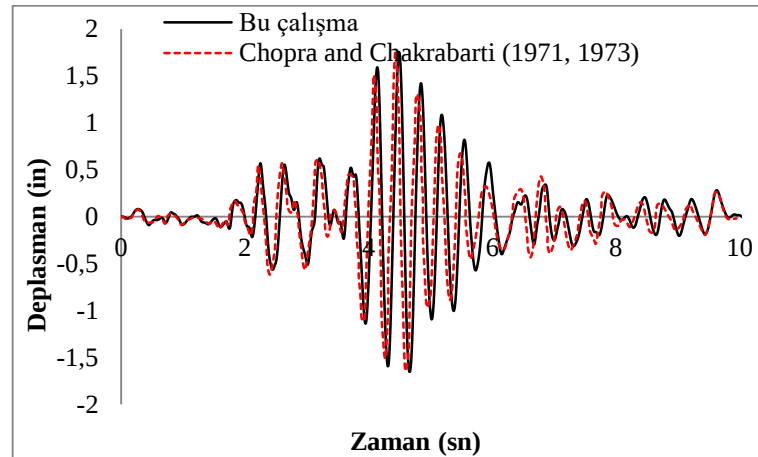


b) Düşey ivme bileşeni

Şekil 13. 1976 Koyna depremin zamanla değişen ivme grafiği



Şekil 14. Koyna barajın kret noktasındaki zamanla değişen karşılaştırmalı yatay deplasman grafiği



Şekil 15. Koyna baraj-rezervuar etkileşim probleminin karşılaştırmalı kret yatay deplasmanları

Dinamik analizde baraj gövdesinin ilk beş modu dikkate alınmıştır. Gövdenin hareket denklemi, doğal modları sayısında ayrıştırılarak modal denklemler (Denklem 34), Wilson-

Teta yöntemiyle çözülmüştür. Dinamik analizi sonucunda, kret noktasındaki yatay yer değiştirmelerin grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 14'e bakıldığında, FORTRAN 90 programıyla hesaplanan kret noktasındaki yatay deplasman grafikleri Chopra and Chakrabarti (1971) ve Chopra and Chakrabarti (1973)'te verilen sonuçlara benzer davranış sergilediği görülmüştür.

Koyna barajı-rezervuar etkileşim probleminin dinamik analizi

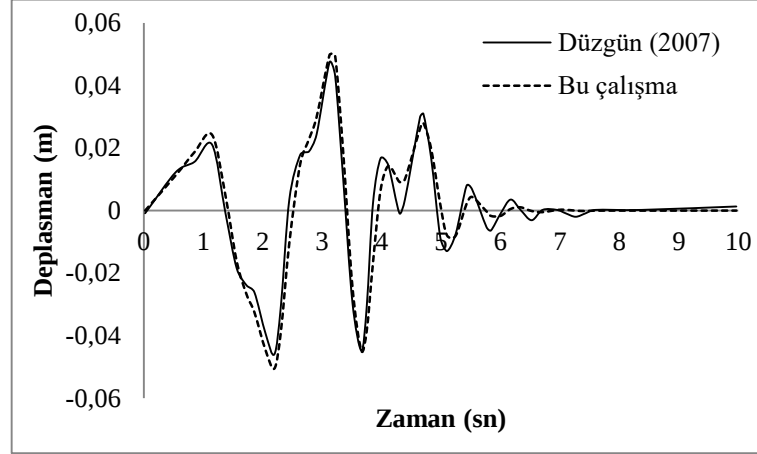
Koyna barajı-rezervuar etkileşim probleminin sismik analizi Chopra and Chakrabarti (1971) ve Chopra and Chakrabarti (1973)'te gerçekleştirilmiştir. 1967 Koyna depremin yatay bileşeni, barajın rijit zemin bölgesine serbest alan hareketi olarak uygulanmıştır. Sisteme %5 viskoz sönüm oranı verilmiştir. Dinamik analizi sonucunda, kret noktasındaki zamanla değişen deplasman grafiği çizilmiştir. Chopra and Chakrabarti (1971) ve Chopra and Chakrabarti (1973)'te rezervuar bölgesi Euler yaklaşımıyla modellenmiştir. Mod birleştirme yöntemiyle tepkileri hesaplanmıştır. İlgili problemin boyutu, sonlu eleman ağı, malzeme özellikleri vs. bilgiler Chopra and Chakrabarti (1971) ve Chopra and Chakrabarti (1973)'te verilmiştir.

FORTTRAN 90 programıyla gerçekleştirilen analizde, baraj-rezervuar sistemine %5 sönüm oranı verilerek ilk 21 modun etkisi dahil edilmiştir. Kret noktasında meydana gelen deplasman grafiği, Şekil 15'te verilmiştir. Şekil 15'e bakıldığında FORTRAN 90 programıyla elde edilen sonuçların Chopra and Chakrabarti (1971) ve Chopra and Chakrabarti (1973)'te verilen sonuçlarla yakın olduğu görülmüştür.

Yap- zemin etkileşim probleminin dinamik analizi

Zemin-yapı etkileşimi problemi, baraj-rezervuar-zemin etkileşim problemine benzeyen birleşik kompleks problemlerden biridir. Bu iki yönlü etkileşim probleminin dinamik analizi bir çok araştırmacının merak konusunu olmuştur. FORTRAN 90 diliyle yazılan programının kontrolü için, Düzgün (2007)'den zemin-yapı etkileşim problemi seçilerek rastgele yük altındaki zamanla değişen dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu doktora tezinde, yapı ve yapıya yakın zemin bölgesi sekiz düğümlü izoparametrik sonlu elemanlarla modellenirken, sonsuz zemin bölgesi ise yedi düğümlü üç çeşit dalga tipini içeren sonsuz elemanlarla modellenmiştir. Zeminin ve yapının malzeme özellikleri, sisteme etki eden tranziyent dinamik yükü, sonlu ve sonsuz elemanın sayısal integrasyon yöntemiyle hesaplanması, dinamik dalgaların tipi, hızı vs. bilgiler Düzgün (2007)'de mevcuttur. Yazılan programın doğruluğunun kontrolü amaçlandığından yapının sadece tepe noktasındaki zamanla değişen yatay deplasmanları Şekil 16'da karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda

FORTTRAN 90 programıyla elde edilen yapının deplasman davranışı, Düzgün (2007)'de verilen davranışa benzediği görülmüştür.



Şekil 16. Yapının tepe noktasındaki karşılaştırmalı yatay deplasmaları

Sonuç olarak, FORTRAN 90 programlama dilinde yazılan programlar, çeşitli problemin statik ve dinamik analizinde doğru sonuçlar verdiği kanaate varılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, baraj gövdesinin dinamik davranışını önemli ölçüde etkileyen parametreler daha önce, KURAMSAL TEMELLER bölümünde yapılan geniş bir literatür araştırmasıyla tesbit edilip üzerinde halen araştırma yapılması gereksinimi olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla, bu tez çalışmasında ağırlık barajların dinamik analizinde dikkate alınması gerekli olan üç ana konu hakkında inceleme yapılmıştır. 1) gerek rezervuar bölgesi için (baraj-rezervuar etkileşim probleminde), gerek zemin bölgesi için (yapı-zemin etkileşim probleminde) ve gerek ikisi beraber hali için (baraj-rezervuar-zemin etkileşim probleminde), yakın ortamların boyutunun baraj gövdesi davranışı üzerindeki etkisi; 2) betonun zamanla mekanik ve kimyasal nedenlerden dolayı bozulması (yaşlanma kavramı), ve baraj gövdesinin dinamik tepkileri üzerindeki etkisi; 3) bu etkileri dikkate alınarak baraj gövdesinin sismik performansı ve baraj gövdesinde meydana gelebilecek hasarların tesbiti ve seviyesinin incelenmesi yapılmıştır. Bu üç konu, aşağıda ayrı başlıklar altında incelenmiştir. Her bir konunun sonunda elde edilen sonuçlar üzerinde tartışılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar daha önce yayımlanan makalelerde tartışılmıştır (Rasa and Budak 2021; Rasa *et al.* 2022; Rasa *et al.* 2023b; Rasa *et al.* 2023c).

Problemlerin analiz kısmına geçmeden evvel, bu tez çalışmasında hazırlanan sonlu-sonsuz eleman modeli, özet bir şekilde burada açıklanmıştır. Bu sayısal modelde, baraj gövdesi ve yakın kaya zemin ortamı, 8 düğümlü izo-parametrik sonlu elemanlarla ayrıklaştırılmıştır. Yakın rezervuar ortamı, suyun sıkıştırılabilirlik ve serbest yüzey etkilerini içermektedir. Bu ortam 9 düğümlü Lagrange sıvı elemanlarla ayrıklaştırılmıştır. Suyun çalkalanma davranışını simüle eden serbest yüzey bölgesi, 1 boyutlu 3 düğümlü eleman tarafından ayrıklaştırılmıştır. Uzak kaya zemin bölgesi yedi düğümlü üç çeşit dalga tipini içeren sonsuz elemanlarla ayrıklaştırılmıştır. Uzak rezervuar bölgesi ise aynı sonsuz eleman modeli su ortamı için modifiye edilerek kullanılmıştır. Burada bahsedilen elemanların şekil fonksiyonları ve diğer bilgileri önceki bölümlerde verilmiştir. Her bir bölge için (baraj, rezervuar ve temel) dinamik hareket denklemi enerji prensibiyle elde edilmiştir. Daha sonra, ortamlar arasındaki arayüzeylerde kısa ve yeteri kadar rijit kafes elemanlar kullanılarak sistemin birleşik hareket denklemi türetilmiştir. Baraj, yakın rezervuar ve yakın zemin ortamlarındaki sonlu elemanların yayılı kütle matrisi, 3x3 Gauss sayısal entegrasyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Baraj ve yakın zemin ortamındaki elemanların rijitlik matrisi 3x3

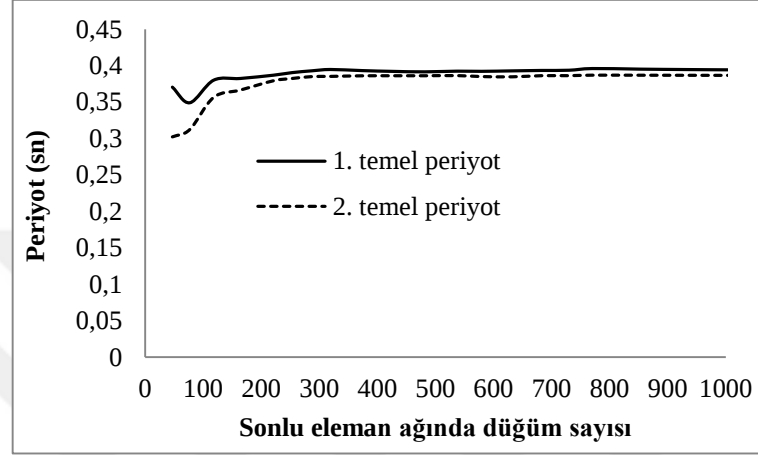
Gauss sayısal entegrasyon yöntemiyle hesaplanırken, yakın rezervuar ortamındaki sonlu elemanların rijitlik matrisi ise Wilson and Khalvati (1983) tarafından önerilen 2x2 indirgenmiş Gauss entegrasyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Uzak rezervuar ortamındaki sonsuz elemanların kütle ve rijitlik matrisleri, Newton-Cotes sayısal entegrasyon yöntemi (Bettess and Zienkiewicz 1977) kullanılarak hesaplanmıştır. Zaman tanım alanında elde edilen sistemin birleşik hareket denklemi Laplace uzayına dönüştürülmüştür. Daha sonra, direkt yöntemle karmaşık katsayılı deplasmanlar elde edilmiştir. Laplace uzayında hesaplanan karmaşık katsayılı deplasmanlar, Durbin yöntemiyle zaman tanım alana dönüştürülmüştür (Durbin 1974). Direkt yöntemde, sistemin sönümlenme mekanizması frekanstan bağımsız (histeretik sönümlenme) veya frekansa bağlı (Rayleigh sönümlenme) parametre olarak kabul edilebilir. Bu tez çalışmasında sönümlenme parametresinin genellikle histeretik olduğu varsayılmıştır.

Tablo 6. BRE ($\alpha=4$) problemine ait ilk iki modal periyodu farklı sonlu eleman ağıyla

4 H modeli	Sistem 1. Temel periyod	Sistem 2. Temel periyod	Sonlu eleman düğüm sayısı
1	0,3706	0,3023	47
2	0,3492	0,3124	77
3	0,3801	0,3565	118
4	0,3825	0,3666	164
5	0,3870	0,3794	221
6	0,3905	0,3825	253
7	0,3930	0,3851	287
8	0,3948	0,3854	319
9	0,3933	0,3862	373
10	0,3922	0,3863	427
11	0,3916	0,3863	481
12	0,3925	0,3865	537
13	0,3923	0,3852	579
14	0,3929	0,3848	632
15	0,3935	0,3864	683
16	0,3938	0,3864	730
17	0,3961	0,3871	770
18	0,3953	0,3870	852
19	0,3947	0,3869	934
20	0,3943	0,3868	1016

Sisteme ait sonlu eleman ağının uygun olup olmamasına karar verebilmek için, sistemdeki elemanların boyutunu değiştirilerek bir çok ağ şemaları hazırlanıp, her bir ağa ait doğal frekanslarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu olayı daha açık bir şekilde açıklamak için, bir sonraki başlıkta verilen örnek problem (baraj-rezervuar etkileşim problemi) ele alınarak sisteme ait ilk iki temel periyodu ve bunlara ilişkin sonlu eleman düğüm sayısı Tablo

6'da verilmiştir. Ayrıca, bu tablodaki veriler Şekil 17'de çizilmiştir. Şekil 17 ve Tablo 6'ya göre, sistemin sonlu elemanlar ağında 253 veya daha fazla düğüm varsa sistemin temel periyotları çok fazla değişmediği görülmüştür. Dolayısıyla, sistemin sonlu eleman ağının uygun olabilmesi için toplam düğüm sayısı 253 veya üstünde olması gerekmektedir. Böylece, birleşik sistemin uygun sonlu eleman ağı elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında çözülen örneklerin sonlu eleman ağlarının uygun bir şekilde elde edilişi, çeşitli sayıda sonlu eleman ağlarıyla doğal frekanslarının değerlendirilmesiyle yapılmıştır.



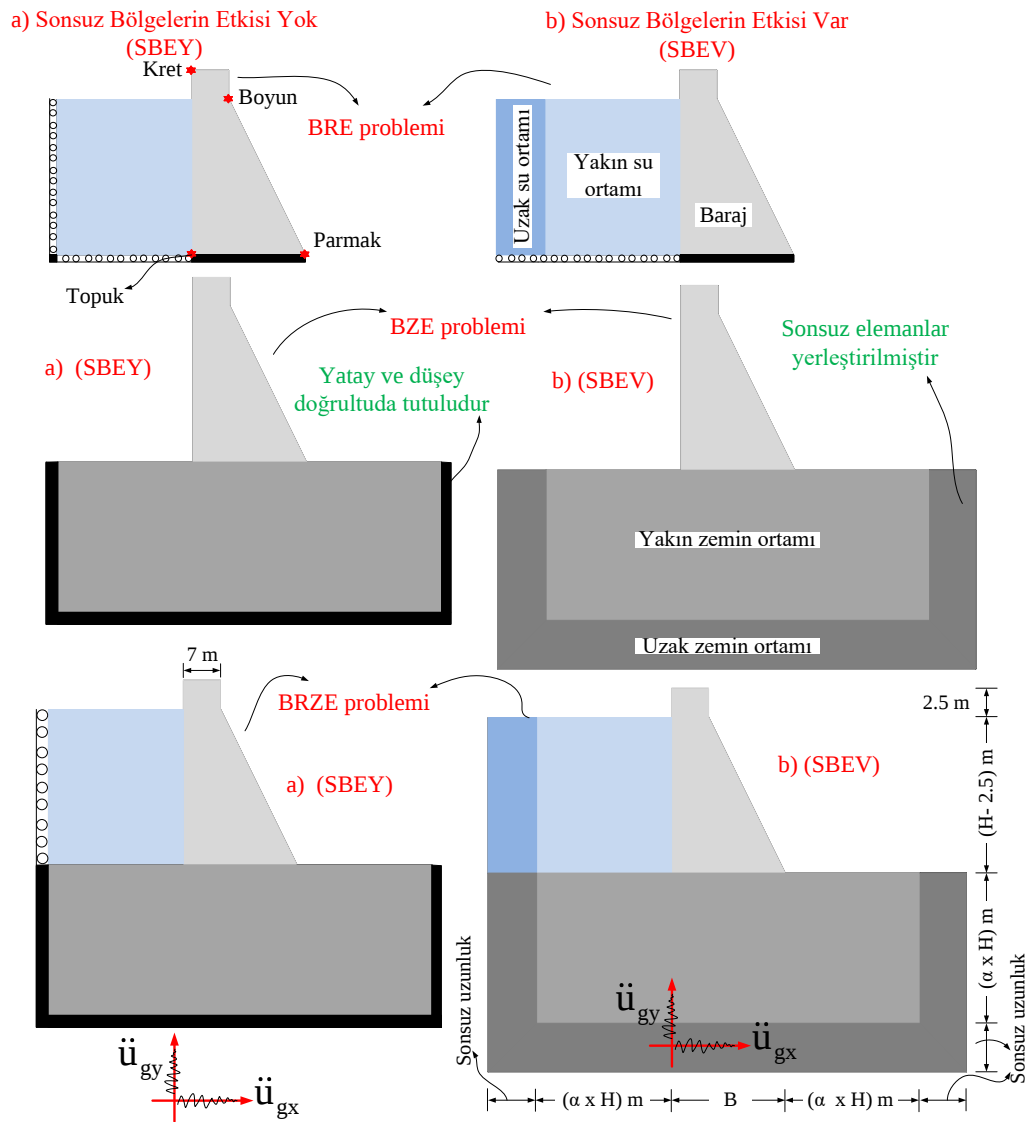
Şekil 17. BRE ($\alpha=4$) problemine ait ilk iki modal periyodu farklı sonlu eleman ağıyla

Yakın Ortamların Boyutunun Barajın Dinamik Tepkileri Üzerindeki Etkisi

Bunun için birbirlerin farklı üç çeşit problem üzerinde inceleme yapılmıştır. Her bir problem, Baraj-Rezervuar Etkileşim (BRE), Baraj-Zemin Etkileşim (BZE) ve Baraj-Rezervuar-Zemin Etkileşim (BRZE) problemi şeklinde adlandırılmıştır. Bu problemleri analiz edilerek, bu tez çalışmasında geliştirilen sayısal modelin performansı (analiz hızı) da değerlendirilmiştir. Ayrıca, yakın ortamların boyutunun BRE, BZE ve BRZE problemlerinin dinamik tepkileri üzerindeki etkisi iki farklı sınır koşulları dikkate alınarak ek değerlendirme yapılmıştır. Bu iki durum; 1) Sonsuz Bölgelerin Etkisi Yok (SBEY), ve 2) Sonsuz Bölgelerin Etkisi Var (SBEV) durumları şeklinde isimlendirilmiştir. SBEY durumunda, kaya zemin bölgesinin uzak sınırları dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla, sınırlar yatay (x) ve düşey (y) doğrultuda tutulmuştur. Ancak, su bölgesinde sadece yatay doğrultusu tutulmuştur (düşey doğrultu serbesttir). SBEV durumunda ise, kaya zemin bölgesinin uzak sınırları dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, uzak sınırlarda yukarıdaki bölümlerde anlatılan üç dalga tipini içeren sonsuz elemanlar yerleştirilmiştir. Bu paragrafta anlatılan durumlar Şekil 18'de kısaca açıklanmıştır. Şekil 18'de gösterilen problemlerde, yakın zemin ortamının uzunluğu barajın memba ve mansap tarafında, ve derinliği, baraj yüksekliğinin 1H'den 15H'a kadar değiştirilmiştir. Burada H, barajın yüksekliğini göstermektedir. Aynı şekilde yakın rezervuar

ortamının uzunluğu, baraj yüksekliği $1H$ 'den $15H$ 'a kadar değiştirilmiştir. 1'den 15'e kadar bu yakın ortamların çarpanları α olarak gösterilmiştir. Zemin bölgesi homojen kaya ortamı olarak ele alınmıştır. Problemlere ait ölçüler ve malzeme özellikleri sırasıyla Şekil 18'de ve Tablo 7'de verilmiştir.

Baraj-rezervuar ve kaya zemin-rezervuar arasındaki dinamik etkileşimi sağlamak için arayüzlerde etkileşim elemanları kullanılmıştır (Akkas *et al.* 1979). Bu etkileşim elemanların uzunluğu ve rijitliği sırasıyla $0,001$ m ve 2×10^{14} MPa olduğu varsayılmıştır. Sistemin sönümü histeretik olup %10 olarak kabul edilmiştir. Bu sönüm faktörü, birkaç barajda deneysel olarak ölçülen %5 viskoz sönümlmeye eşdeğerdir (Chopra 2020). Sonsuz elemanlarda deplasman azaltma parametresi (α) 4,08 olarak seçilmiştir (Bettess and Bettess 1984).



Şekil 18. Beton ağırlık barajı, sadece rezervuar, sadece zemin ve rezervuar + zemin ortamlarıyla etkileşim durumları; a) uzak ortamların etkisi dahil edilmemiştir; b) uzak ortamların etkisi dahil edilmiştir

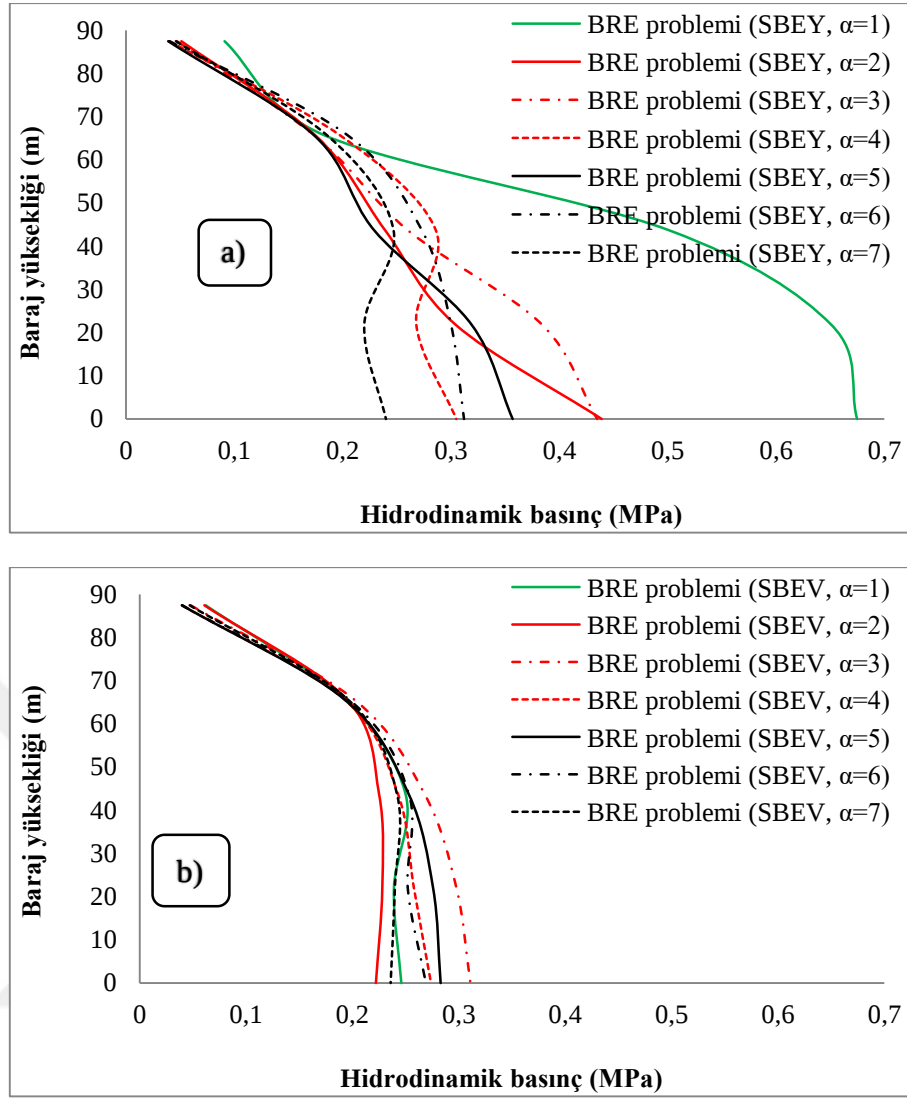
Şekil 13'te gösterilen Koyna depreminin yatay ivme bileşeni modellerin tabanına ivme olarak uygulanmıştır. Laplace uzayında, Laplace parametresi (m) 10 olarak seçilmiştir. Laplace dönüşümündeki α parametresi, $\alpha T=6$ ifadesiyle hesaplanmıştır (Durbin 1974). Bu ifadede T, deprem ivmesinin toplam zamanıdır. Koyna depreminin toplam zamanı 10,24 saniye olup zaman adımı ise 0,01 saniyedir. Her bir dinamik analizde toplam 1024 adım vardır. Rezervuar ortamındaki kısıtlama parametresi, suyun hacimsel elastisite modülünün 100 katı olduğu varsayılmıştır (Wilson and Khalvati 1983). Kaya zemin ortamındaki basınç (P), kayma (S) ve Rayleigh (R) dalgalarının hızı sırasıyla 2300, 950 ve 450 m/sn olarak seçilmiştir. Su ortamında basınç dalgaların hızı ise 2100 m/sn olarak seçilmiştir. Sistemlerin dinamik analizde kullanılan akış şeması Şekil 9'da gösterilmiştir.

Tablo 7. Modellere ait malzeme özelliği ve boyutları

Parametreler	Beton barajı	Su	Kaya zemin	B (m)	H (m)	α
Elastisite modülü (MPa)	30000	2070	30000			
Poisson oranı	0,15	-	0,2	68,25	90	1-15
Birim ağırlığı (kg/m ³)	2446,48	1000	2500			

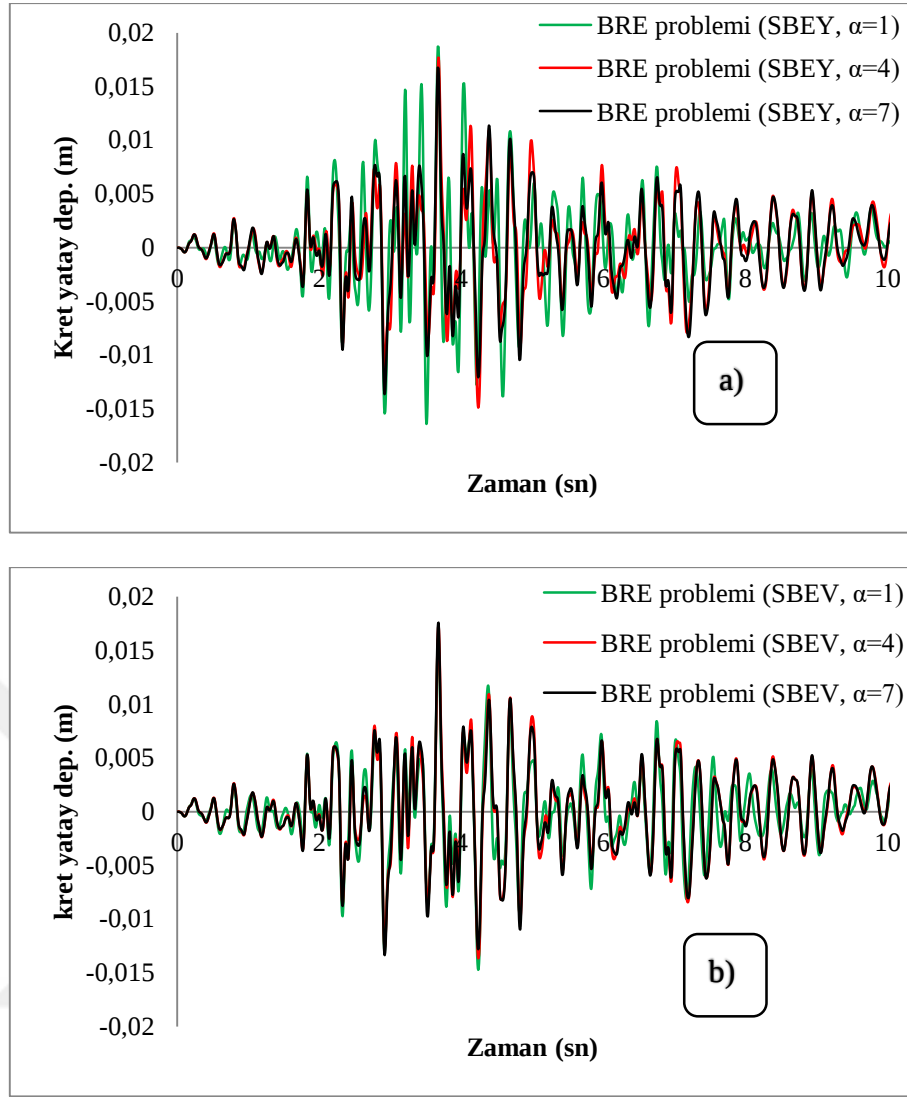
BRE problemi

BRE probleminin dinamik analizinde, yakın rezervuar bölgesinin uzunluğu 1H'ten - 7 H'e kadar değişmektedir, burada H barajın yüksekliğidir. Önceden belirtildiği üzere, uzak rezervuar sınırları iki farklı durumda modellenmiştir; (i) x-yönünde kısıtlanmış (SBEY) durumu ve (ii) sonsuz sıvı elemanlarla ayrıklaştırılmış (SBEV) durumu. Bu problemde zemin rijit olduğu varsayılmıştır (Şekil 18). Farklı rezervuar uzunluğu olan baraj gövdesinin memba yüzündeki mulak maksimum hidrodinamik basınçların dağılımı Şekil 19'da karşılaştırılmıştır. Bu şekle bakıldığında, hidrodinamik basınçlar rezervuar uzunluğunun arttırılmasıyla genel olarak artış göstermektedir. Ancak, belli bir uzunluktan sonra, tepkilerin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, Şekil 19a'da gösterilen hidrodinamik basınç dağılımı, Şekil 19b'de gösterilen tepkiden önemli ölçüde büyük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, uzak sınırları tutulmuş rezervuar bölgesindeki hidrodinamik dalgalarının ortam içerisinde sürekli yansımasındandır. Dolayısıyla, tepkinin davranışı daha büyük ve makul olmadığı ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan, Şekil 19b'de gösterilen tepki daha makul olduğu ve farklı rezervuar uzunluğundan meydana gelen tepkiler arasındaki farkın Şekil 19a'da verilen tepkilerden daha küçük olduğu görülmüştür. Sonuçlar ayrıca, uzak rezervuar bölgesinin yansıyan dalgaları absorbe etme kapasitesiyle, baraj topuğundaki hidrodinamik basınçları önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ayrıca, uzak rezervuar sınırları kısıtlandığında hidrodinamik basınçlar rezonans frekansında sonsuza yaklaşacağı bilinen bir davranıştır. Bunun için, uzak sınırların tutulması çok doğru bir varsayım değildir.

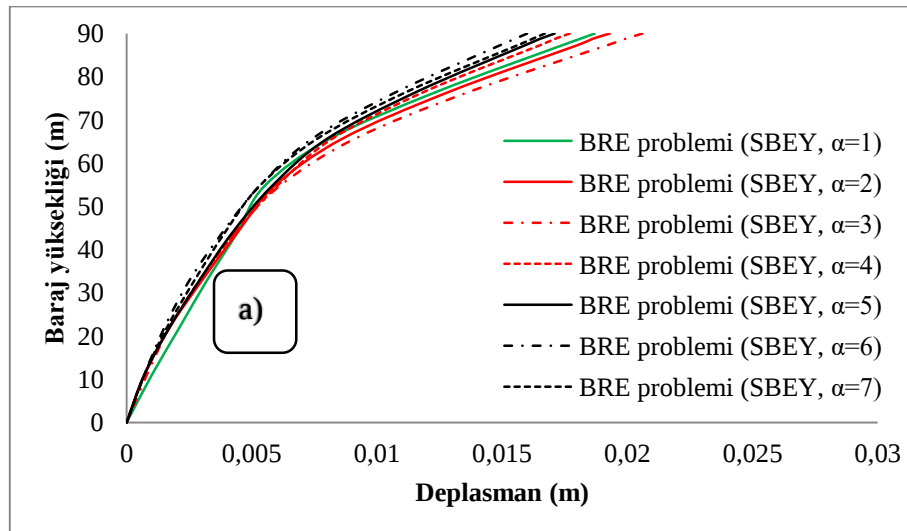


Şekil 19. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj memba yüzeyindeki hidrodinamik basınçların dağılımı üzerine etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi

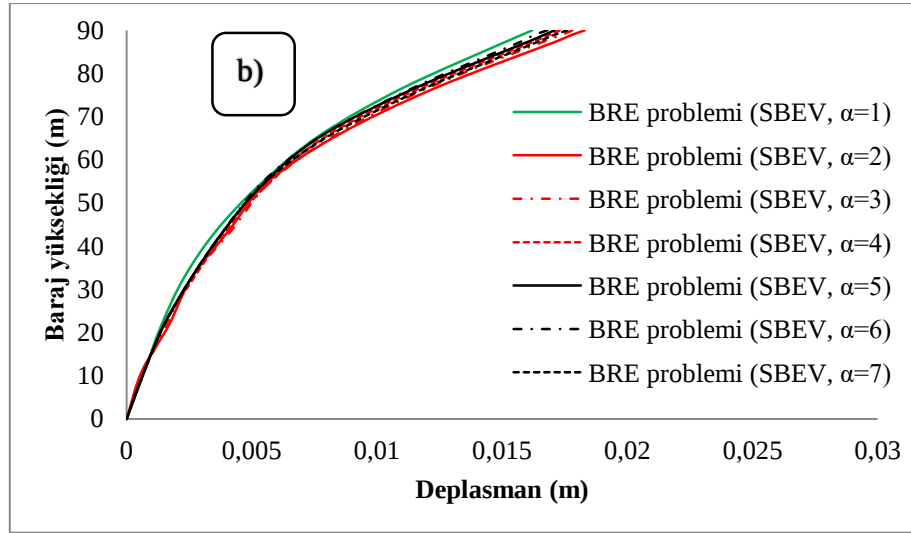
Ayrıca, uzak rezervuar sınırlarının enerjiyi emilmesi her zaman en küçük hidrodinamik tepkisiyle sonuçlanır. Örneğin, (SBEY, $\alpha = 1$) ve (SBEV, $\alpha = 1$) durumları için baraj topuğundaki mutlak maksimum hidrodinamik basıncın değerleri sırasıyla 0,675 ve 0,246 MPa olduğu hesaplanmıştır. (SBEY, $\alpha = 1$) duruma göre tepkiler arasındaki azalma yaklaşık olarak %63 olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla, uzak sınırların etkisini dahil etmemek büyük hidrodinamik tepkileri ve uzak sınırların etkisini dahil etmek düşük hidrodinamik tepkileri sebep olur. Barajın kret noktasında meydana gelen yatay deplasman-zaman grafiği, rezervuar uzunluğu 1H, 4H ve 7H durumları için Şekil 20’de verilmiştir. Şekil 20’ye göre, bu uç rezervuar uzunluğundan elde edilen deplasman tepkileri farklı olduğu görülmüştür. Ayrıca, SBEY durumundaki tepkiler, SBEV durumundaki tepkilerden daha büyük olduğu ve aralarında da farkların daha bariz olduğu görülmüştür.



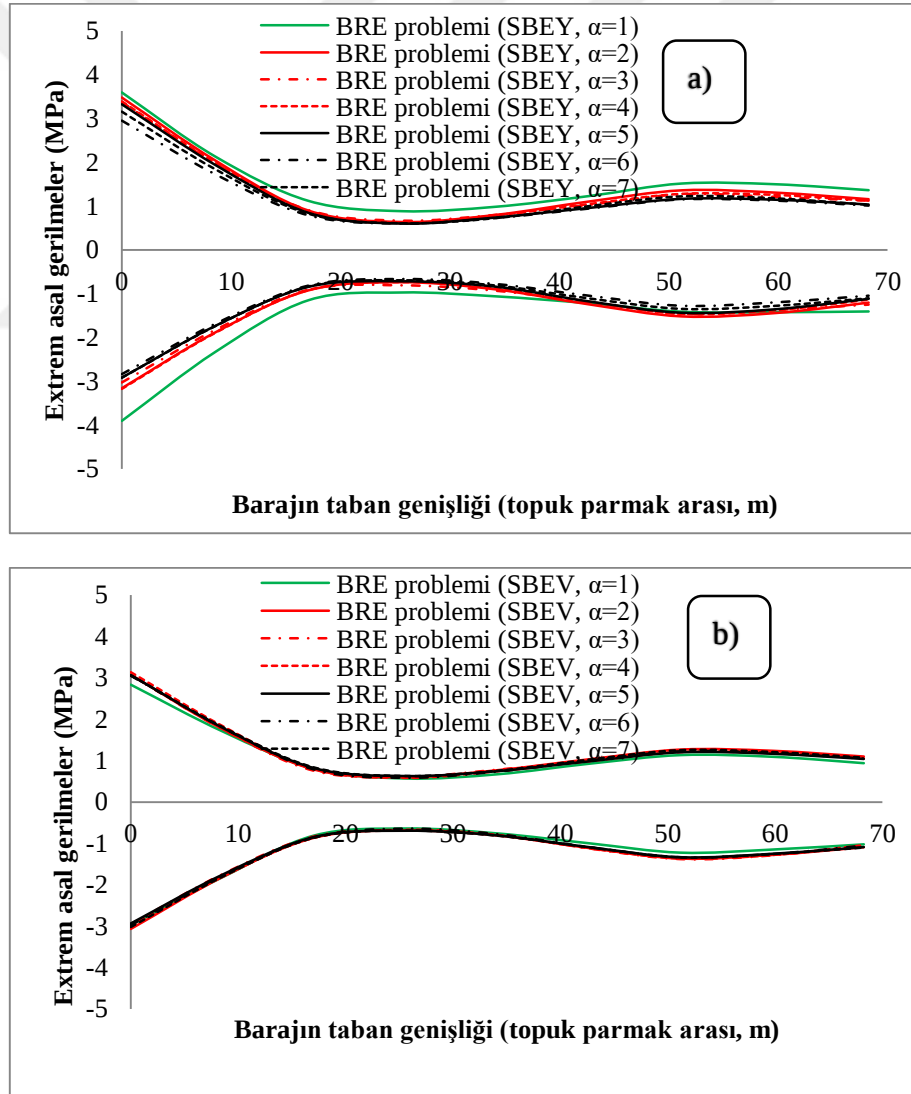
Şekil 20. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj kret noktasındaki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi



Şekil 21. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj memba yüzeyindeki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi



Şekil 21. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj memba yüzeyindeki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi (devamı)

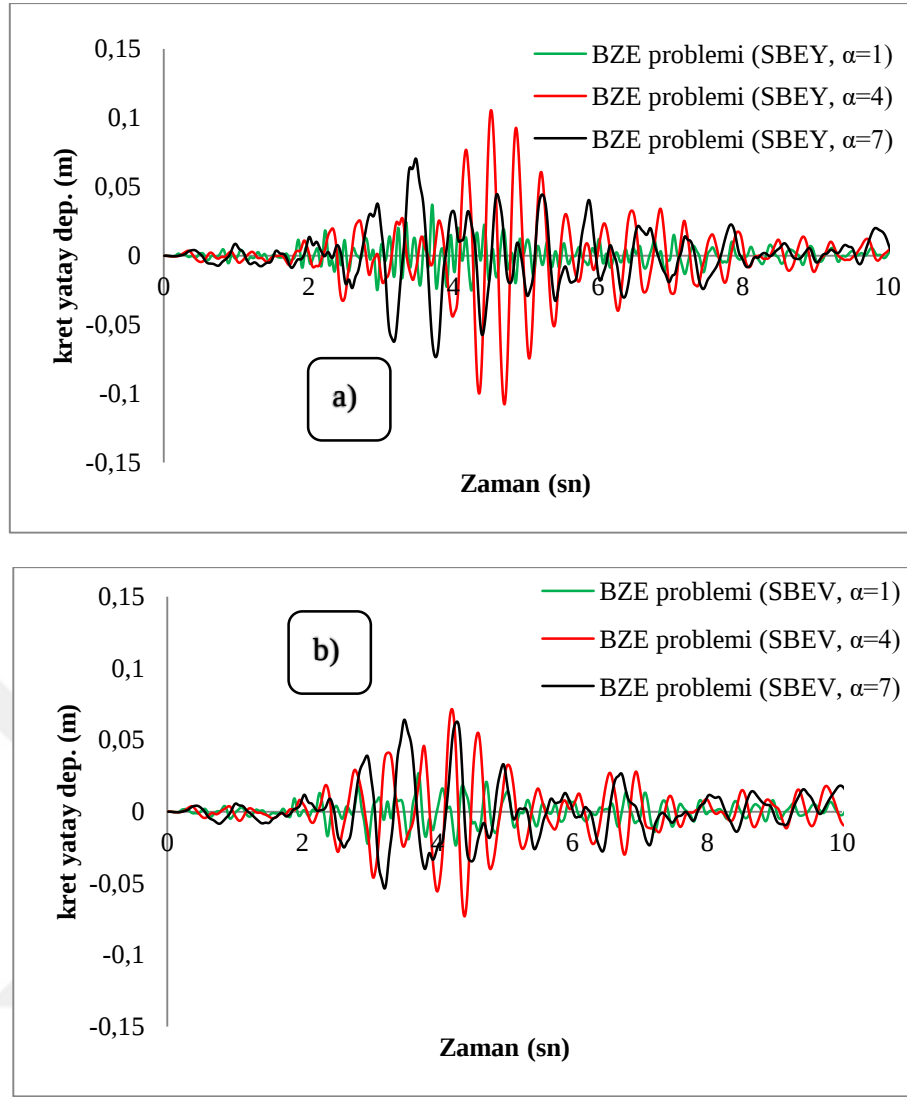


Şekil 22. BRE probleminde yakın rezervuar bölgesinin uzunluğunun baraj tabanında meydana gelen basınç ve çekme gerilmelerine etkisi, a) sadece sonlu rezervuar bölgesi, b) sonlu + sonsuz rezervuar bölgesi

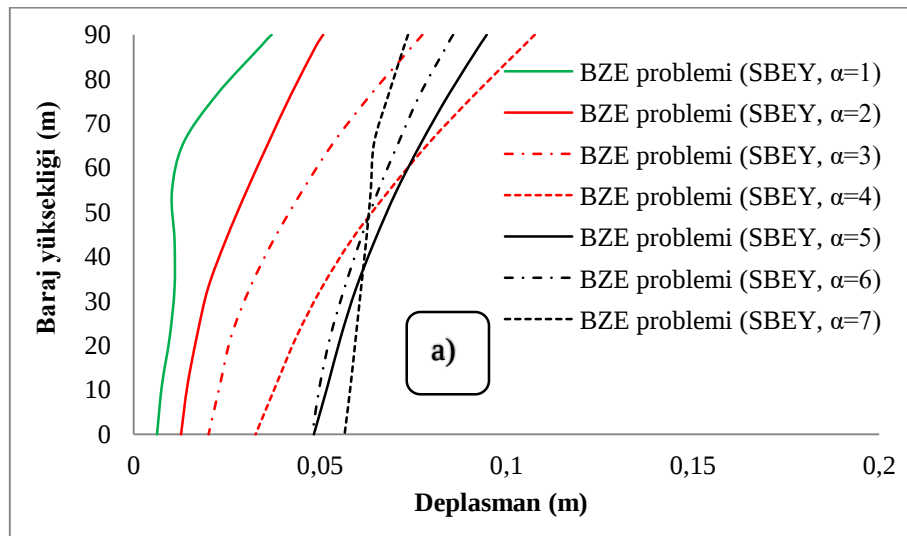
Benzer şekilde, barajın memba yüzeyindeki mutlak maksimum yatay deplasman tepkileri farklı rezervuar uzunlukları için Şekil 21’de karşılaştırılmıştır. Bu şekle göre, hesaplanan deplasmanlar belli bir yakın rezervuar ortamın uzunluğunun artırılmasıyla artış gösterilmiştir. Örneğin, (SBEV, $\alpha = 1$) ve (SBEV, $\alpha = 3$) durumları için yakın rezervuar ortamındaki artış, mutlak maksimum deplasmanlarda da yaklaşık %9’luk bir farkla 0,0162 m’den 0,0178 m’ye artışa yol açmıştır. Dolayısıyla, yakın rezervuar ortamın uzunluğunun artmasıyla hidrodinamik basınçlar artar ve böylece kret yer değiştirmelerinde artışa yol açmıştır. Bu durumları dikkate alınarak, baraj gövdesinin taban bölgesinde meydana gelen maksimum basınç ve çekme gerilmesi Şekil 22’de karşılaştırılmıştır. Bu şekle göre, gerilme tepkilerini incelenirken de yukarıda bahsedilen davranışın aynısı gözlenmiştir. SBEV durumu için baraj tabanındaki gerilme tepkilerinin tüm rezervuar uzunlukları için hemen hemen birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu durumdaki gerilme tepkileri SBEY durumundan elde edilen tepkilerden daha küçük çıkmıştır. Bu nedenle, uzak rezervuar ortamında kullanılan sonsuz sıvı elemanlarının, dinamik yüklerden doğan yansıyan dalgaları etkili bir şekilde emdiği ve böylece gerçeği temsil edebildiği belirtilmelidir.

BZE problemi

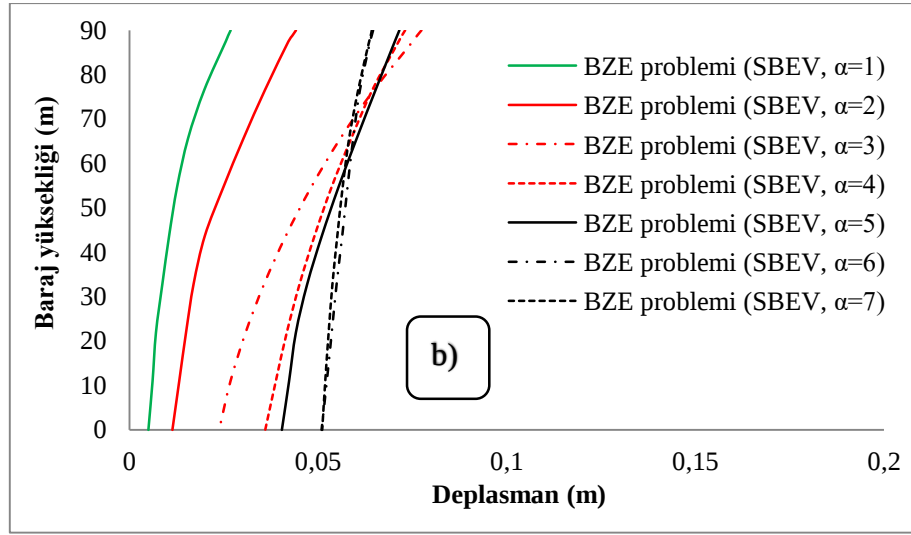
BZE probleminin dinamik tepkileri bu bölümde incelenmiştir. Kaya zemin ortamının uzunluğu ve derinliği, baraj gövdesinin hem memba hem de mansap tarafında 1H’ten-15H’e kadar değiştirilerek her birisi için aynı şartlar altında dinamik analizi yapılmıştır (Şekil 18, ikinci satır). Önceki problemde (BRE problemi) bahsedildiği gibi, bu problemde de iki durum her biri SBEY ve SBEV dikkate alınmıştır. Bu iki durumda, kret noktasındaki yatay yerdeğiştirme-zaman grafiği, $\alpha = 1, 4, 7$ için Şekil 23’te verilmiştir. Bu şekle göre, farklı α değerleri için yer değiştirme tepkilerinin de farklı olduğu görülmüştür. Ayrıca, modeldeki yakın zemin ortamın boyutunun artmasıyla kret yer değiştirmesi de artış göstermiştir. Zemin bölgesindeki yansıyan dalgaların radyasyonunu kullanılan sonsuz elemanlarla sağlandığında, yer değiştirme tepkileri önemli ölçüde azalmıştır (Şekil 23b). Uzak zemin ortamında tutulu sınır koşulları uygulanarak, sınırlı kaya zemin ortamındaki dalgaların yansıması nedeniyle tepkiler artırılmıştır. Baraj gövdesi memba yüzündeki mutlak maksimum yatay yer değiştirme tepkileri Şekil 24’te gösterilmiştir. Karşılaştırmalı tepkiler yalnızca $\alpha = 1$ ’den $\alpha = 7$ ’ya kadar verilmiştir. Şekil 24’e göre, yakın zemin ortamın boyutunun artmasıyla yer değiştirme tepkilerinin her iki koşulda da önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Ancak, tüm α değerleri için SBEV durumundaki tepkiler, sonsuza uzanan zemin ortamındaki yansıyan dalgaları absorbe ettiğinden dolayı küçük çıkmıştır.



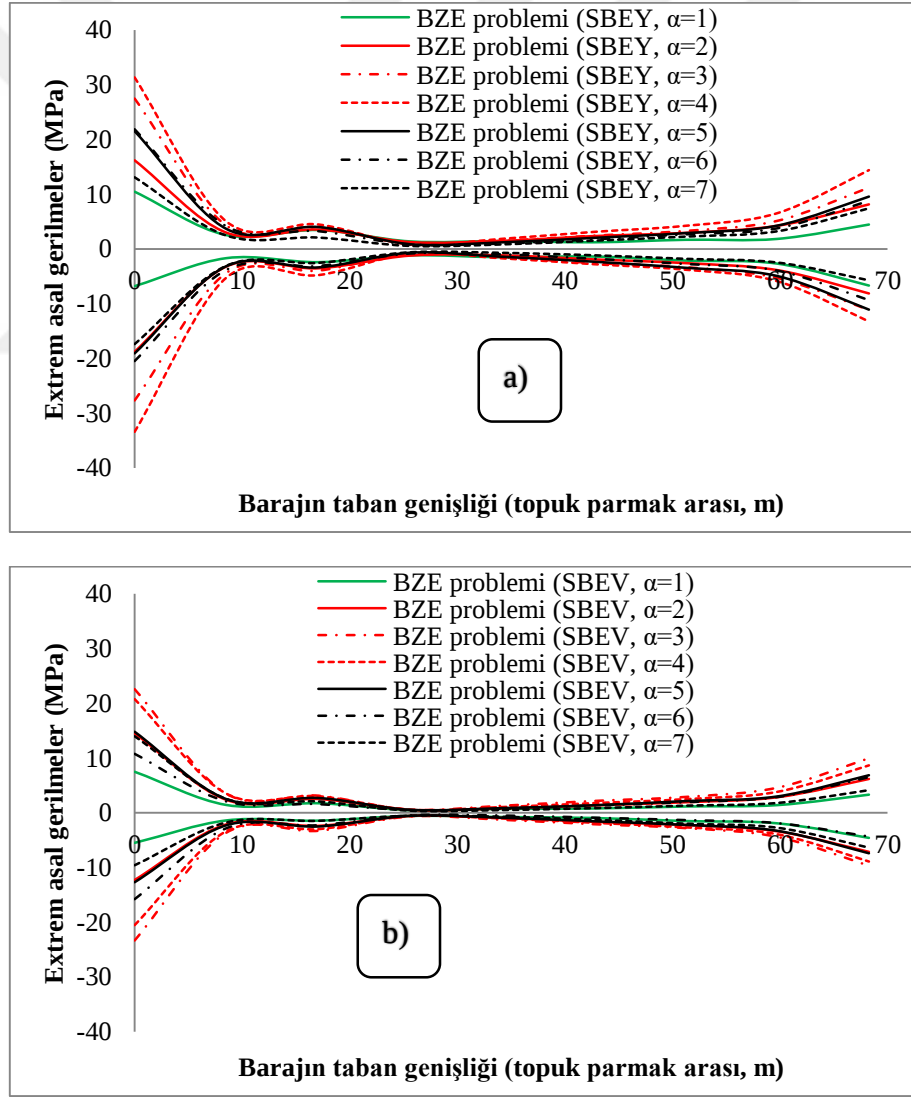
Şekil 23. BZE probleminde yakın zemin ortamının boyutunun baraj kret noktasındaki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu zemin ortamı, b) sonlu + sonsuz zemin ortamı



Şekil 24. BZE probleminde yakın zemin ortamının boyutunun baraj memba yüzeyindeki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu zemin ortamı, b) sonlu + sonsuz zemin ortamı



Şekil 24. BZE probleminde yakın zemin ortamın boyutunun baraj memba yüzeyindeki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu zemin ortamı, b) sonlu + sonsuz zemin ortamı (devamı)

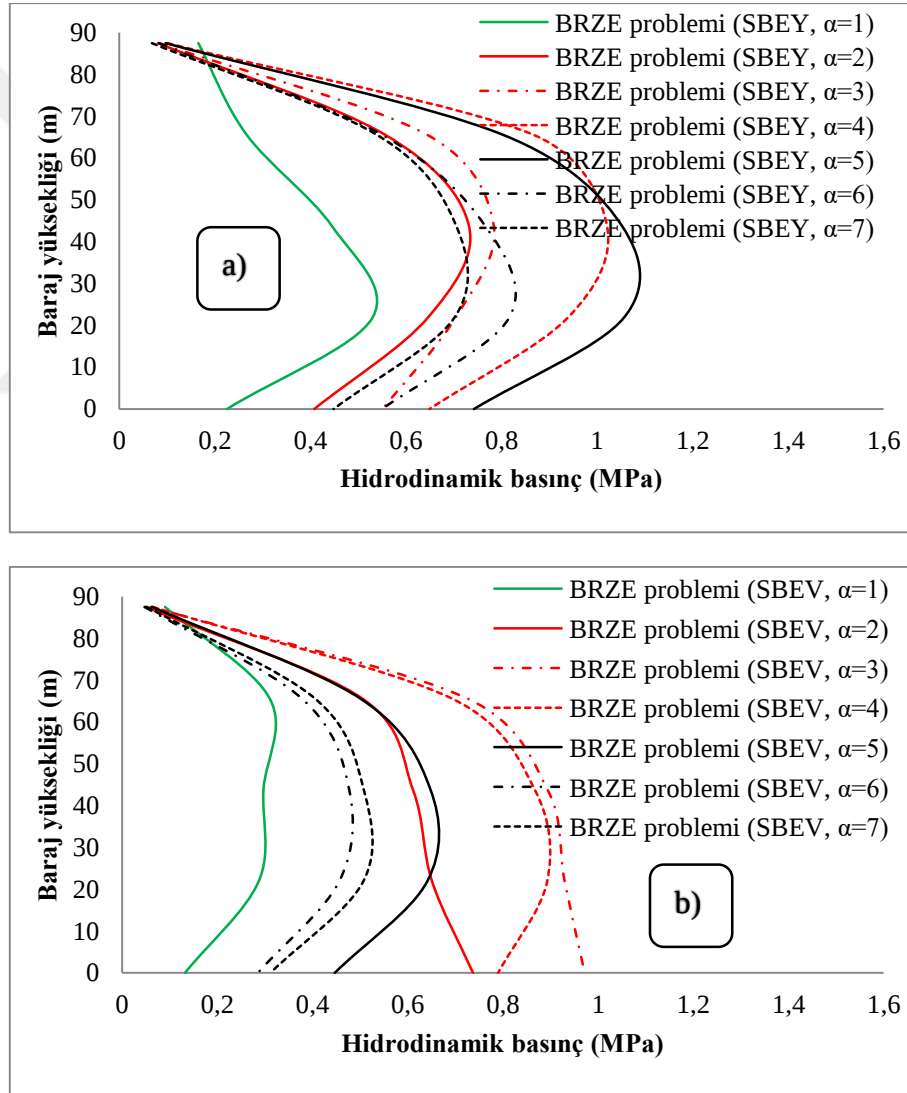


Şekil 25. BZE probleminde yakın zemin ortamın boyutunun baraj tabanında meydana gelen basınç ve çekme gerilmelerine etkisi, a) sadece sonlu zemin ortamı, b) sonlu + sonsuz zemin ortamı

Baraj gövdesi tabanındaki maksimum basınç ve çekme gerilmesi tepkileri Şekil 25'te verilmiştir. Bu şekilde de, her iki duruma ait tepkiler yalnızca $\alpha = 1$ 'den $\alpha = 7$ 'ya kadar verilmiştir. Bu şekle göre, yakın zemin ortamının boyutunun artmasıyla baraj tabanındaki gerilme tepkilerinin de önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. SBEV durumundaki bu davranış, SEBY durumundan çok daha yavaş ve küçük olduğu gözlemlenmiştir.

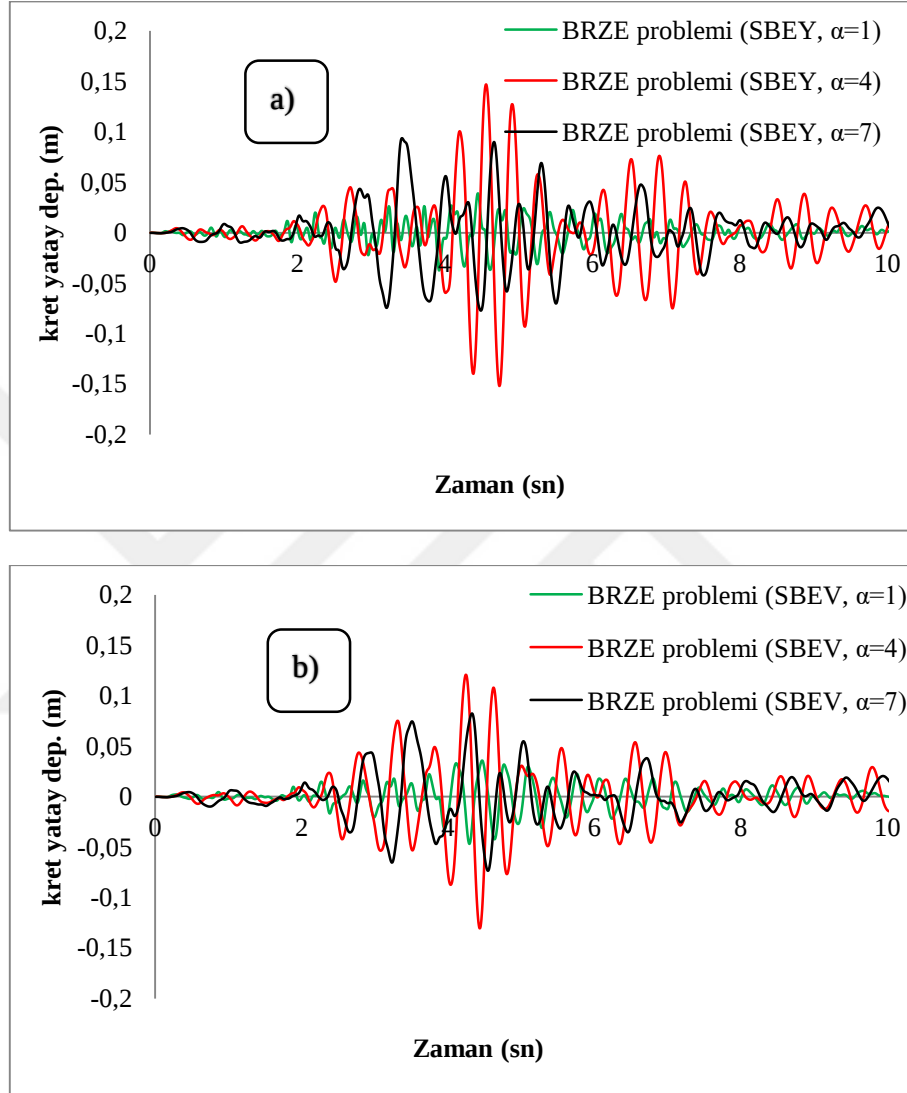
BRZE problemi

BRZE problemine ait dinamik tepkiler bu bölümde incelenmiştir. Yakın rezervuar ortamının uzunluğu ile yakın kaya zemin ortamının memba ve mansap tarafındaki uzunluğu ve derinliği 1H'ten 15H'a kadar değiştirilmiştir (Şekil 18, üçüncü satır). Burada, sadece $\alpha = 1$ 'den $\alpha = 7$ 'e kadar elde edilen tepkiler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 26. BRZE probleminde yakın ortamların boyutunun baraj memba yüzeyindeki hidrodinamik basıncın dağılımına etkisi, a) sadece sonlu yakın ortamları, b) sonlu + sonsuz ortamları

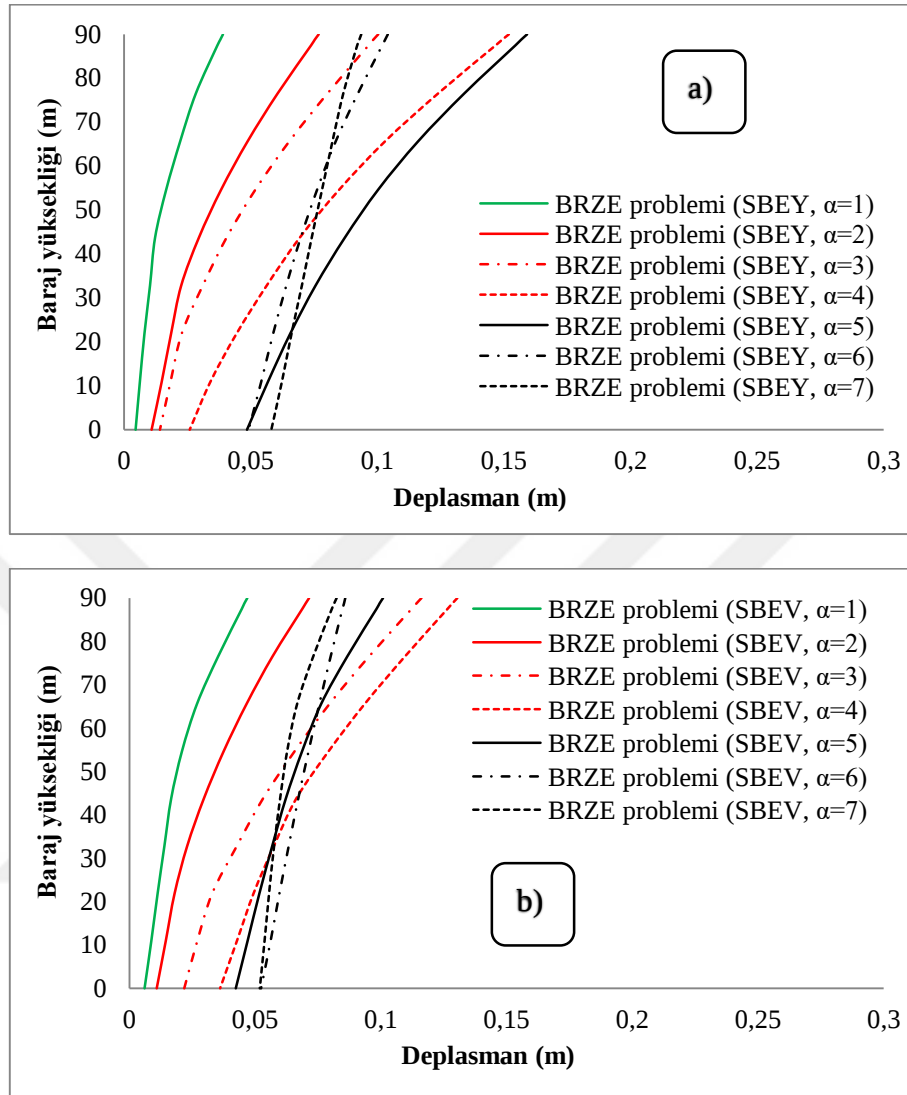
Baraj memba yüzünde meydana gelen hidrodinamik basınçlar SBEY ve SBEV durumları için Şekil 26'da verilmiştir. Bu şekillere göre, yakın ortamların boyutunun artmasıyla baraj yüzündeki hidrodinamik basıncın arttığı görülmüştür. SBEY ve SBEV durumlarında hidrodinamik tepki davranışının farklı olması, uzak ortamların sınırlarına dayatılan farklı sınır koşulları kullanılmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 27. BRZE probleminde yakın ortamların boyutunun baraj kret noktasındaki yatay deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu yakın ortamları, b) sonlu + sonsuz ortamları

Barajın belli bir yüksekliğinde (30 m) SBEV durumunda hesaplanan hidrodinamik basınçlar, baraj aynı yükseklikteki ve SBEY durumuna ait tepkiden önemli ölçüde küçük olduğu görülmüştür. Yani, yansıyan dalgaların sonsuz elemanlar tarafından emildiği; bu nedenle, hidrodinamik basınçların önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, SBEY durumundaki hidrodinamik basınç tepkisi gerçeklikten uzaktır çünkü yansıyan dalgaların kapalı ortamlarda (su ve kaya temel) sürekli yansımaktadır. Bir diğer taraftan, barajın topuk noktasında

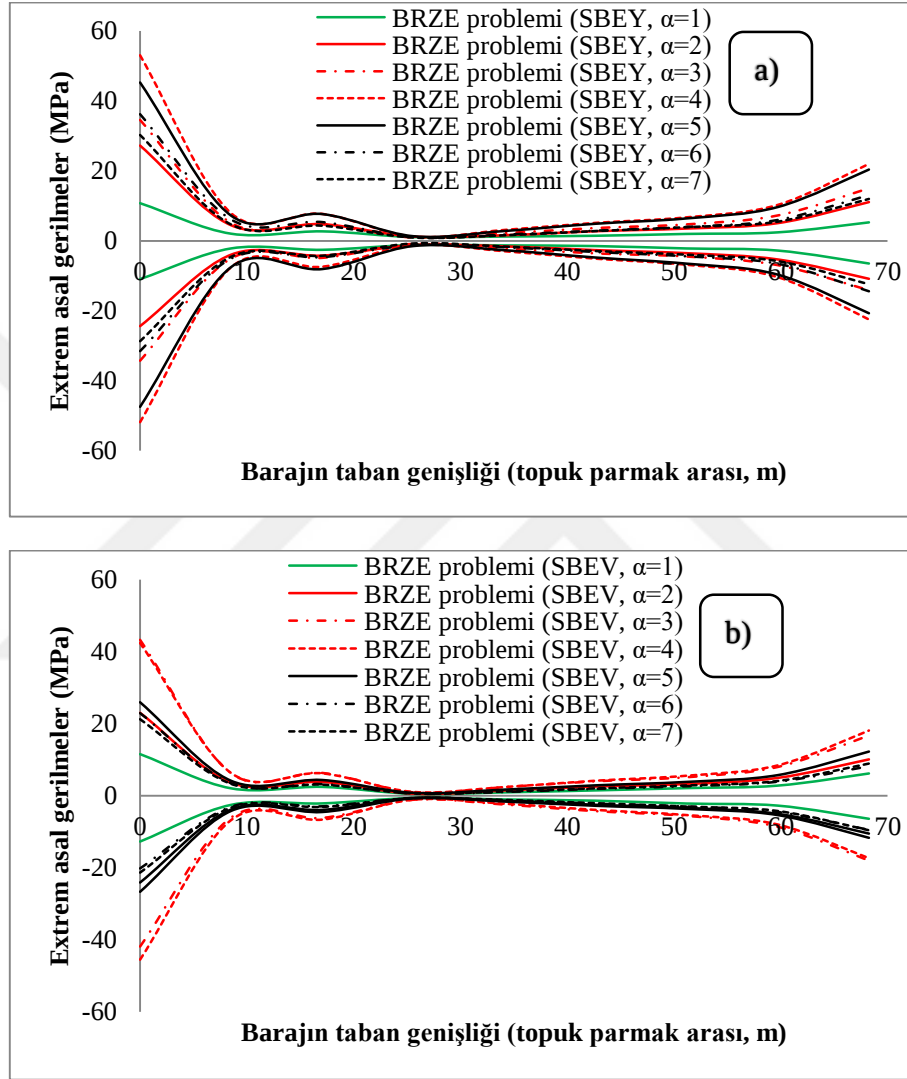
meydana gelen hidrokinamik basınçlar SBEY durumundaki tepkiden önemli miktarda büyük olduğu gözlemlenmiştir; ki, bu durum beklenen bir davranıştır.



Şekil 28. BRZE probleminde yakın ortamların boyutunun baraj memba yüzeyindeki yatya deplasmanlara etkisi, a) sadece sonlu yakın ortamları, b) sonlu + sonsuz ortamları

BRE ve BRZE problemlerinde elde edilen hidrokinamik basınçları karşılaştırıldığında, kaya zemin etkisinin analize dahil edilmesinden dolayı BRZE problemindeki hidrokinamik basıncın daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır; ki, bu da gerçek davranışı ifade etmektedir. Aralarındaki farkı görmek için, baraj topuğunda gelişen hidrokinamik tepkileri ele alınmıştır. Dolayısıyla, (SBEV, $\alpha = 3$) durumu için, BRE ve BRZE problemlerindeki bu tepkiler sırasıyla 0,311 ve 0,972 MPa olarak hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle, kaya zemin ortamının etkisi dahilinde baraj topuğundaki hidrokinamik basınçlar yaklaşık olarak %68 oranında artmıştır. Barajın kret noktası için yer değiştirme zaman grafiği Şekil 27’de yalnızca $\alpha = 1, 4$ ve 7 için karşılaştırılmıştır. Bu şekle göre, yakın ortamların boyutunun artmasıyla genel olarak bu tepkilerin arttığı görülmüştür. Ayrıca, SBEV durumunda hesaplanan tepkiler SBEY

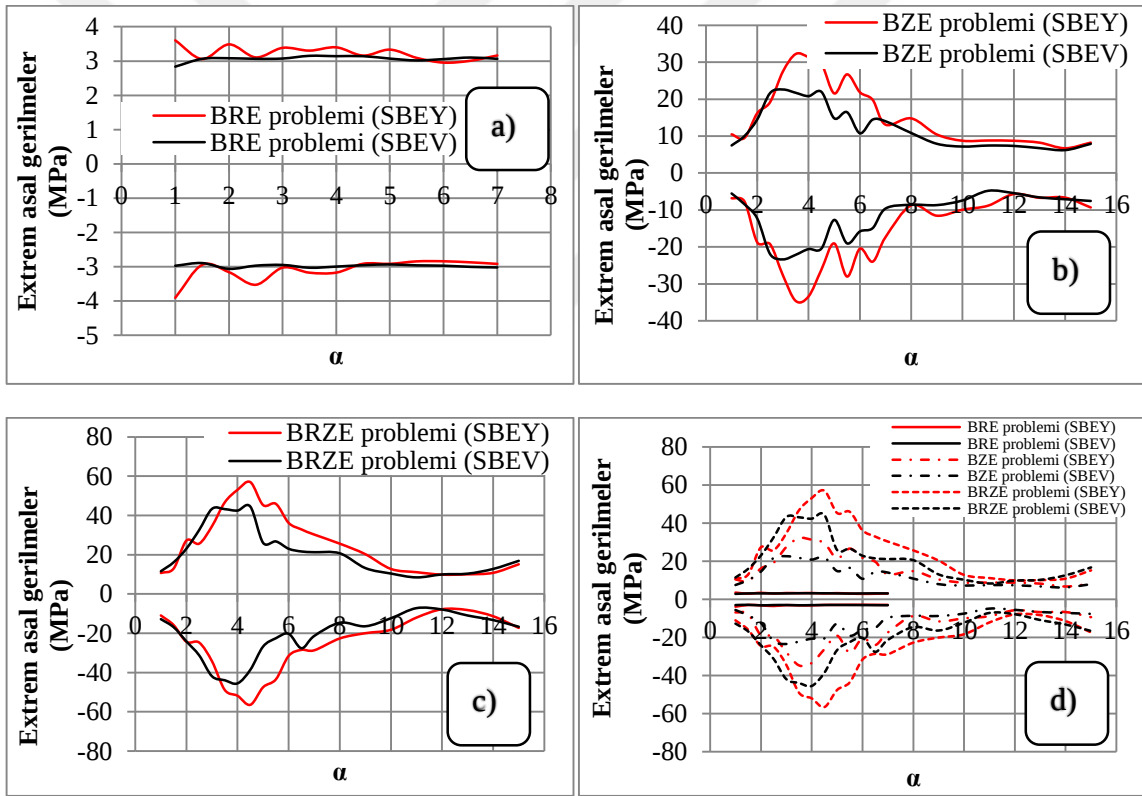
durumunda hesaplanan tepkilerden daha küçük olduğu görülmüştür. Aynı davranış, Şekil 28’de verilen baraj memba yüzündeki mutlak maksimum yatay yer değiştirme tepkilerinde de gözlemlenmiştir. SBEY ve SBEV durumlarında baraj tabanındaki maksimum basınç ve çekme gerilmelerinin dağılımı Şekil 29’da verilmiştir. Bu şekle göre, gerilme tepkileri yakın ortamların boyutunun değişimine göre değişmektedir. Ayrıca, SBEY durumundaki tepkiler, SBEV durumunda elde edilen tepkilerden önemli ölçüde daha büyüktür.



Şekil 29. BRZE probleminde yakın ortamların boyutunun baraj tabanında meydana gelen basınç ve çekme gerilmelerine etkisi, a) sadece sonlu yakın ortamları, b) sonlu + sonsuz ortamları

Baraj gövdesindeki gerilmelerin yoğunlaşması, geniş bir irdelemeye, genellikle barajın topuk noktasında, parmak noktasında ve bazı bölgelerde boyun noktasının altında meydana geldiği öğrenilmiştir. Bu nedenle, SBEY ve SBEV durumlarında $\alpha = 1$ ’den $\alpha = 15$ ’e kadar baraj topuğunda hesaplanan basınç ve çekme gerilme tepkilerinin değişimi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. BRE, BZE ve BRZE problemlerinin ortam boyutu ($\alpha \times H$) gerilme tepkileri ve bunların birbirleriyle karşılaştırmalı grafiği sırasıyla Şekil 30a-d’de

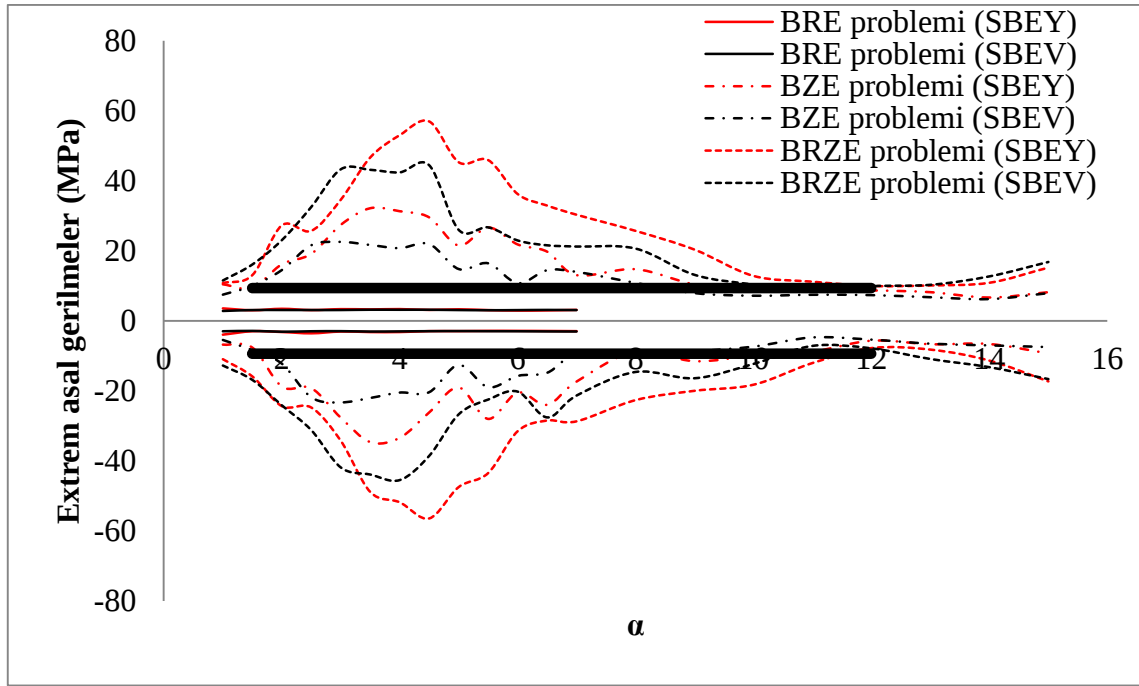
verilmiştir. Şekil 30a'ya göre, SBEY ve SBEV durumlarında yakın rezervuar boyutunun değişimi ile gerilme tepkilerinin değiştiği görülmektedir. Ayrıca, her iki durum için $\alpha = 4.5$ 'ten sonraki tepkilerin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. SBEY durumu için maksimum çekme gerilmesi 3,159 MPa ve SBEV durumu için ise 3,138 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar arasındaki fark, %0,66 olduğu hesaplanmıştır. Aynı değerlendirme BZE ve BRZE problemleri için de yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda, bu iki problem için $\alpha = 12$ 'den sonraki gerilme tepkilerinin hemen hemen aynı olduğu ve değişimlerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. BZE probleminde (SBEY, $\alpha = 12$) ve (SBEV, $\alpha = 12$) durumları için baraj topuğundaki maksimum basınç gerilme tepkilerinin sırasıyla -5,7 ve -5,409 MPa olduğu hesaplanmıştır. Bu tepkiler arasındaki fark %5,1 olarak hesaplanmıştır (Şekil 30b). Aynı değerlendirme $\alpha = 12$ 'de hesaplanan tepkiyi dikkate alınarak BRZE problemi için de yapılmış ve aradaki fark %0,24 olarak hesaplanmıştır (Şekil 30c).



Şekil 30. Farklı etkileşim problemlerinde yakın ortamların boyutunun baraj topuk noktasındaki basınç ve çekme gerilme tepkilerine olan etkisi, a) BRE problemi, b) BZE problemi, c) BRZE problemi, d) hepsi bir arada karşılaştırılması

BRE, BZE ve BRZE problemleri için baraj topuğundaki gerilme tepkileri, Şekil 30d'de karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu şekle göre, BRE probleminin gerilme tepkisi, BRZE problemindeki aynı tepkiden önemli ölçüde küçüktür. Bu nedenle, BRE probleminde rijit temel varsayımı yanlış tepkiler verebilir. Bu durumu daha da açıklığa kavuşturmak için, BRE ve BRZE problemlerinde (SBEV, $\alpha = 4,5$) durumu için barajın

topuğundaki basınç gerilme tepkileri sırasıyla -2,953 ve -38,563 MPa olduğu görülmüştür. BRZE ve BRE problemlerinin bu tepkileri arasındaki fark %92,34 olarak hesaplanmıştır. Rezervuar ortamının baraj topuğundaki gerilme tepkileri üzerinde olan etkisi de oldukça önemli olduğu görülmüştür. Önemi göstermek için, BRZE ve BZE problemlerindeki gerilme tepkileri (SBEV, $\alpha = 4,5$) durumu için değerlendirilmiştir. Baraj topuğundaki çekme gerilmesi BRZE probleminde 44,452 MPa olduğu ve BRE probleminde ise 21,966 MPa olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, rezervuar ortamı, baraj topuğundaki gerilme tepkilerini %50,5 olarak artırmıştır.



Şekil 31. Farklı etkileşim problemlerinde yakın ortamların boyutunun baraj topuk noktasındaki basınç ve çekme gerilme tepkilerine olan etkisi

Şekil 30d'ye göre, BZE ve BRZE problemleri için, yakın ortamlardaki dalgaların radyasyonu sonsuz elemanlar kullanılmadan (sınırlar tutulu olur) sağlanmak isteniyorsa, yakın ortamların boyutunun baraj yüksekliğinin 12 katında alınması gerekmektedir. Yakın ortamların boyutunu baraj yüksekliğinin 12 katında alarak, uzak ortamların sonsuz elemanlarla ayrıklaştırılmasına gerek kalmamaktadır. Çünkü yakın ortamların boyutu, yansıyan dinamik dalgaları emmek için yeterince büyüktür. Böylece kesilen sınırlar, zemin bölgesi için x ve y yönünde ve su bölgesi için yalnızca x yönünde tutulur. Kesilmiş sınırlarda, artık sonsuz elemanlara veya geçirgen sınırlara ihtiyaç yoktur. (SBEY, $\alpha = 12$) ve (SBEV, $\alpha = 12$) durumlarındaki gerilme tepkilerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür. Diğer yandan, bu boyutta sınırların kesilmesi ekonomik değildir çünkü analiz süreci uzun ve zaman alıcı olur. Ayrıca, eğer ki, (SBEY, $\alpha = 12$) veya (SBEV, $\alpha = 12$) durumlarda hesaplanan gerilme seviyesi doğru bir cevap ise, aynı gerilme seviyesi yakın ortamların boyutunun baraj

yüksekliğinin 1,5 katında almakla da hesaplanabilmiştir. Bu durum, baraj topuğundaki çekme ve basınç gerilmeleri için Şekil 31’de şematik (düz ve siyah bir çizgi) olarak açıklanmıştır. Aynı sonuç, basınç gerilme tepkisi için de gözlemlenmiştir.

BRZE probleminde yakın ortamların boyutu, baraj yüksekliğinin üç (Chen *et al.* 2019; Gorai and Maity 2019) ve beş (Asghari *et al.* 2018) katında alınması önerilmiştir. Bu çalışmalarda önerilen bu sonuçlar, tepkilerin maksimum ortalama sonucunu veren yakın ortamların boyutuna dayanmaktadır. Birisinde 3 katında ve diğerinde ise 5 katında en büyük tepkiler elde edilmiştir. Böylece, uygun bir boyut olduğu sonucuna varılmıştır. Halbuki, yakın ortamların boyutunu belirlenmeye yönelik bu değerlendirme çok doğru değildir, ve ayrıca herhangi bir fiziksel yorumu da yoktur. Hesaplanan tepkilerin hem SBEY hem de SBEV durumlarında neredeyse aynı veya sabit kaldığı boyut, yakın ortamların uygun boyutu olarak karar verilebilir. Bu tarz bir değerlendirmenin fiziksel anlamı vardır ve doğal olarak da doğrudur. Çünkü, yakın ortamların boyutu yeteri kadar büyük alındığında, radyasyon sönümlleme olayı otomatik olarak dahil edilmiş olunur. Ayrıca, yakın ortamların boyutunun baraj yüksekliğinin 3 veya 5 katında alındığında, tepkileride önemli miktarda hatalar doğar. Örneğin BRZE probleminde (SBEV, $\alpha = 1,5$) ve (SBEV, $\alpha = 3$) durumları için baraj topuğundaki çekme gerilmesi sırasıyla 16,116 ve 43,307 MPa olarak hesaplanmıştır; ve (SBEV, $\alpha = 1,5$) durumun tepkisine göre hata ise %62,78 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, baraj topuğundaki çekme gerilmesi (SBEV, $\alpha = 1,5$) ve (SBEV, $\alpha = 5$) durumları için sırasıyla 16,116 ve 25,995 MPa olarak hesaplanmıştır; bu seferde hata ise %38 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlendirmeler neticesinde, yakın ortamların boyutunun baraj dinamik tepkileri üzerindeki etkisi oldukça bariz olduğu görülmüştür. Ayrıca, yakın ortamların boyutunun uygun bir şekilde ele alınması doğru tepkileri elde edilmesinde kaçınılmaz bir paramtere olduğu anlaşılmıştır.

Bu tez çalışmasında geliştirilen sonlu eleman modelinin performansını ölçmek için, Küçükarslan (2004b) çalışmasından seçilen bir BRE örneğinin dinamik analizi Latitude E6430 x64 tabanlı bir bilgisayar kullanılarak 150 saniye sürerken, aynı problem Küçükarslan (2004b)’de geliştirilen sayısal modelle 367 saniye sürmüştür. Ancak, bu problemin dinamik analizinde sarf edilen süre, sonlu eleman ağındaki düğüm sayısına, elemanların sayısına, analizdeki toplam zaman adımına ve analiz yöntemine de bağlı olduğu bilinmelidir. BRE probleminin çözümüne ilişkin süreleri karşılaştırıldığında, geliştirilen sayısal modelin birçok modelden daha hızlı olduğu görülmüştür.

Bu parametrik incelemede, BRE, BZE ve BRZE problemlerinde, yakın ortamların boyutunu 1H’tan 15H’a kadar değiştirilerek, dinamik tepkileri üzerinde karşılaştırmalı

inceleme yapılmıştır. Burada H, barajın yüksekliğidir. Ayrıca, yakın ortamların boyutunun bu problemlerin dinamik tepkileri üzerindeki etkisi, uzak ortamları dikkate almakla (sınırlarda sonsuz elemanlar var) ve dikkate almamakla (sınırlar tutuludur) araştırılmış. İnclemenin sonunda, yakın ortamlar için alınması gereken uygun boyut bulunarak önerilmiştir. Bu incelemeyi yapılırken aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- BRE, BZE ve BRZE problemlerin dinamik tepkileri, yakın ortamların boyutunun artmasıyla artar. Bu artış belli bir seviyeye kadar geçerli olup, o seviyeyi geçtikten sonra tepkilerde azalım meydana gelir. Bu artış, SBEY durumunda SBEV durumuna göre dinamik dalgaların kapalı ortamda sürekli yansması nedeniyle daha büyüktür.
- BRE probleminde uzak rezervuar sınırlarının kısıtlanmasıyla (SBEY durumu), hidrodinamik basınç tepkisi daha büyük hesaplandığı ve uzak rezervuar sınırlarında, bu tez çalışmasında modifiye edilen ve önerilen sonsuz sıvı elemanları dahil edildiğinde (SBEV durumu) bu tepki daha küçük hesaplanmıştır. Bu durumlar için baraj topuğundaki tepkiler arasında %63 fark tespit edilmiştir.
- BRE ve BRZE problemlerinin tepkileri incelenirken, kaya zemin ortamı dikkate alınmasıyla hidrodinamik basınçlar daha da artmıştır. Rijit zemin varsayımı (BRE problemi), yanlış hidrodinamik basınç tepkisine yol açmıştır. Bu problemler için baraj topuğundaki hidrodinamik tepkiler arasında %68 fark ortaya çıkmıştır.
- Gerilme tepkileri, yakın ortamların boyutunun değişimine bağlı olarak değişir. Ancak, belirli bir boyuttan sonra, SBEY ve SBEV durumları için bu tepkiler hemen hemen aynı veya sabit düzeyde kaldığı görülmüştür. BRE problemi için bu büyüklük baraj yüksekliğinin 4,5 katında bulunurken, BZE ve BRZE problemleri için bu büyüklük baraj yüksekliğinin 12 katında bulunmuştur. Bu davranış, yakın ortamların boyutu yeterince büyükse, kapalı ortamda yansıyan dalgaların tamamen emilebileceğini ifade eder.
- BRE probleminde, rezervuar ortamın uzunluğu baraj yüksekliğinin 4 katında alınır, uzak rezervuar ortamın sonsuz sıvı elemanlarla ayrıştırılmasına gerek kalmaz. Benzer şekilde, BZE ve BRZE problemlerinde yakın ortamların boyutunun baraj yüksekliğinin 12 katında alınır, yine de uzak ortamların sonsuz elemanlarla ayrıştırılmasına gerek kalmaz.
- (SBEY, $\alpha = 12$) veya (SBEV, $\alpha = 12$) durumlarında, BZE ve BRZE problemleri için baraj topuğunda elde edilen gerilme seviyesinin (SBEV, $\alpha = 1.5$) durumunda elde edilen gerilme seviyesine yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, (SBEV, $\alpha = 1.5$)

durumunda elde edilen tepkiler gerçek tepkilere daha yakın olup, yakın ortamların boyutunun baraj yüksekliğinin 1,5 katında alınması önerilmiştir.

- BZE ve BRZE problemlerinde, yakın ortamların boyutunun baraj yüksekliğinin 3 veya 5 katında alınır (bu boyutlar literatürde önerilmiştir), topuk noktasının gerilme tepkileri hesaplanmasında önemli hatalara yol açar. Bu problemlerdeki hatalar 3 kat ve 5 kat durumu için sırasıyla %62,78 ve %38 olarak görülmüştür.

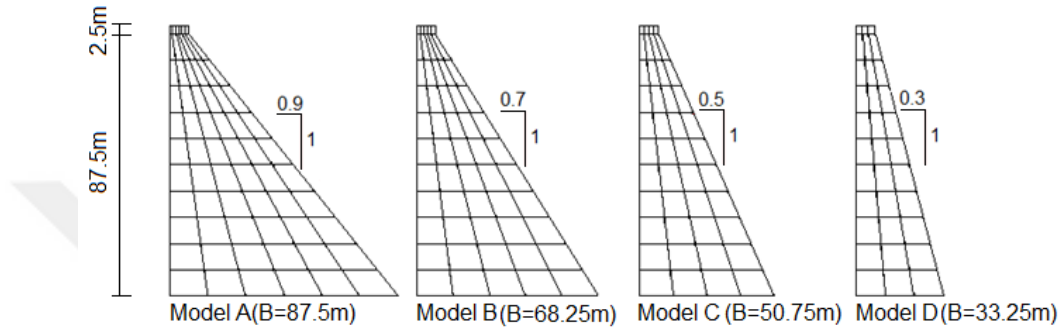
Beton Ağırlık Barajların Yaşlanması ve Dinamik Davranışı Üzerindeki Etkisi

Barajlar genellikle 100 senelik tasarım ömrüyle inşa edilen yapılardır. Bu süre zarfında, çevresel yükler ve baraj yapısının rezervuar suyu ile doğrudan teması nedeniyle beton özelliklerinde bozulmalar meydana gelir. Sonuç olarak, hidro-kemo-mekanik eylemler nedeniyle beton malzemenin mukavemetinde ciddi azalmalar meydana gelir. Mikro çatlaklar oluşturan kalsiyum liçi (Le Bellégo *et al.* 2000) ve alkali-agrega reaksiyonu (AAR) (Grimal *et al.* 2010), ömür boyunca beton malzemesinin özelliklerini bozan ana kimyasal süreçler olabilir. Öte yandan, beton malzemesi 28 gün boyunca tam mukavemetini hızlı kazanır, ancak bu durum ömür boyunca yavaş gelişerek devam eder (Withey 1961; Washa *et al.* 1989; Dolen 2007). Bu nedenle, beton malzemenin yaşa bağlı dayanım kazanımı ve yaşa bağlı dayanım kaybetmesi (bozulması), barajların dinamik analizinde dikkate alınması gereken kaçınılmaz faktörlerdir. Withey (1961), Washa *et al.* (1989) ve Dolen (2007) tarafından yapılan öncü çalışmalar, birçok araştırmacı tarafından betonun bozulma etkisini dikkate almadan beton için yaşa bağlı dayanım kazanımını tanımlayan ampirik denklemler geliştirmişlerdir (Gogoi and Maity 2007; Azizan *et al.* 2017; Gorai and Maity 2021). Washa *et al.* (1989) ve Kuhl *et al.* (2004) tarafından sunulan çalışmalara dayanarak Gogoi and Maity (2007) betonun bozulmuş ve bozulmamış elastik modülü arasındaki ilişki geliştirilmiştir. Daha sonra beton ağırlık baraj-rezervuar ve beton ağırlık baraj-rezervuar-zemin etkileşim problemlerinin dinamik analizinde kullanılan yaşa bağlı bir bozulma indeksi önermişlerdir. Ayrıca, beton barajların yaşlanma etkisinin, barajların uzun süreli ömürleri boyunca güvenlik değerlendirmesinde önemli bir konu olduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada, yaşlanan beton ağırlık baraj-rezervuar etkileşim probleminin yatay ve düşey yer hareketlerinin eşzamanlı etkisi altında dinamik davranışı araştırılmıştır. Betonun yaşlanma modeli önceki bölümlerde verilmiştir. Ayrıca, baraj gövdesinin temel periyoduna göre yaşa bağlı gerilme davranışı da, analize yaşla değişen sediment kalınlığı etkisi dahil olmak üzere incelenmiştir. Birleşik problemin sonlu eleman formülasyonunda, betonun mekanik yükler ve AAR genişmesi nedeniyle yaşlanması ve betonun ömür boyunca dayanım kazandığı faktörler dikkate

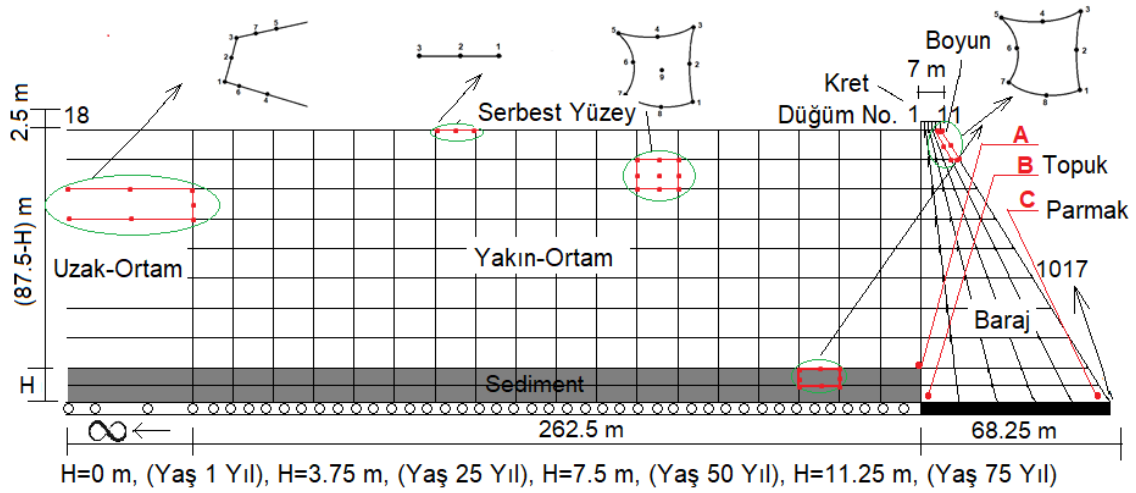
alınmıştır. Dört farklı yaşlanan baraj modelinin dinamik davranışı sekiz farklı yaşta incelenmiştir.

Yaşlanan BRE problemi

Bu bölümde, yaşlanan beton ağırlık barajlarının dinamik tepkilerini araştırmak için Şekil 32’de gösterilen dört farklı beton ağırlık baraj modeli, sayısal örnek olarak ele alınmıştır. Bu incelemede, farklı baraj gövdelerinin seçilmesindeki amaç, farklı ağırlık barajlarının yaşlanma sürecindeki ortak dinamik davranışını da araştırmaktır.



Şekil 32. Farklı mansap eğimine sahip baraj modelleri



Şekil 33. Farklı yaşlarda birleşik sistemin tipik sonlu eleman modeli

Bu baraj modellerinde mansap yüzünün eğimi 0,3 ila 0,9 arasında değişmektedir. Aynı modellerde baraj tabanı genişliği de 33,25 m ile 87,5 m arasında değişmektedir. Ancak kret genişliği ve baraj gövdelerinin yüksekliği sabit kabul edilmiş olup sırasıyla 7 m ve 90 m’dir. Geliştirilen modelde, sediment tabakası etkisi de dahil edilmiştir. Ayrıca, zemin bölgesi rijit kaya ortamı olarak kabul edilmiştir. Baraj-rezervuar-sediment etkileşim probleminin farklı yaşlardaki tipik sonlu-sonsuz eleman ağı Şekil 33’te verilmiştir. Bu birleşik problemlerin dinamik davranışı 1 yaş, 10 yaş, 18 yaş, 25 yaş, 30 yaş, 35 yaş, 50 yaş ve 75 yaş olmak üzere

8 farklı yaşta incelenmiştir. 8 farklı yaştaki bu birleşik sistem için toplam düğüm ve eleman sayısı Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Birleşik sistemlerin sonlu eleman ağındaki toplam düğüm ve eleman sayısı

Yaş (yıl)	Model A rezervuar ile		Model B rezervuar ile		Model C rezervuar ile		Model D rezervuar ile	
	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Eleman sayısı
1	1032	294	997	283	962	272	927	261
10	1169	367	1128	354	1087	341	1046	328
18	1169	367	1128	354	1087	341	1046	328
25	1169	367	1128	354	1087	341	1046	328
30	1169	367	1128	354	1087	341	1046	328
35	1169	367	1128	354	1087	341	1046	328
50	1169	367	1128	354	1087	341	1046	328
75	1055	340	1017	328	979	316	941	304

Baraj-rezervuar ve rezervuar-sediment arasındaki arayüzlerde kullanılan etkileşim elemanlarının uzunluğu ve rijitliği sırasıyla 0,001 m ve 2×10^{14} MPa olarak ele alınmıştır. Bu varsayım, bu alanlar arasındaki dinamik etkileşimi doğru bir şekilde karşılar (Akkas *et al.* 1979). Sistem için farklı yaşlarda histeretik sönüm faktörü, yaşlar boyunca sabit kabul edilmiş ve $\eta = \%10$ olarak seçilmiştir. Bu sönüm faktörü, birkaç barajda deneysel olarak ölçülen $\%5$ viskoz sönümlemeye eşdeğerdir (Chopra 2020). Sonsuz elemanlarda kullanılan deplasman azaltma parametresi 4,08 (Bettess and Bettess 1984) olarak seçilmiştir. Baraj ve rezervuar atlında ana kayaya, Şekil 13’te verilen Koyna depreminin yatay ve düşey ivme zaman tanımları dinamik yük olarak eş zamanlı uygulanmıştır.

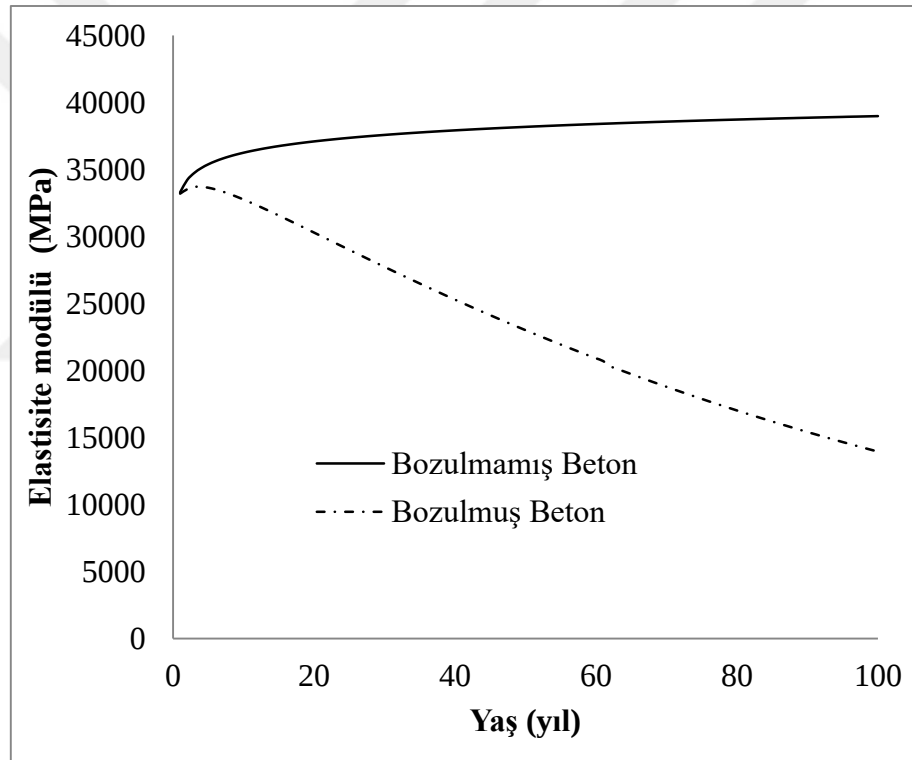
Tablo 9. Sayısal modelin malzeme özellikleri

Parametreler	Beton baraj	Su	Sediment (Akköse and Şimşek 2010)
Elastisite modülü (MPa)	33000	-	252
Hacimsel elastisite modülü (MPa)	-	2070	-
Poisson oranı	0,15	-	0,30
Kütle yoğunluğu (Kg/m ³)	2446,48	1000	2038,74

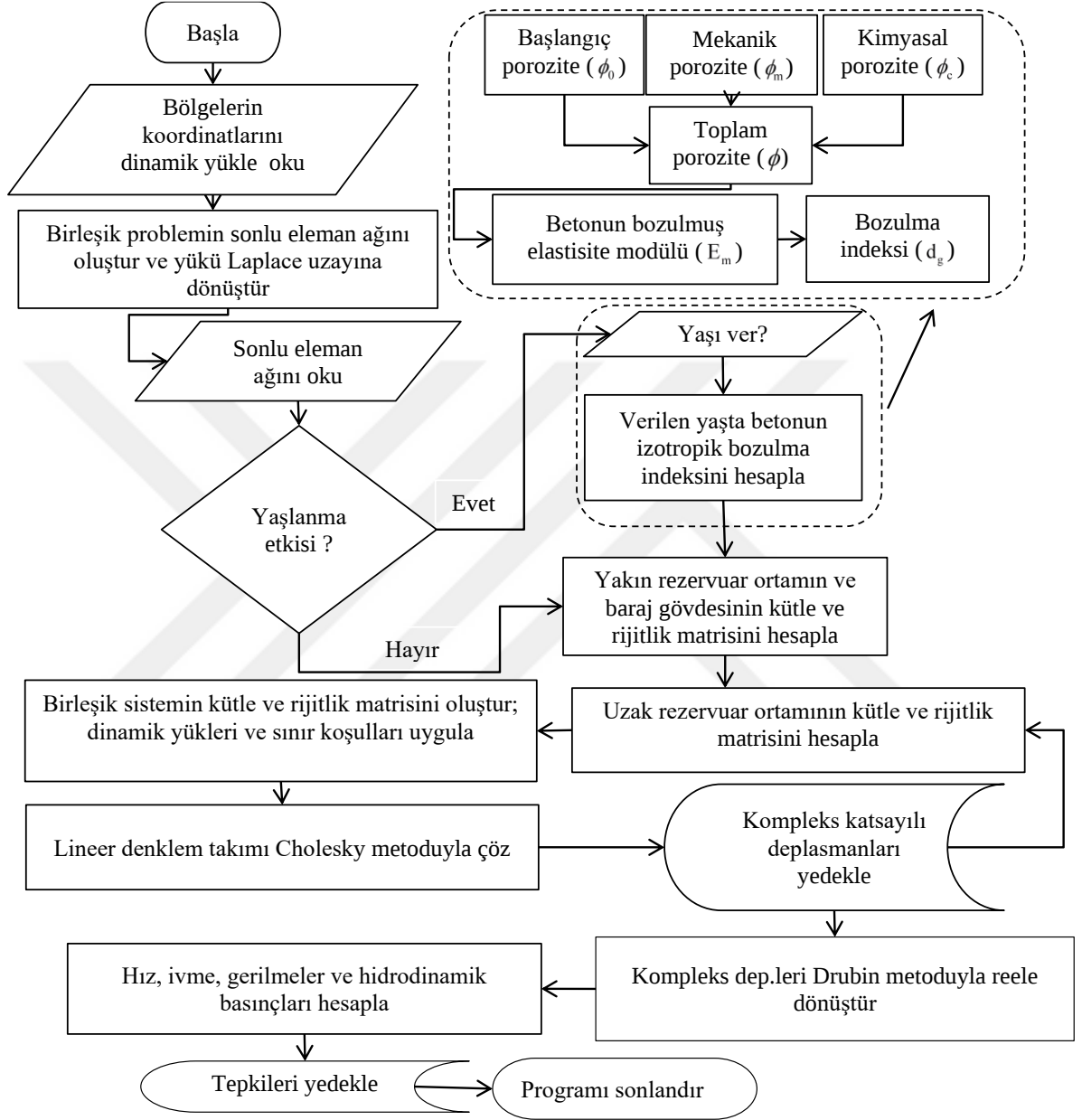
Bu çalışmada sadece uzak alan yer hareketi dikkate alınmıştır. Yani, yer ivmesi sonsuz hızla ve aynı zamanda baraj-rezervuar modelin tabanına ulaşır. Bu tepkileri elde etmek için toplam 32 dinamik analizi yapılmıştır. Laplace parametre sayısı (m) 10 olarak seçilmiştir. Laplace dönüşümünde α parametresi $\alpha T = 6$ olarak alınmıştır (Durbin 1974). Deprem süresi $T = 10,24$ sn olarak seçilmiştir. Analizde zaman adımı 0,01 sn olarak seçilmiştir. Her bir dinamik analizde toplam 1024 adım bulunmaktadır. Rezervuarda su için kısıtlama parametresi, sıvının hacimsel elastisite modülünün 100 katı olduğu varsayılmıştır (Wilson and

Khalvati 1983). Su ortamında basınç dalgaların yayılım hızı 2100 m/sn olarak seçilmiştir (Schumann *et al.* 2014). Bu problemlerde su ve sediment ortamlarının malzeme özellikleri Tablo 9’da verilmiştir (Akköse and Şimşek 2010).

Betonun mekanik özellikleri ve sediment ortamlarının kalınlığı, birleşik modelin yaşına bağlı olarak farklılık gösterir. Baraj yapısının elastik modülü, yaşına bağlı olarak değişmekte olup, önceki başlıkta açıklanan bozulma modeline göre hesaplanmıştır. Bu modele göre, betonun bozulmuş ve bozulmamış elastisite modülleri Şekil 34’te 100 yıl için verilmiştir. Bu model, AAR ve mekanik etkiler nedeniyle beton ağırlık barajlarda betonun bozulmasını tahmin eder. Betonun yaşlanma etkisi de dahil olmak üzere baraj-rezervuar-sediment etkileşimi probleminin dinamik analizi için akış şeması Şekil 35’te verilmiştir.



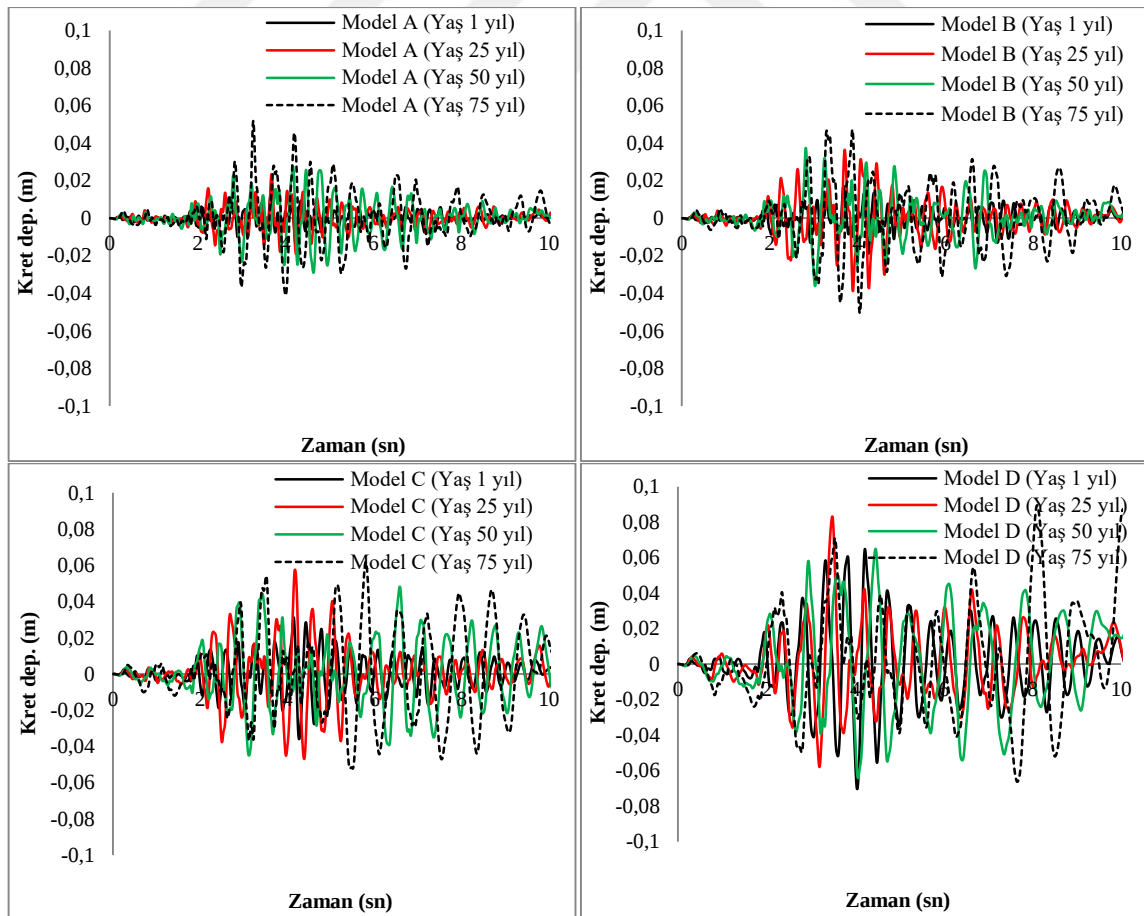
Şekil 34. 100 yıl boyunca beton için elastisite modülünün değişimi



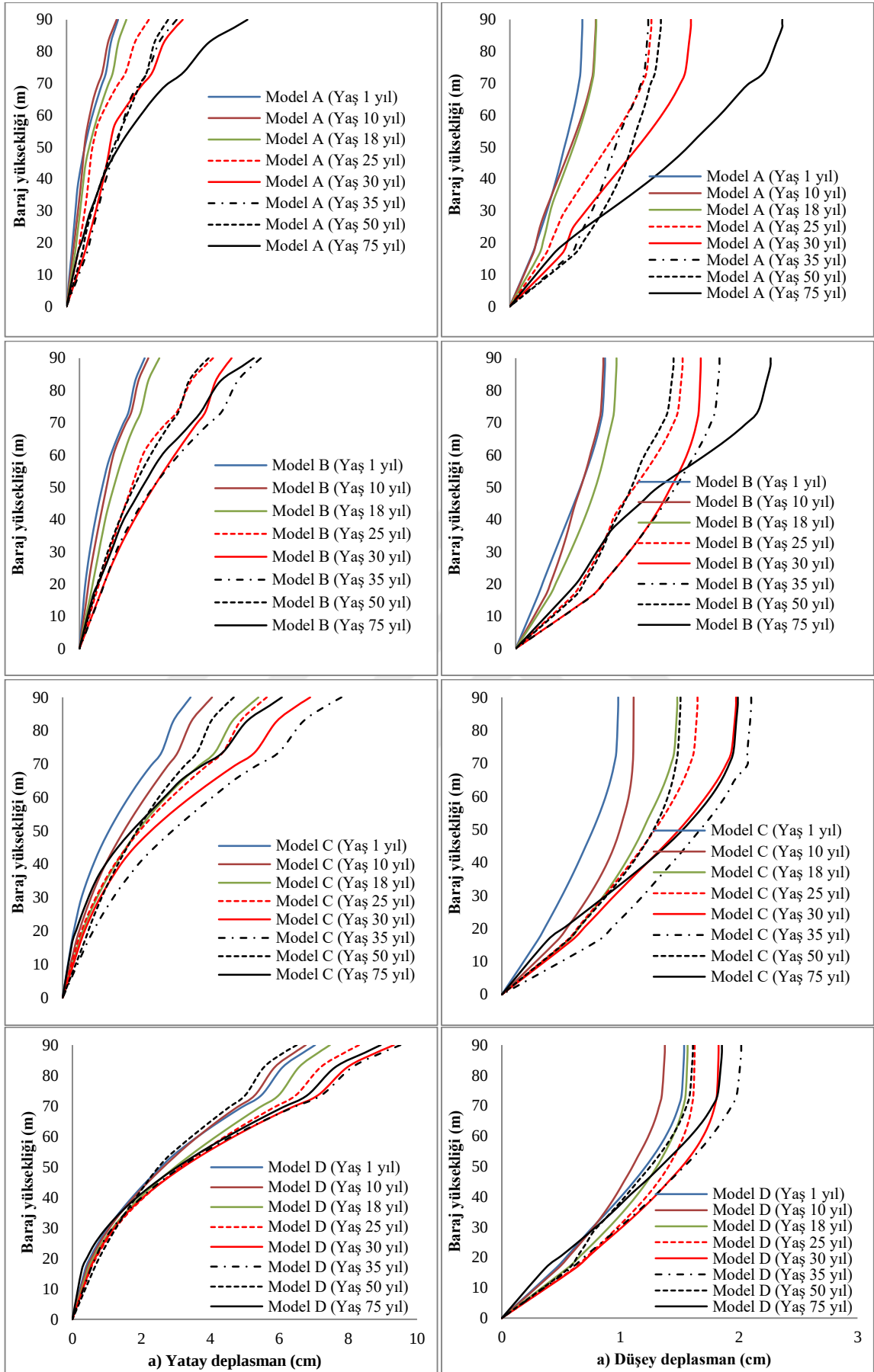
Şekil 35. Birleşik problemlerin dinamik analizdeki akış şeması

Tepkiler üzerinde tartışma

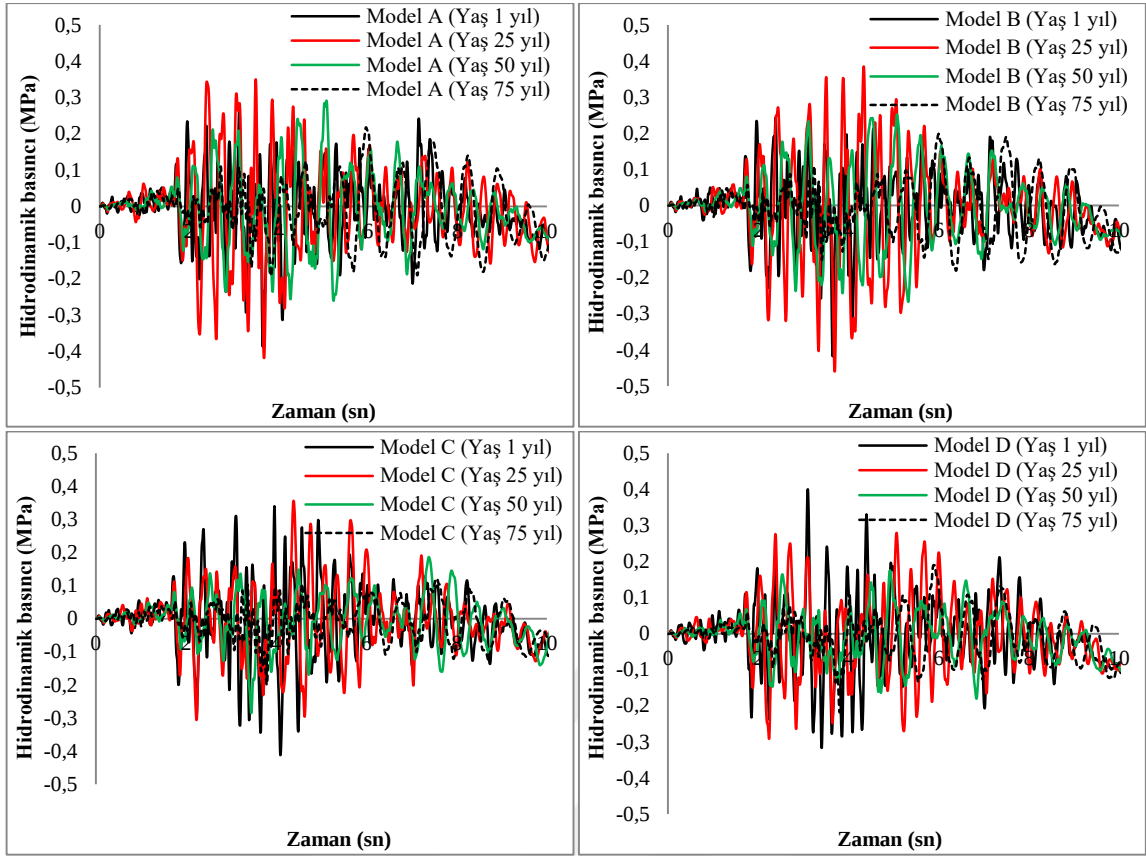
Şekil 32’de verilen baraj modellerinin dinamik davranışı, farklı yaşlarda incelenmiştir. Baraj modellerinin temel periyotları, farklı yaşlarında Tablo 10’da verilmiştir. Tablo 10’a göre yaş ilerledikçe baraj modellerinin temel periyotlarında artış, elastik modüllerinde ise azalım görülmüştür. 1 yaş tepkisine göre Model A, Model B, Model C ve Model D’nin 50 yaşında temel periyotlarındaki artış sırasıyla %65,4, %65,28, %65,25 ve %65,51 olarak hesaplanmıştır. Farklı geometriye sahip farklı baraj modelleri için bu artışın hemen hemen aynı olduğu söylenebilir. Ayrıca betonun yaşlara göre bozulmasının artmasıyla barajın temel periyodunda artma ve elastisite modülünde ise azalma eğiliminin görülmüştür. Aynı eğilim Burman (2011), Gorai and Maity (2021) ve Zhai *et al.* (2022) tarafından yaşlanan beton ağırlık barajlarının parametreleri araştırılırken de elde edilmiştir. Sunulan baraj modellerinin farklı yaşlarında kret noktasındaki yatay deplasman-zaman grafiği Şekil 36’da verilmiştir. Bu şekle göre yer değiştirme değerlerinin barajın yaşlarına göre arttığı görülmektedir. Şekil 36’daki Model B için kret noktasının 1 yaşındaki maksimum mutlak yatay yer değiştirmesi 1,88 cm olarak hesaplanmış ve daha sonraki yaşlarda ise kret yer değiştirmesi 25, 50 ve 75 yaşlarında sırasıyla 3,87 cm, 3,74 cm ve 5,05 cm’ye çıkmıştır.



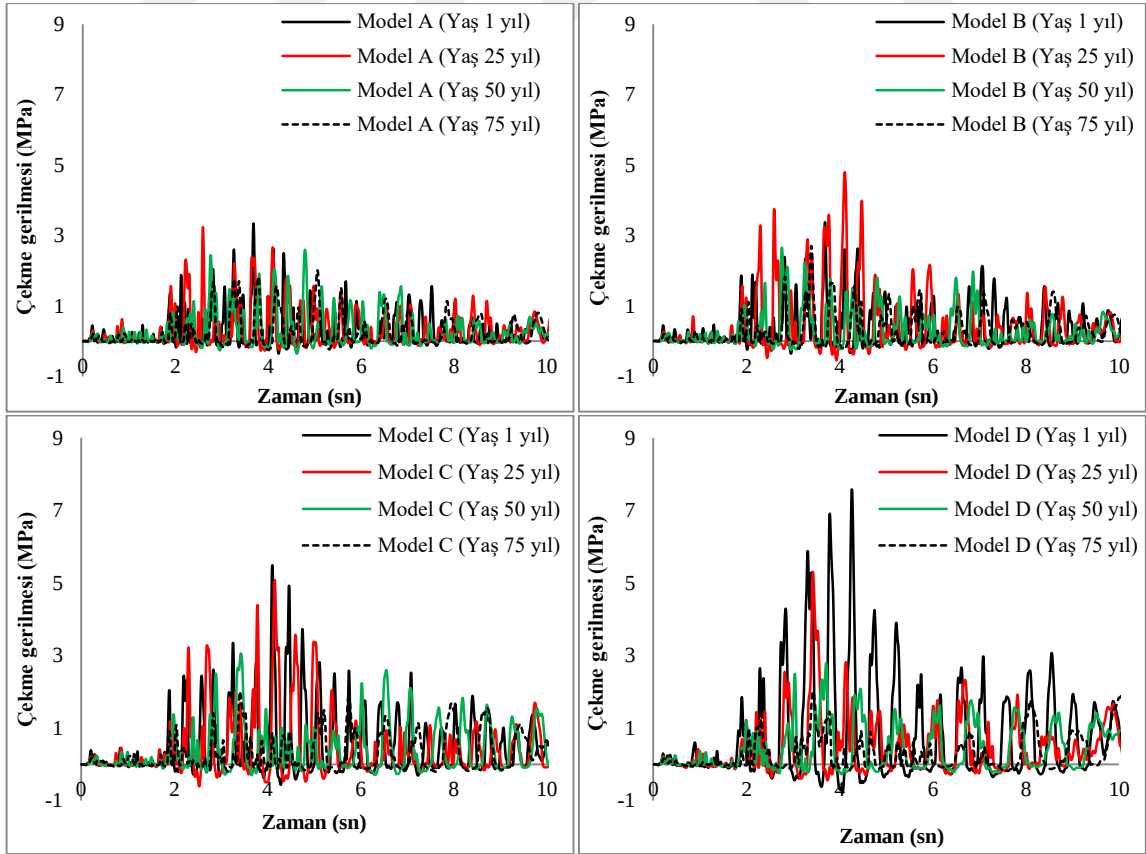
Şekil 36. Farklı yaşlarda Model A, Model B, Model C ve Model D için kret noktasının yatay yer değiştirme-zaman grafiği



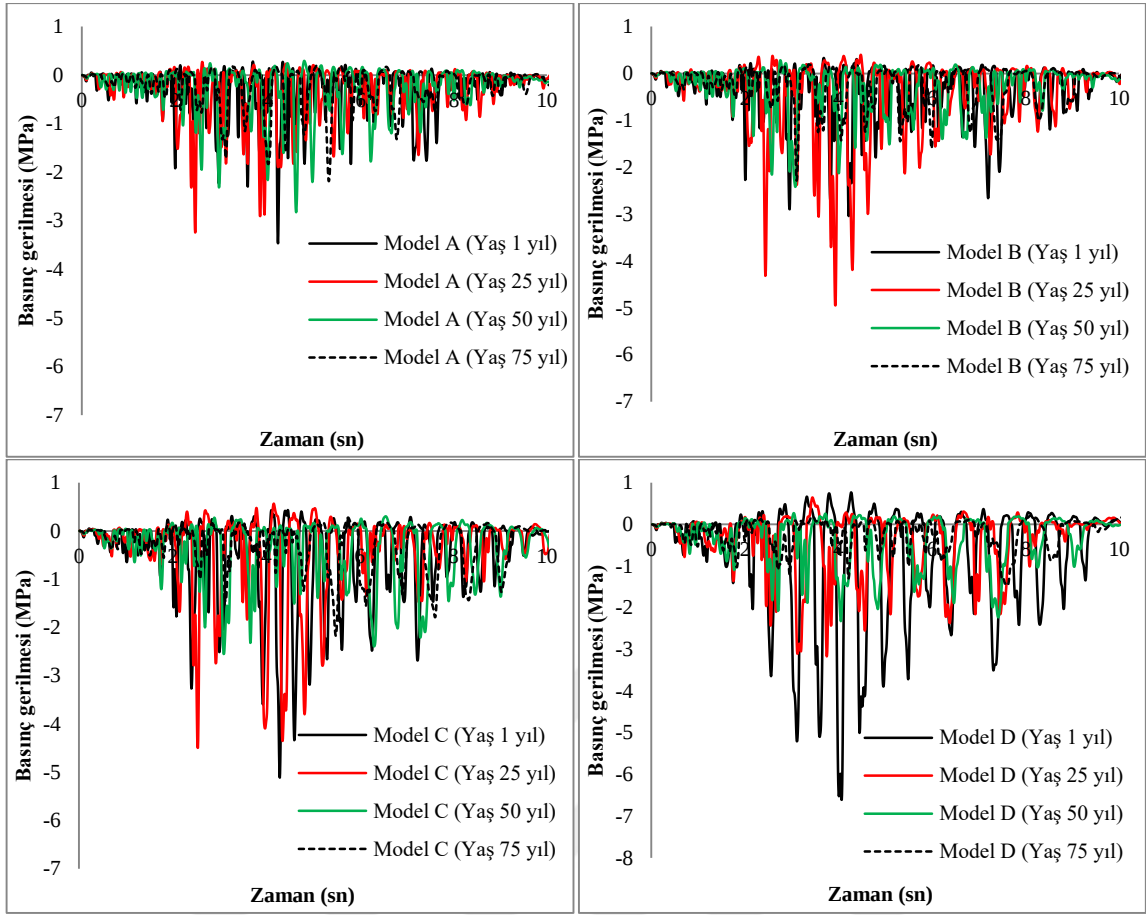
Şekil 37. Farklı yaşlarda Model A, Model B, Model C ve Model D için memba yüzeyindeki mutlak maksimum yatay yer değiştirmelerinin değişimi



Şekil 38. Model A, Model B, Model C ve Model D'nin topuğundaki hidrodinamik basınç-zaman grafiği



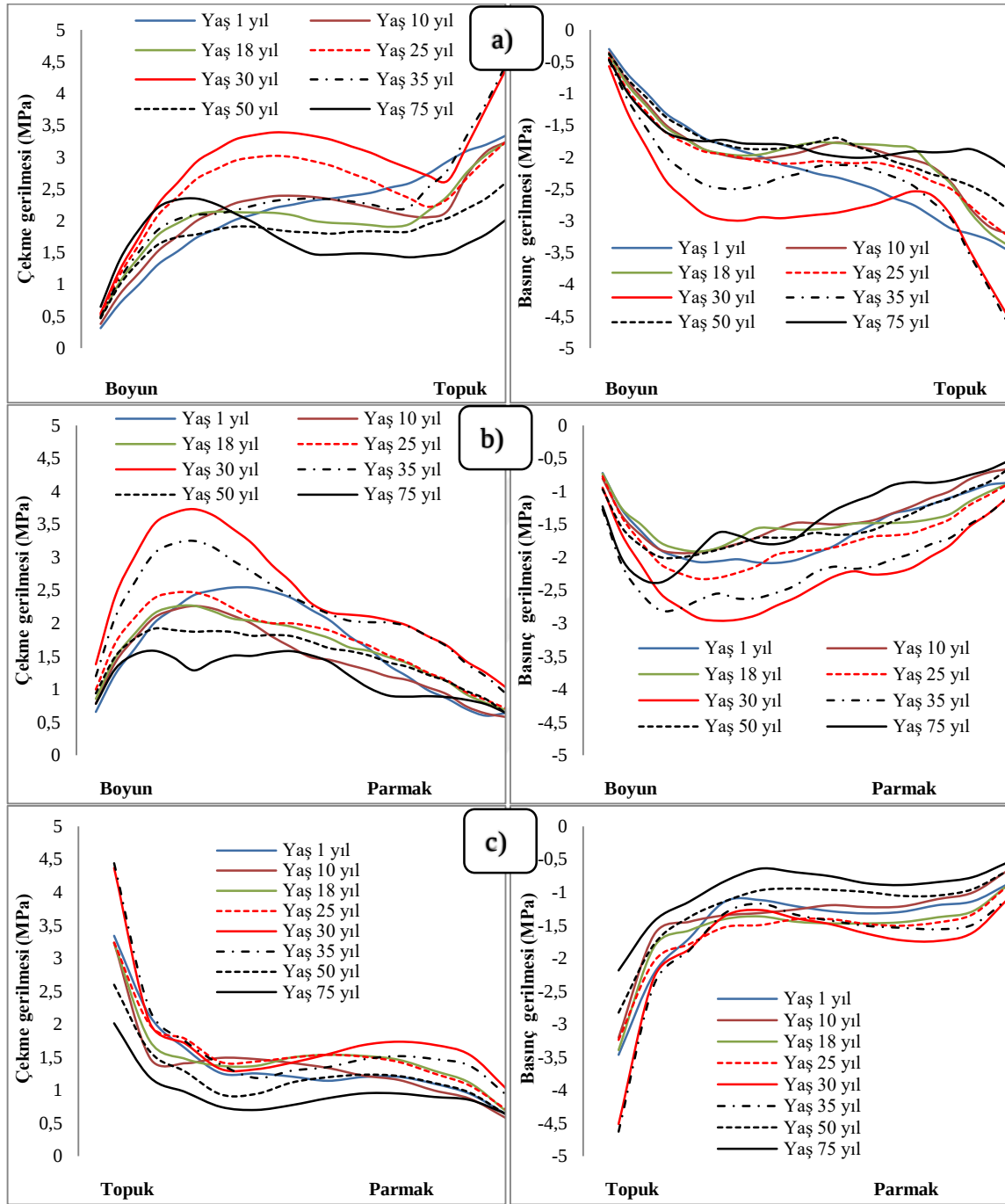
Şekil 39. Model A, Model B, Model C ve Model D'nin topuğundaki çekme gerilmelerin farklı yaşlarda değişimi



Şekil 40. Model A, Model B, Model C ve Model D’nin topuğundaki basınç gerilmelerin farklı yaşlarda değişimi

Yer değiştirme tepkileri, 1 yaş tepkisine göre %105,85, %98,93 ve %168,61’e yükselmiştir. Aynı değerlendirmeler farklı çalışmalarda da yapılmıştır. Örneğin; yaşlanan Koyna barajının yatay deprem yükleri altındaki sismik davranışı, sediment tabakasının etkileri de dahil olmak üzere Gogoi and Maity (2007) tarafından incelenmiştir. Düşey deprem yüklerinin tepkiler üzerindeki etkisi bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Yatay ve düşey deprem bileşenlerinin eşzamanlı etkilerinden elde edilen yer değiştirme tepkilerinin büyüklüğünün, tek bileşenli etkilerinden elde edilen sonuçlardan daha büyük olduğu görülmüştür (Gogoi and Maity 2007). Düşey deprem yüklerinin yer değiştirme tepkileri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Baraj gövdesinin ilerleyen yaşlarda daha fazla deformasyona uğradığı fark edilmiştir. Aynı davranış, kret noktasının düşey yer değiştirme tepkilerinde de gözlemlenmiştir, ancak bu birçok çalışmada incelenmemiştir. Ayrıca farklı yaşlardaki baraj modellerinin memba yüzündeki mutlak maksimum yatay ve düşey yer değiştirme garikleri Şekil 37’de gösterilmiştir. Bu şekle göre yer değiştirme tepkilerinin yaşlara göre değiştiği ve daha geç yaşlarındaki bu tepkiler, daha önce yaşlarındaki tepkilerden daha önemli olabileceği görülmektedir. Sunulan baraj modellerinin yatay ve düşey

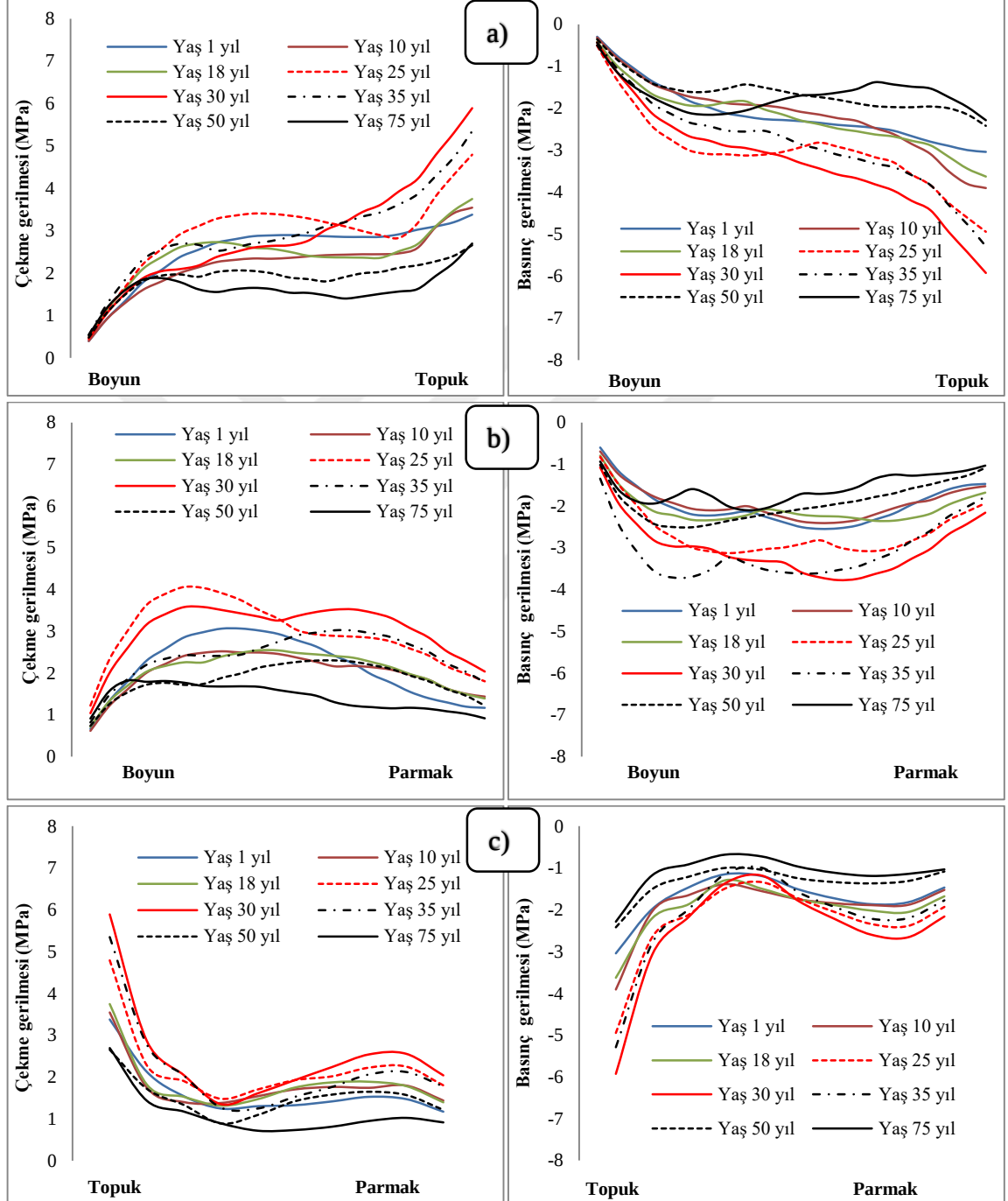
membra yüzeyindeki yer değiştirmelerinin büyüklükleri karşılaştırılarak, düşey yer değiştirme bileşenlerinin yatay yer değiştirme bileşenleri kadar önemli olduğu sonucuna varılabilir.



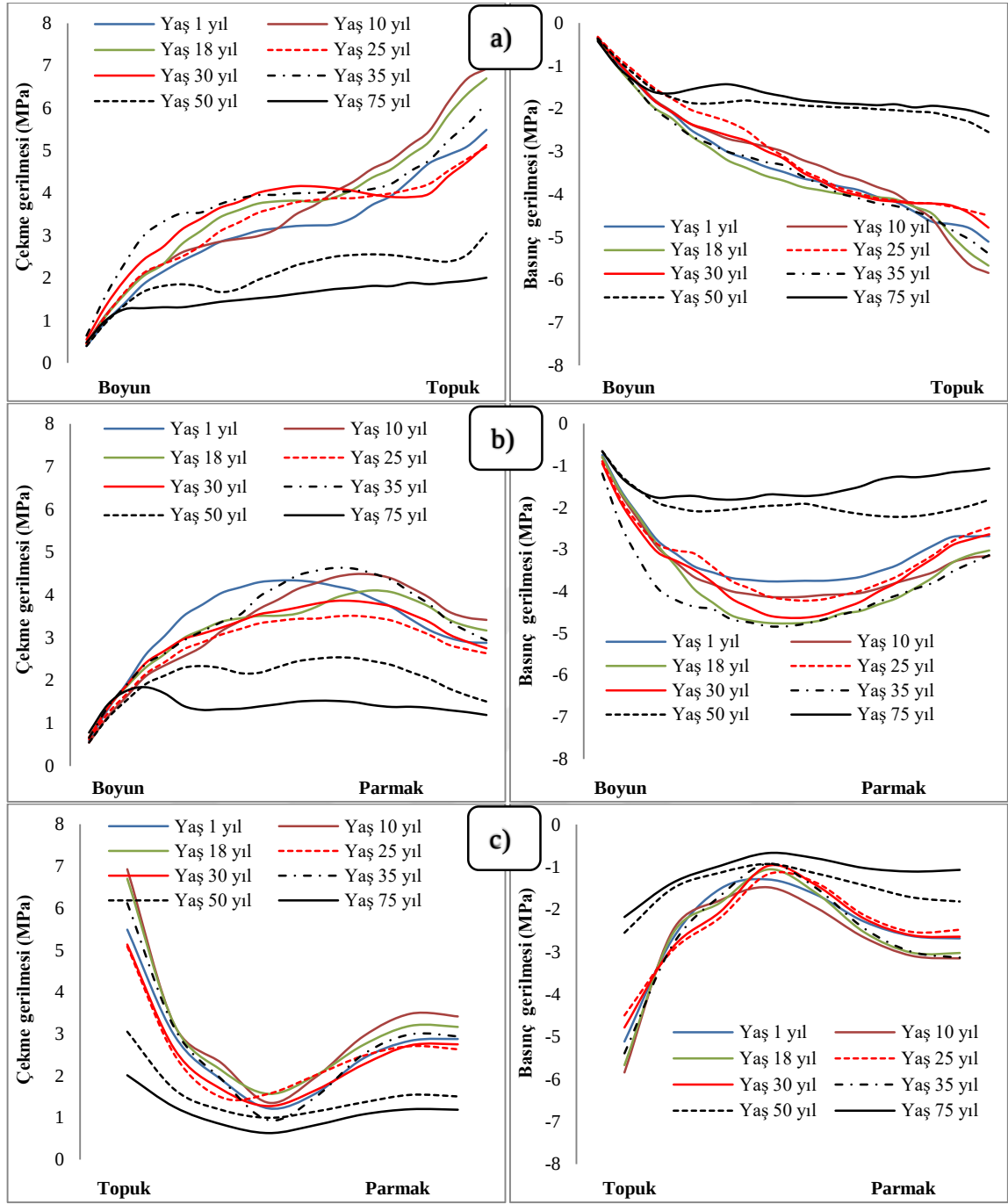
Şekil 41. Model A'nın a) memba yüzü, b) mansap yüzü ve c) tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi

Bu tepkiler, yaşlanan beton ağırlık barajlarının sismik değerlendirmesinde dikkate alınmalıdır. Yaşlanan baraj gövdesinin düşey yer değiştirme tepkilerinin incelenmesi bazı çalışmalarda genellikle ihmal edilmiştir (Gogoi and Maity 2007; Burman 2011; Azizan *et al.* 2017; Gorai and Maity 2021; Zhai *et al.* 2022). Ayrıca Model A'nın dört baraj modeli arasında en küçük yatay yer değiştirme tepkilerini gösterdiği görülmüştür. Ancak, dört farklı baraj modelinin düşey yer değiştirme tepkilerinin büyüklüğünün hemen hemen aynı olduğu

görülmüştür. Model A'nın diğer üç baraj modelinden (Model B, Model C ve Model D) daha rijit olduğu anlaşılmıştır. Modellerin A noktasındaki (barajın topuğuna yakın, Şekil 33) hidrodinamik basıncın değişimini incelendiğinde, betonun bozulmasından da etkilendiği görülmektedir. Baraj modellerinin topuğa yakın noktada hidrodinamik basıncının zaman tanımları Şekil 38'de verilmiştir.



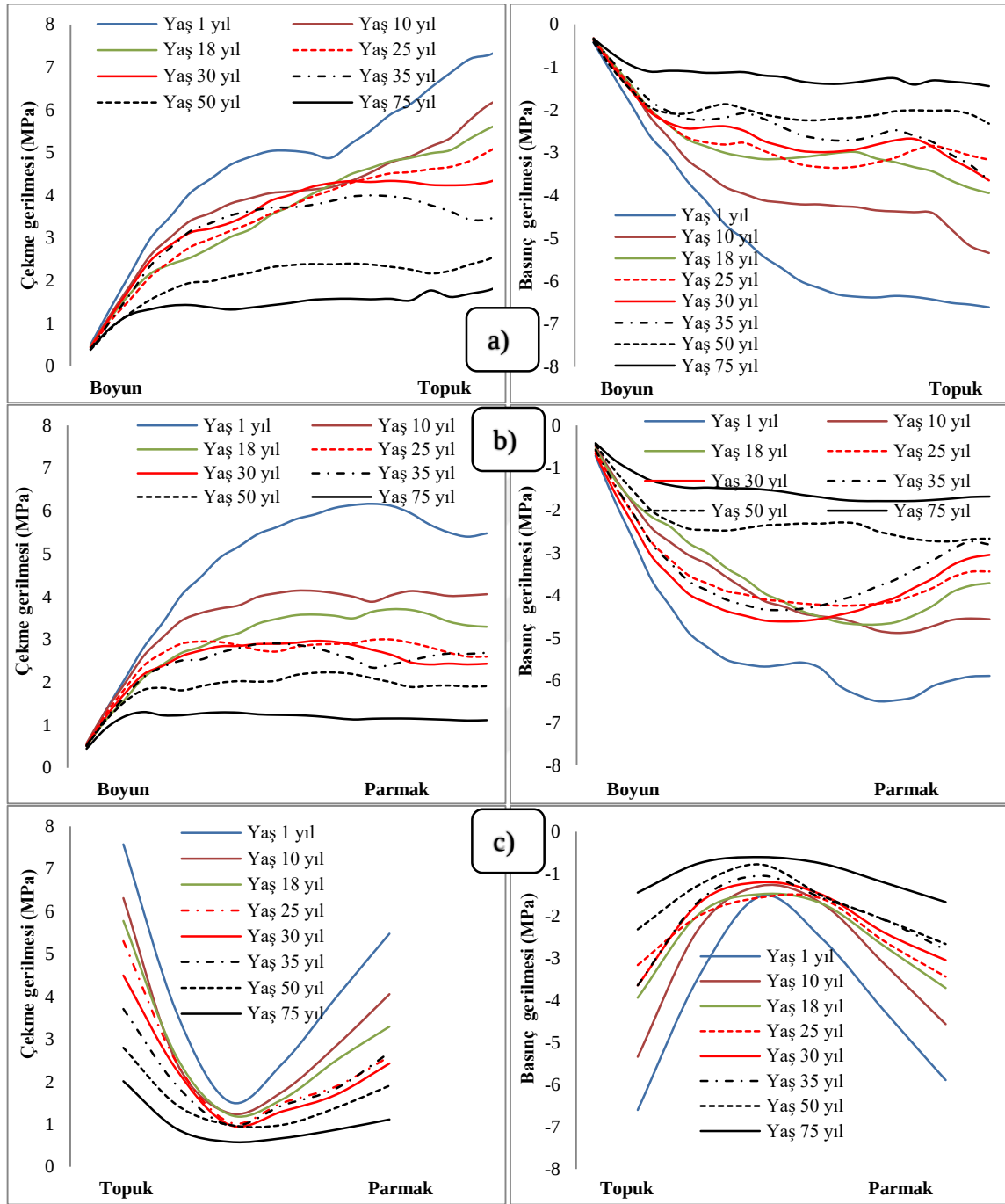
Şekil 42. Model B'nin a) memba yüzü, b) mansap yüzü ve c) tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi



Şekil 43. Model C'nin a) memba yüzü, b) mansap yüzü ve c) tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi

Şekil 38'e göre, hidrodinamik basıncın baraj modellerinin yaşlanma sürecindeki davranışının dört farklı yaşta farklı olduğu görülmektedir. Belli bir yaşta bu tepki en aşırı duruma gelir ki, bu beklenen bir davranıştır. Baraj modellerinin topuk noktasındaki asal gerilmelerinin zaman tanımları farklı yaşlar için, Şekil 39 ve 40'ta karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu şekle göre, mansap tarafındaki eğimi 0,9'dan 0,3'e düşerken, erken yaşlarda baraj gövdelerinin topuk kısmındaki gerilme tepkilerinin hızla arttığı görülmektedir. Farkın daha net görülebilmesi için her bir baraj gövdesinin 1 yaşındaki maksimum çekme

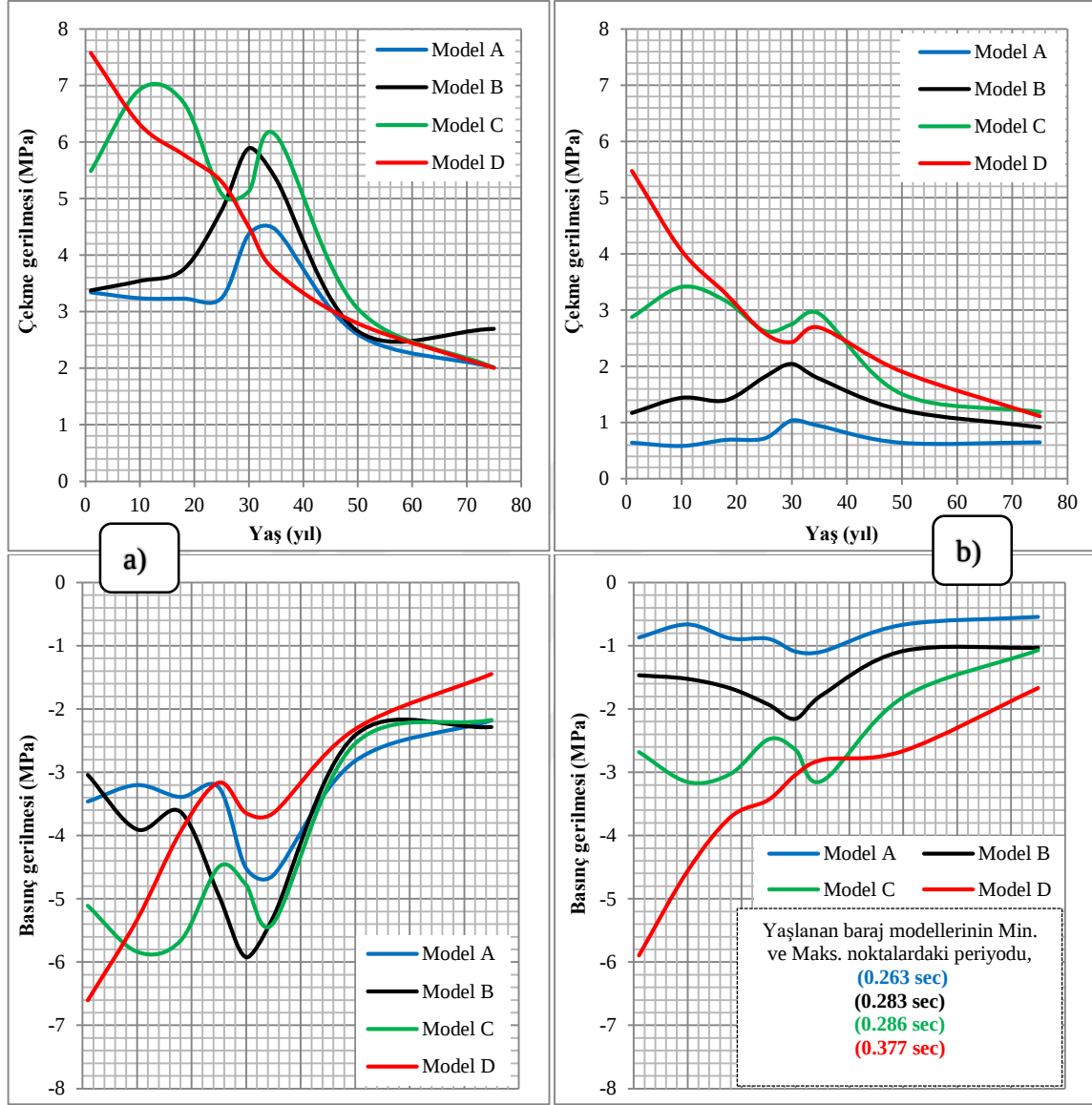
gerilmesi tepkisinin Model A için 3,34 MPa, Model B için 3,37 MPa, Model C için 5,48 MPa ve Model D için 7,57 MPa olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 44. Model D'nin a) memba yüzü, b) mansap yüzü ve c) tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi

Model A (0,9 eğimi olan) tepkisine göre artış, Model B için %0,89, Model C için %64,07 ve Model D için %126,64 olarak hesaplanmıştır. Daha da açıklığa kavuşturmak gerekirse, her bir baraj gövdesinin 75 yaşında maksimum çekme gerilmesi tepkisi Model A için 2,01 MPa, Model B için 2,69 MPa, Model C için 2,01 MPa ve Model D için 2,0 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu farklar Model A tepkisine göre, Model B için +%33,83, Model C için %0 ve Model D için -%0,49 olduğu görülmüştür. Genel olarak Model D'deki gerilme

tepkilerinin dört baraj modeli arasında en büyük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca baraj gövdesi bozulma sürecine girerken gerilme davranışının farklı olduğunu göstermiştir. Belirli bir yaşta, gerilme tepkilerinin kritik tepki haline geldiği görülmüştür.



Şekil 45. Yaşlanan baraj modellerinin a) topuk ve b) parmağındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin farklı yaşlarda değişimi

Baraj modellerinin memba/mansap yüzü ve tabanındaki maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin değişimi, Şekil 41-44'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre Model A, Model B ve Model C'nin ileri yaşlarda hesaplandığı gerilme tepkilerinin 1 yaşındaki gerilme tepkilerine göre ya arttığı ya da düştüğü fark edilmiştir. Ancak Model D için bu eğilim genellikle ileri yaşlarda düştüğü fark edilmiştir. Bu davranışın nedeni baraj gövdesinin temel periyoduna bağlıdır ve aşağıdaki paragraflarda incelenmiştir. Ayrıca baraj gövdesindeki önemli gerilmelerin genellikle topukta ve boyun noktasının bazı alt kısımlarında meydana geldiği tespit edilmiştir. Örneğin; Model B'nin topuğunda 1 yaşındaki maksimum

çekme gerilmesi 3,37 MPa, 10 yaşında 3,54 MPa, 18 yaşında 3,74 MPa, 25 yaşında 4,79 MPa olarak hesaplanmıştır. Daha sonraki yaşlarda ise, 30, 35, 50 ve 75 yaşlarında sırasıyla 5,89 MPa, 5,34 MPa, 2,65 MPa ve 2,69 MPa olarak hesaplanmıştır. Baraj modelinin topuk kısmındaki çekme gerilmelerinin 30 yaşında tasarım ömrü boyunca maksimum olduğu görülmüştür. 1 ve 30 yaşındaki bu tepkiler arasında olan farkın %74,77 olduğu görülmüş; ki bu bir artıştır. Bu eğilim aynı zamanda baraj modelinin topuğundaki basınç gerilmeleri için de geçerlidir (Şekil 42c). 30 yaşından sonra, betonun daha fazla bozulması nedeniyle gerilmeler azalma eğilimi göstermiştir. Ayrıca Model B'nin 30 yaşındaki temel periyodu 0,283 sn olarak hesaplanmıştır (Tablo 10). Bu periyotta baraj gövdesinin en çok hasar görebilen kısmı olan topuk noktası önemli çekme ve basınç gerilmelerine maruz kalmaktadır (Şekil 42c). Aynı davranış Model A, Model C ve Model D'nin farklı yaşlarında da görülmüştür (Model A için Şekil 41c, Model C için Şekil 43c, Model D için Şekil 44c ve Tablo 10). Böylece, yaşlanma sürecinde, bu baraj modellerinden herhangi birinin ilgili yaşta şiddetli gerilme tepkileri sergilediği belirli bir periyot vardır. Bu periyot, yapılarda olduğu gibi yaşlanan beton ağırlık barajlarının sismik tasarımında da dikkate alınmalıdır.

Tablo 10. Yaşlanan baraj modellerinde temel periyot, bozulan elastisite modülü ve topuğundaki maksimum çekme gerilmelerinin karşılaştırılması

Yaş (yıl)	Model A		Model B		Model C		Model D		Bozulmuş El. Mod. (MPa)
	Temel periyot (sn)	Maks. çekme ger. (MPa)	Temel periyot (sn)	Maks. çekme ger. (MPa)	Temel periyot (sn)	Maks. çekme ger. (MPa)	Temel periyot (sn)	Maks. çekme ger. (MPa)	
1	0,185	3,340	0,210	3,377	0,259	5,488	0,377	6,869	33193,15
10	0,204	3,235	0,231	3,544	0,286	6,930	0,416	6,312	32754,13
18	0,221	3,229	0,251	3,748	0,310	6,702	0,452	5,779	30801,76
25	0,237	3,238	0,269	4,793	0,332	5,085	0,484	5,300	29256,6
30	0,250	4,366	0,283	5,891	0,350	5,130	0,510	4,497	27979,98
35	0,263	4,442	0,298	5,346	0,368	6,117	0,536	3,709	26731,85
50	0,306	2,598	0,347	2,658	0,428	3,054	0,624	2,795	23225,42
75	0,398	2,013	0,452	2,696	0,558	2,010	0,813	2,007	17877,58

Yaşlanan beton ağırlık barajlarının dinamik davranışını araştıran birkaç çalışma yapılmıştır (Gogoi and Maity 2007; Burman 2011; Burman *et al.* 2011; Pan *et al.* 2013a; Pan *et al.* 2013b; Azizan *et al.* 2017; Gorai and Maity 2021; Zhai *et al.* 2022). Bu çalışmalarda, ağırlık barajının dinamik tepkileri üzerindeki betonun yaşlanma etkileri genellikle sadece bir tip baraj gövdesi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçların, birçok farklı baraj gövdesinin test edilmemesiyle genelleştirilmesi çok doğru olmaz. Dolayısıyla bu çalışmada, bir kaç farklı baraj gövdesi test edilerek daha doğru ve ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada 8 farklı yaşta 4 farklı baraj modeli incelenmiştir. Bu yaşlanan baraj

modellerinden herhangi biri, yaşlanma süreci boyunca temel periyotunda artan bir eğilim sergiler (burada yalnızca ilk modal periyot dikkate alınmıştır). Her yaşlanan baraj modelinin tasarım ömründe belirli bir periyotta aşırı gerilme tepkilerinin meydana geleceği tahmin edilebilir. Bu periyottan önceki ve sonraki gerilme tepkilerinin küçük olduğu görülmüştür. Sunulan bu dört yaşlanan baraj modelleri için bu periyot, 0,286 saniye civarında olduğu görülmüştür. Periyodu 0,286 sn'den küçük olan yaşlanan baraj modellerinin gerilme tepkilerinde artan bir trend yaşaması beklenirken, periyodu 0,286 sn'den büyük olan baraj modellerinin ömürleri boyunca gerilme tepkilerinde azalan bir trend yaşaması beklenmektedir. Bu fikri daha da açıklığa kavuşturmak için, baraj modellerinin topuk ve parmak noktaları için maksimum çekme ve basınç gerilmesi seçilmiş ve Şekil 45a ve 45b'de gösterilmiştir. Bu rakamlara göre, Model A, Model B ve Model C'nin topuk ve parmaklarındaki aşırı gerilme tepkilerinin sırasıyla 35, 30 ve 10 yaşında meydana geldiği görülmektedir. Bu üç baraj modelinin 35, 30 ve 10 yaşındaki temel periyodu sırasıyla 0,263, 0,283, 0,286 saniyedir. Ayrıca Model A'nın 35-50 yaş arasındaki temel periyodunun 0,286 saniye civarında olması tahmin edilebilir bir sayıdır. Aynı tahmini 30-35 yaş arası Model B ve Model D için de geçerlidir. Ancak, Model D için aşırı gerilme tepkisi genellikle 1 yaşında meydana gelmektedir. Model D'nin yaşlanma sürecinde ileri yaşlarda aşırı gerilme tepkileri beklenmez. Bu baraj modelinin daha sonraki yaşlarda temel periyotları genellikle Şekil 45'te gösterilen gerilme eğrilerindeki maksimum noktanın sağ tarafında olan 0,286 sn'den daha büyüktür. Modeller, yaşlanma süreci boyunca önemli gerilme davranışını göstermektedir. Böylece aşırı gerilme tepkilerinin 0,286 saniye civarında gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum Tablo 10'da verilen kalın harflerle gösterilen sonuçlarda da açıklanmıştır. Baraj modellerinin ileri yaşlarındaki (75 yaş) gerilmeler arasındaki farkların erken yaş tepkisinden (1 yıl) çok daha küçük olduğu da görülmüştür (Şekil 45). Bunun sebebi, baraj gövdesinin daha da esnek hale gelmesidir.

Bir zemin-yapı etkileşimi probleminde, yapıların temel periyodu, yapı dinamiğinde yaygın bir davranış olan, yapı tipine ve zemin koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu davranış aynı zamanda yaşlanan bir baraj-rezervuar etkileşim probleminde de gözlemlenmiştir. Belirli bir temel periyotta, yaşlanan barajların dinamik davranışı, topuk ve parmak gibi kritik bölgelerde aşırı gerilme tepkileri gösterebilir. Bu periyodu dikkate alınarak yaşlanan beton ağırlık barajlarının sismik değerlendirmesinde kritik tepkiler tespit edilebilir. Bu davranışa dayanarak sunulan baraj modellerinin genellikle topuk ve topuk kısımlarında meydana gelen en büyük gerilme tepkilerinin 0,286 saniye civarında olduğu görülmüştür.

Bu bölümde, beton ağırlık barajların kemo-mekanik etkiler nedeniyle yaşlanması, sonsuz rezervuar ortamı ve yaşa bağlı sediment kalınlığı etkileri dahil olmak üzere, BRE problemi olarak ele alınıp dinamik davranışı incelenmiştir. Ayrıca, baraj gövdesindeki mansap eğimini 0,9'dan 0,3'e, ve taban genişliğini de aynı şekilde 87,5 m'den 33,25 m'ye indirilip geometrisi farklı olan dört baraj üzerinde bu etkileri dikkate alınarak inceleme yapılmıştır. Bu barajlar, Model A, Model B, Model C ve Model D olarak adlandırılmıştır. Bu incelemeden elde edilen sonuçların genel eğilimlerine dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- ❖ Beton ağırlık barajların temel periyodu, betonun zaman içerisinde bozulmasıyla uzar. Değişken geometrilere sahip farklı baraj modellerinin temel periyotlarındaki uzamanın hemen hemen aynı oranda olduğu görülmüştür. Örneğin, sunulan bu baraj modellerinin 50 yaşındaki periyot uzaması, %65 civarında olduğu tahmin edilmiştir.
- ❖ Beton bozuldukça barajın yatay ve düşey kret yer değiştirmesi artar. Bu durum, barajların deprem yüklerine karşı güvenliğini azaltmaktadır. Örneğin, Model B için 25, 50 ve 75 yaşındaki bu artışın 1 yaş tepkisine göre sırasıyla %105,85, %98,93 ve %168,61 olduğu görülmüştür.
- ❖ Yaşla birlikte betonun elastisite modülünde azalma meydana geldiğinden dolayı baraj gövdesi daha esnek hale gelir ve baraj gövdesinde oluşan gerilmeler, o yaştaki barajın temel periyoduna bağlı olarak artış veya azalış gösterir.
- ❖ Baraj gövdesinin daha erken yaştaki gerilme tepkisi mansap eğimini 0,9'dan 0,3'e düşürerek hızla arttığı görülmüştür. 0,9 eğim tepkisine göre artış, 0,7 eğim için %0,89, 0,5 eğim için %64,07 ve 0,3 eğim için %126,64 olarak hesaplanmıştır. Ancak ilerleyen yaşlarda bu farklılıklar daha küçük olduğu görülmüştür. Yani, baraj geometrisi farklı olan ve yaşlanmış barajların gerilme tepkileri hemen hemen aynı seviyeye ulaşacağı söylenebilir.
- ❖ Yaşlanan barajların dinamik davranışı, yaklaşık 0,286 sn'lik temel periyot değerinde, topuk ve parmak gibi kritik bölgelerde aşırı gerilme tepkileri meydana gelir. Temel periyot değeri 0,286 saniyeden küçük veya büyük olursa, gerilme büyüklüklerinin sırasıyla monoton bir şekilde arttığı veya azaldığı görülmüştür.
- ❖ Model A, Model B ve Model C için maksimum gerilmelerin olduğu temel periyot değerine (0,286 sn) sırasıyla 35, 30 ve 10 yıl civarında ulaşılır. Model D'de maksimum gerilmeler birinci yaşta meydana geldiği görülmüştür.
- ❖ Sunulan baraj modellerinin topuk kısmındaki hidrodinamik basınç tepkileri de betonun bozulmasından etkilenir ve farklı olduğu tespit edilmiştir. Belirli bir yaşta baraj

modellerinin topuk kısmındaki hidrodinamik basınçların maksimum olduğu görülmüştür.

Beton Ağırlık Barajların Çeşitli Deprem Yükleri Altındaki Davranışı ve Performansı

Beton ağırlık barajların şiddetli deprem yüklerine karşı dayanıksız olması nedeniyle, bu yapıların sismik performans değerlendirmesinin yapılması önemli bir konu haline geldiği anlaşılmıştır. Depremlerin ani hareketlerinden dolayı baraj gövdesinde meydana gelen ciddi hasarlar, büyük miktarda suyu hemen mansap tarafına bırakabilir ve sonuç olarak mansap tarafında yaşayanlara ve altyapılara büyük hasar verebilmektedir. Bu nedenle, yeni ve mevcut barajların sismik performans değerlendirmesi, birçok araştırmacı tarafından doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ghanaat 2004b; Bayraktar *et al.* 2010; Wang *et al.* 2015; Gorai and Maity 2019; Wang *et al.* 2021). Şiddetli deprem hareketlerinde betonun çekme gerilmesi, malzemenin çekme mukavemetini aşar. Bu nedenle birçok araştırmacı, betonun çekme çatlağını dikkate alarak betonun doğrusal olmayan davranışını araştırmıştır. Betondaki çatlak oluşumu, ayrık çatlak yaklaşımı (discrete crack approach) veya lekeli çatlak yaklaşımı (smeared crack approach) kullanılarak tahmin edilebilir. Bunun dışında hasar plastisite modeli (damage plasticity model), beton barajların doğrusal olmayan davranışını simüle etmek için en popüler modeldir. Literatürde, aynı girdi parametreleri için farklı sonuçlar veren birkaç modelin geliştirildiği ve doğrusal olmayan bir analizin büyük hesaplama çabası ve maliyeti gerektirdiği açıktır. Böylece, Ghanaat (2004b) tarafından önerilen yöntem, doğrusal zaman tanım alanı tepkilerini kullanarak daha az çabayla baraj gövdesinin performans seviyesini ve olası hasarlarını tahmin edebilir. Bu doğrusal değerlendirme yöntemi, talep kapasite oranına, kümülatif aşırı gerilim süresine ve aşırı gerilim altındaki bölgelerin toplam alanına dayalıdır. Ayrıca, bu yöntem United States Army Corps of Engineers (USACE) kılavuzunda da yer almakta (USACE 2003) ve birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Bayraktar *et al.* 2010; Ardebili and Mirzabozorg 2012; Wang *et al.* 2014; Gorai and Maity 2019; Gorai and Maity 2021; Sun *et al.* 2022).

Barajların sismik performans analizi

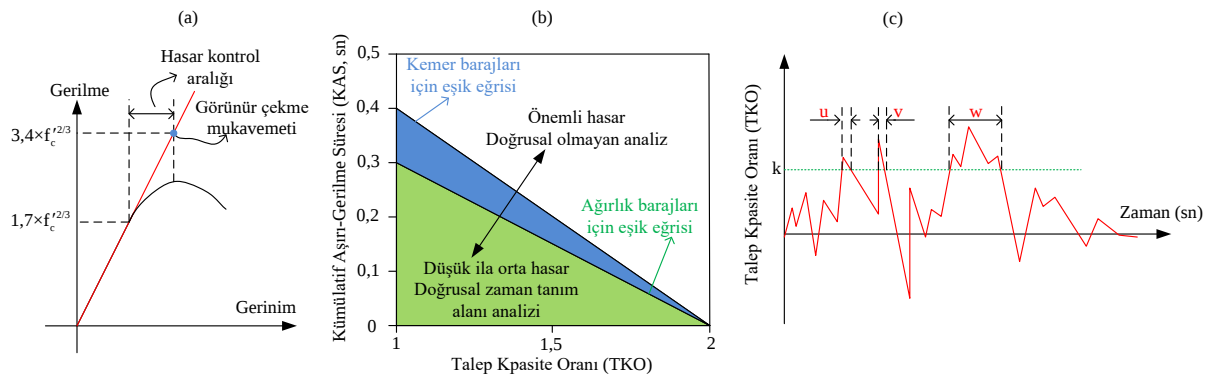
Barajların sismik performans değerlendirilmesindeki amaç, barajda meydana gelebilecek hasar ve hasar seviyesinin belirlenmesidir. Bunun için, doğrusal zaman tanım alanı analiziyle elde edilen sonuçların yardımıyla olası hasar seviyesinin niteliksel tahmini, Ghanaat (2002) ve Ghanaat (2004b) tarafından geliştirilen sistematik ve mantıklı yöntemle mümkün olmuştur. Barajın zaman tanım alanındaki deformasyonları, gerilmeleri ve diğer tepkileri, çeşitli yöntemler sayısında hesaplamak mümkündür. Elde edilen bu sonuçların

sistematik bir şekilde yorumlanması ve değerlendirilişi barajda meydana gelen hasarların yaklaşık ve niteliksel tahmini için temel oluşturur. Bu yöntemle göre sismik performans değerlendirilişi, gerilme talep-kapasite oranı (stress demand-capacity ratios, DCR), kümülatif aşırı gerilme süresi (cumulative overstress duration, COD), aşırı gerilme altındaki bölgelerin uzamsal kapsamı (spatial extent of overstressed regions, OSR) ve diğer hususlar açısından yapılmaktadır. Bu üç kapsam, talep-kapasite oranı (TKO), kümülatif aşırı gerilme süresi (KAS) ve aşırı gerilme altındaki bölgeler (AGAB) şeklinde kısaltılmıştır. Bu değerlendirme, Şekil 46a'da gösterilen gerilme hasar kontrol aralığında uygulanır. Tahmini hasar seviyesi belirli bir baraj tipi için kabul eşiğinin altındysa, hasarın düşük ile orta arasında olduğu kabul edilir ve doğrusal zaman tanım alanı analizi yeterli olacaktır (Şekil 46b). Aksi takdirde, hasarın ciddi olduğu kabul edilir ve barajın yıkılmasına neden olup olmayacağının belirlenmesi için doğrusal olmayan analizi gerekir.

Beton için TKO, hesaplanan maksimum asal gerilmenin betonun çekme dayanımına (f_t) bölünerek belirlenir. Betonun çekme dayanımı, tek eksenli gerilme testlerinden ölçülen veya Raphael (1984) tarafından önerilen formülasyonla,

$$f_t = 1.7 \times f_c'^{2/3} \quad (79)$$

şeklinde hesaplanır. Burada, f_c' , betonun basınç dayanımını ifade eder. Beton barajların doğrusal dinamik zaman tanım alanı analizinden elde edilen ve izin verilen maksimum TKO değeri, önerilen sismik performans yönteminde 2 olarak kabul edilmiştir; ki, bu değer, betonun statik çekme dayanımının iki katı olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 46. Barajların sismik performans ve hasar kriterlerinin anlatımı

KAS, belirli bir $TKO \geq 1$ için gerilme seviyesi üzerindeki gezilerinin toplam süresi olarak tanımlanır. Açıklayıcı bir örnek gerekirse, Şekil 46c'de, bir elemanın gerilme-zaman grafiği k talep-kapasite oranı ($1 \leq k \leq 2$) için verilmiştir. k talep-kapasite oranını aşan veya üzerinde kalan gerilme süreleri sırasıyla u , v ve w harflerle gösterilmiştir. Buna göre, üç farklı

gerilme gezinimiyle kümülatif aşırı gerilme süresi $u+v+w$ olarak hesaplanır. Bu değer, $KAS=1$ durumunda kemer barajlar için 0,4 sn ve ağırlık barajlar için 0,3 sn olarak önerilmiştir. Ayrıca bu değer, $KAS=2$ durumunda her iki baraj tipi için 0'dır. Kemer barajlar hem konsol hem de kemer mekanizmasına dayanan yapılar olduğundan dolayı kümülatif aşırı gerilme süresi, ağırlık barajlardan daha büyük varsayılmaktadır (Şekil 46b).

KAS değeri yaklaşık olarak, belirli bir gerilme seviyesini aşan gerilme noktalarının sayısı, analiz zaman adımı ile çarpılarak elde edilebilir. Bu süre ne kadar yüksek olursa, hasar olasılığı da o kadar yüksek olur. Bu yöntemle göre üç performans seviyesi belirlenmiştir,

a) Küçük hasar veya hasar yok: eğer $TKO < 1$ 'den küçük ise, beton ağırlık barajının dinamik davranışı lineer elastik bölgede olduğu, çok az hasar gördüğü veya hiç hasar görmediği anlaşılr.

b) Kabul edilebilir hasar: eğer $1 \leq TKO \leq 2$ aralığıysa, bu durumda, beton ağırlık barajı doğrusal olmayan bir davranışı sergilediği, gövdede çatlaklar ve derz açılması meydana geldiği varsayılır. Ayrıca, aşırı gerilme altındaki bölgelerinin (AGAB) toplam alanı baraj kesitinin 15%'i veya altında olup kümülatif aşırı gerilme süresi de belirlenen TKO 'ler için, Şekil 46b'de gösterilen performans eşik eğrisinin (PEE) altındaysa, baraj gövdesi yıkılmayacak kadar kabul edilebilir hasar gördüğü anlaşılr.

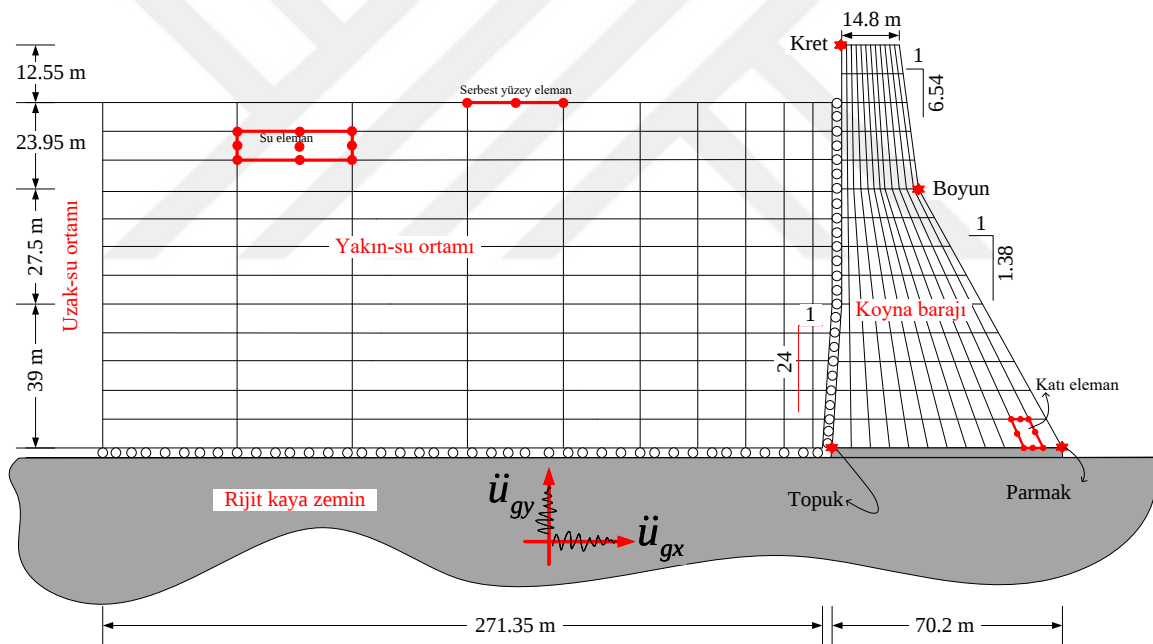
c) Ağır hasar: eğer yukarıda bahs edilen durumların hiç birisini sağlamıyorsa, $TKO > 2$ olduğu, kümülatif aşırı gerilme süresi ağırlık barajlar için 0,3 sn'dan büyük olduğu, Şekil 46b'de gösterilen PEE üzerinde olduğu anlaşılr. Bu durumda, baraj gövdesinde meydana gelen hasarların ciddi olduğu kabul edilir. Barajda meydana gelen hasarların detaylı incelenmesi için doğrusal olmayan analize, özellikle, barajın temel periyodu, tepki spektrumunun artan bölgesine düşerse, gerek duyulur (Ghanaat 2004b).

BRE problemi

Hindistan'da 103 m yüksekliğinde ve 70,2 m taban genişliğindeki Koyna barajı da dahil olmak üzere birçok beton ağırlık barajı şiddetli deprem yüklerinden zarar görmüştür. 11 Aralık 1967'de meydana gelen 6,5 Richter büyüklüğündeki Koyna depremi barajda ciddi hasarlara neden olmuştur. Hasar, birçok monolitin memba ve mansap yüzeylerinde mansap eğiminin değiştiği bölgede yatay çatlaklar olarak meydana gelmiştir (Chopra and Chakrabarti 1971; Chopra and Chakrabarti 1973). Bu barajın sismik analizi kapsamlı çalışmalarla birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır (Chopra and Chakrabarti 1971; Chopra and Chakrabarti 1973; Calayir and Karaton 2005; Gogoi and Maity 2007; Nayak and Maity 2013; Zhang *et*

al. 2013; Wang *et al.* 2014; Azizan *et al.* 2017; Gorai and Maity 2019; Gorai and Maity 2021).

Bu baraj gövdesi, örnek olarak burada da seçilmiştir. Birleşik baraj-rezervuar etkileşim probleminin sonlu eleman modeli Şekil 47’de verilmiştir. Modeldeki toplam düğüm ve eleman sayısı sırasıyla 1108 ve 335’tir. Barajın ve suyun malzeme özellikleri şu şekilde kabul edilmiştir; beton baraj için, elastisite modülü, 33193,15 MPa; kütle yoğunluğu, 2443 kg/m³; Poisson oranı, 0,2, betonun çekme dayanımı, 2,9 MPa, ve su ortamı için, hcimsel elastisite modülü, 207 MPa; kütle yoğunluğu, 1000 kg/m³. Sistemin malzeme sönümünün histeretik olduğu varsayılmış ve %5 olarak ele alınmıştır. Baraj ve rezervuar ortamları arasındaki dinamik etkileşimi sağlamak için arayüzeyde rijit kafes elemanlar yerleştirilmiştir. Bu elemanların uzunluğu ve rijitliği sırasıyla 0,001 m 2×10^{14} MPa olarak seçilmiştir (Akkas *et al.* 1979). Uzak su ortamı, sonsuz sıvı elemanlarla ayrıklaştırılmıştır. Bu elemanların yer değiştirme azaltma parametresi 4,08 olarak seçilmiştir (Bettess and Bettess 1984).



Şekil 47. Rijit ana kaya zemin üzerinde oturan Koyna barajı-rezervuar etkileşim probleminin sonlu eleman modeli

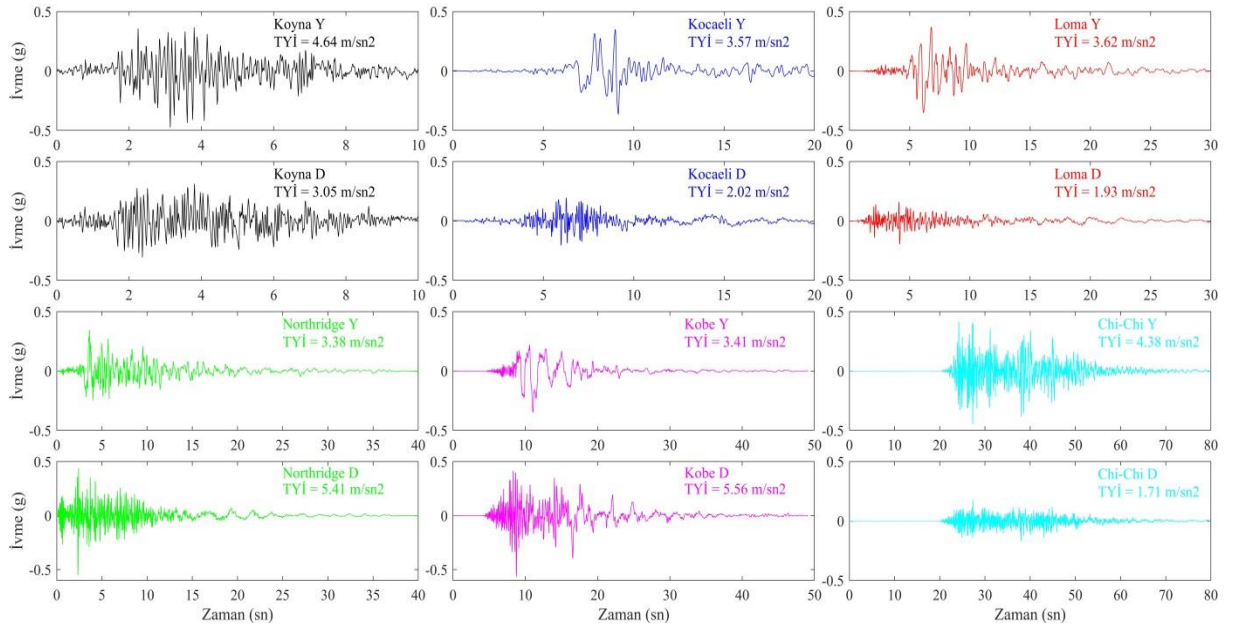
Yer hareketlerine maruz kalan yapıların sismik analizinde önemli bir görev, yer hareketi verilerinin seçilmesidir. Bu nedenle, PEER veritabanından (PEER 2013) büyüklüğü 6,5 ile 7,62 Mw arasında değişen ve süreleri 10 saniye ile 80 saniye arasında değişen, hem yatay (Y) hem de düşey (D) bileşenli toplam 6 gerçek deprem verisi seçilmiştir. Bu yer hareketlerinin özellikleri tepe yer ivmeleri (TYİ) dahil olmak üzere Tablo 11’de verilmiştir. Koyna barajı Hindistan’ın Maharashtra eyaletinde inşa edilmiştir. Bu bölgenin jeolojik bileşimi Pre-Kambriyen ve katmanlı bazalt kayalarındır. Ayrıca, Hindistan 2016 Standardı’na

göre bu bölge, 0,3 g zon faktörü ile IV. deprem bölgesi olarak kabul edilmiştir (Gupta and Gupta 2004). Bu nedenle, seçilen yer hareketi kayıtları 0,3 g olarak ölçeklendirilmiş ve baraj yapısının zemini de rijit ana kaya olduğu varsayılmıştır. Ölçekli yer hareketinin yatay ve düşey bileşenleri aynı zamanda baraj tabanına etkidiği varsayılmıştır. Ölçeklendirilmemiş yer hareketi kayıtları ve bunların %5 sönüm oranı ile ivme davranış spektrumu (IDS) sırasıyla Şekil 48 ve 49’da verilmiştir.

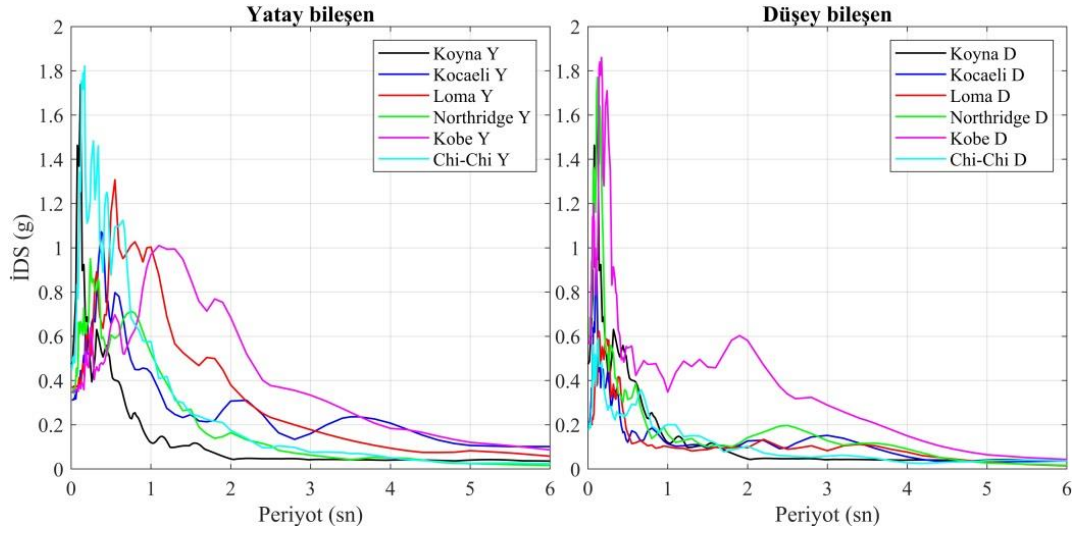
Tablo 11. Deprem verilerinin özellikleri ve Laplace uzayındaki çözüm tekniğine göre düzenlenmesi

No.	Deprem kaydı	İstasyon yeri	Faydan mesafesi (km)	Mw	TYİ (m/sec ²) Y	TYİ (m/sec ²) D	Ölçek çarpanı	Normalize edilmiş (g)	Zaman adımı Δt (sn)	Toplam adım	Zaman süresi (sn)
1	Koyna 1967	Koyna Dam	13,0	6,5	4,64	3,05	0,645	0,3	0,01	2 ¹⁰	10,24
2	Kocaeli 1999	Düzce	13,6	7,51	3,57	2,02	0,839	0,3	0,005	2 ¹²	20,48
3	Loma 1989	Hollister-South	27,67	6,93	3,62	1,93	0,826	0,3	0,004	2 ¹³	32,768
4	Northridge 1994	Arlita-Nordhoff	3,3	6,69	3,38	5,41	0,553	0,3	0,02	2 ¹¹	40,96
5	Kobe 1995	Port Island	3,31	6,9	3,41	5,56	0,539	0,3	0,012	2 ¹²	49,152
6	Chi-Chi 1999	TCU078	8,2	7,62	4,38	1,71	0,683	0,3	0,005	2 ¹⁴	81,92

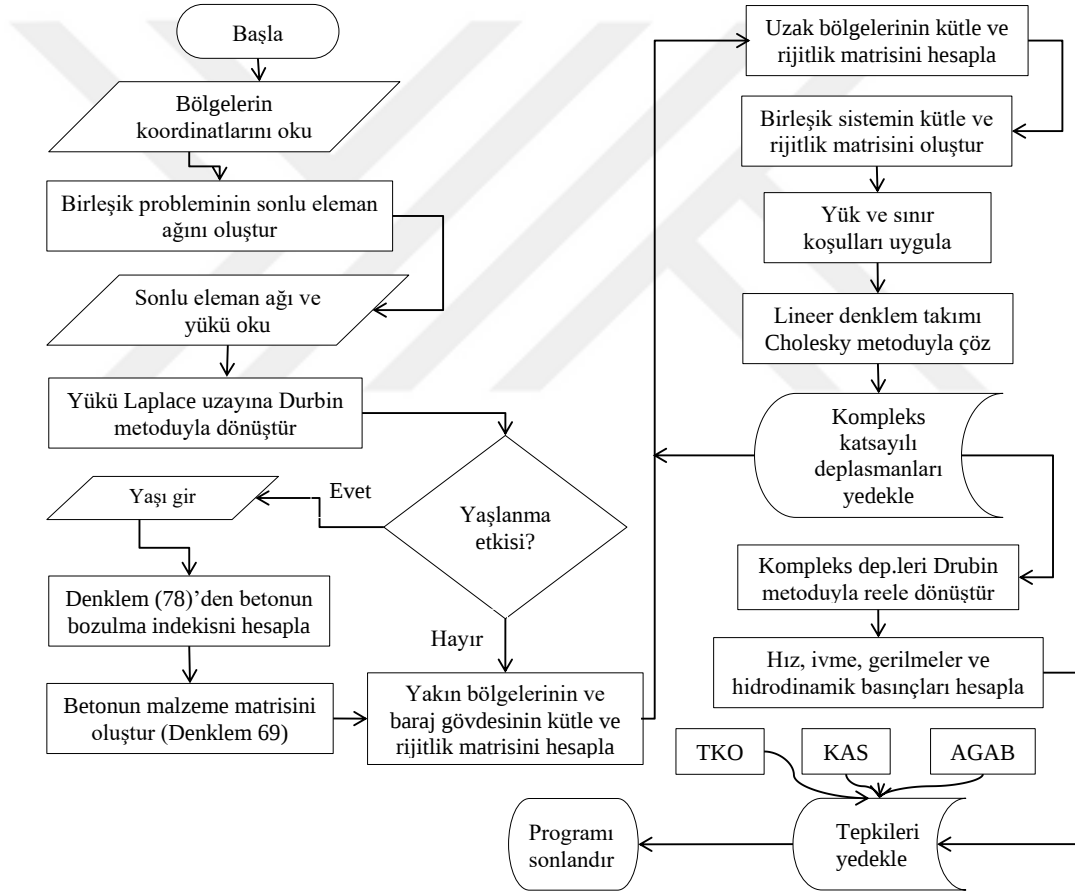
Laplace uzayındaki α dönüşüm parametresi $\alpha T=6$ olduğu varsayılmıştır (Durbin 1974), burada T deprem süresidir. Su ortamındaki kısıtlama parametresinin, su hımsel elastisite modülünün 100 katı olduğu varsayılmaktadır (Wilson and Khalvati 1983). Su ortamındaki basınç dalgaların hızı 1430 m/sn olarak ele alınmıştır. Baraj-rezervuar etkileşim probleminin sismik tepkisini hesaplama prosedürü, Şekil 50’de verilen akış şeması şeklinde açıklanmaktadır.



Şekil 48. Ölçeklendirilmemiş yer hareketi kayıtlarının yatay (Y) ve Düşey (D) bileşenleri



Şekil 49. Seçilen yer hareketi kayıtlarının ölçeklendirilmemiş ivme davranış spektrumu

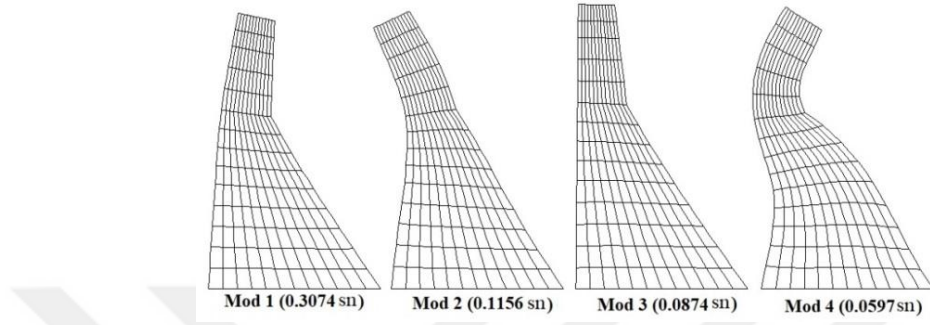


Şekil 50. Birleşik sistemin deprem yükleri altında analizi için akış şeması

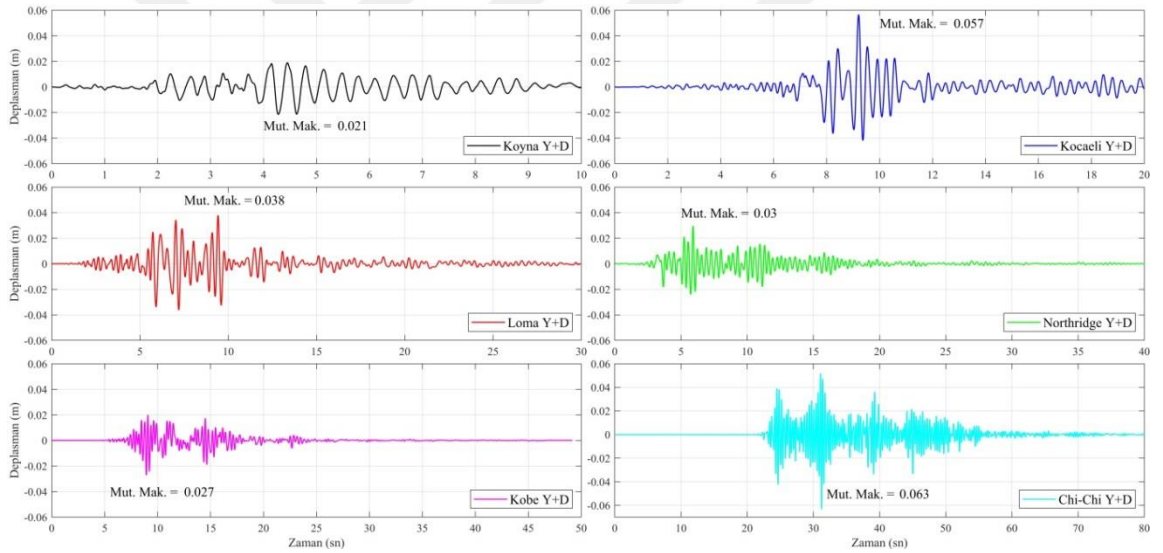
Barajın deprem yükleri altındaki davranışı

Baraj gövdesinin Denklem 32 yardımıyla serbest titreşim analizi, baraj yapısının dinamik özellikleri hakkında bilgiyi sağlar. Bunun için, baraj gövdesinin ilk dört modal periyodu mod şekilleri ile birlikte Şekil 51’de verilmiştir. Baraj gövdesinin temel periyodu, Şekil 49’da verilen Y ve D deprem tepki spektrumlarının sırasıyla yükselen ve alçalan

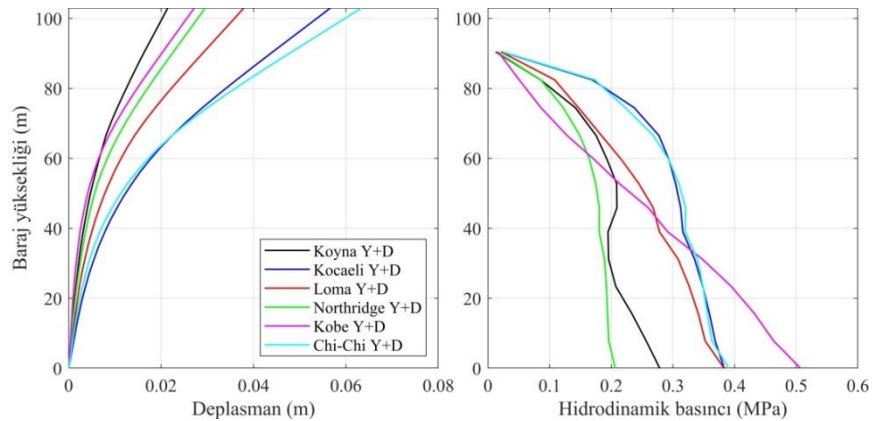
kısımında yer alan 0,3074 sn olduğu görülmüştür. Bu bilgiye göre baraj gövdesi Y deprem bileşeninden D bileşenine göre daha fazla etkilenmektedir. Bu bölümde gösterilen sonuçlar karşılık gelen deprem yükleri ile açıklanmıştır. Örneğin Koyna depreminin sadece Y bileşeni altında sismik analizi için elde edilen sonuçlar Koyna Y olarak gösterilmiştir. Benzer şekilde Koyna depreminin Y+D bileşeni altında sismik analizi için elde edilen sonuçlar ise Koyna Y+D olarak gösterilmiştir.



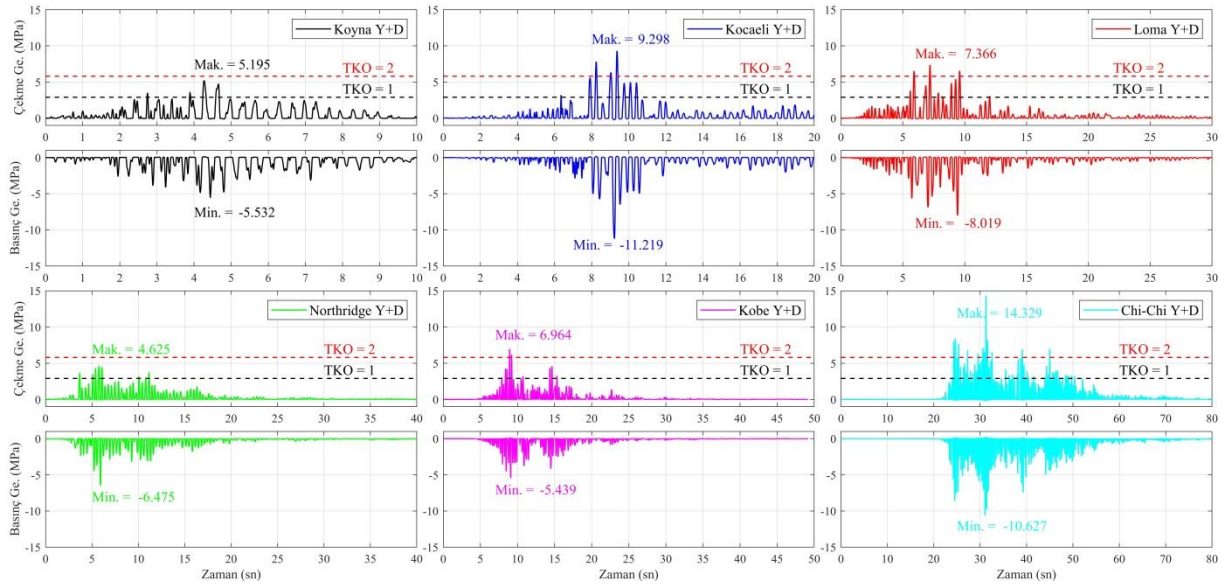
Şekil 51. Koyna barajının temel mod şekilleriyle karşılık gelen periyotları



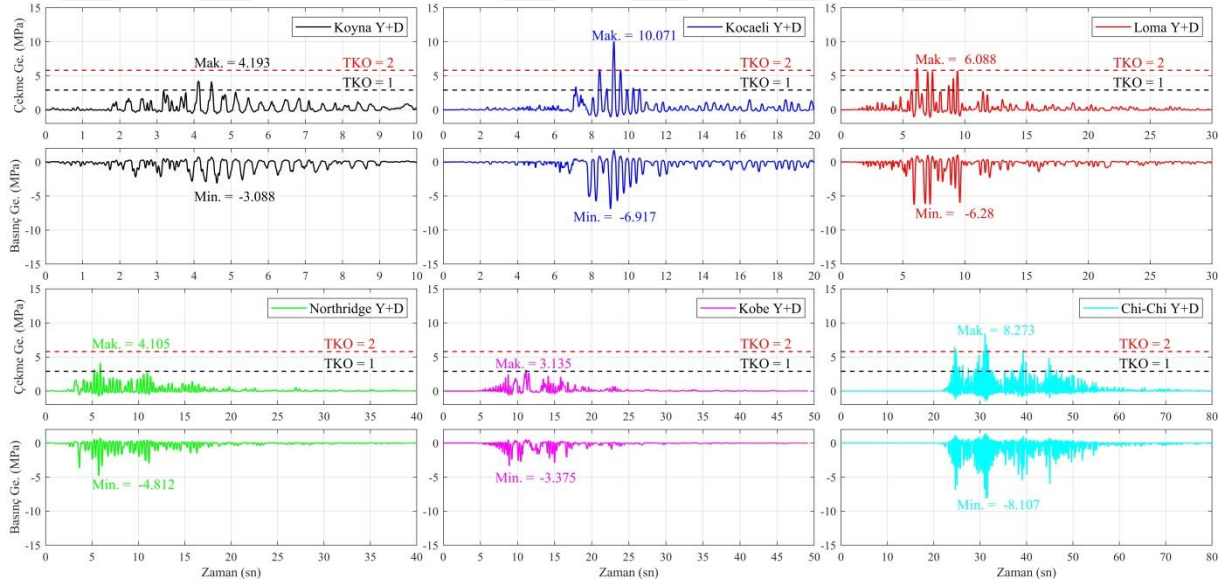
Şekil 52. Koyna barajının kret noktasındaki relötif yatay yer değiştirme-zaman grafiği



Şekil 53. Koyna barajının memba yüzeyindeki yer değiştirme ve hidrodinamik basınç tepkileri

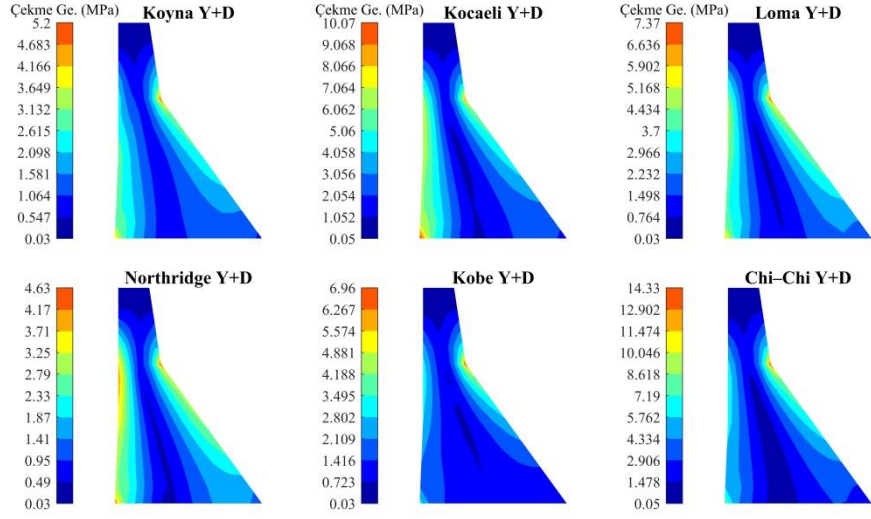


Şekil 54. Koyna barajının boyun noktasındaki çekme ve basınç gerilme-zaman grafiği

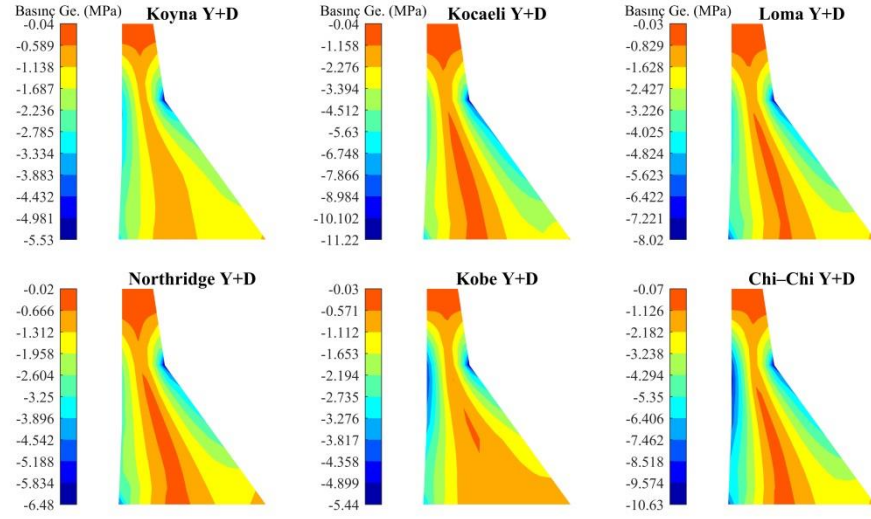


Şekil 55. Koyna barajının topuk noktasındaki çekme ve basınç gerilme-zaman grafiği

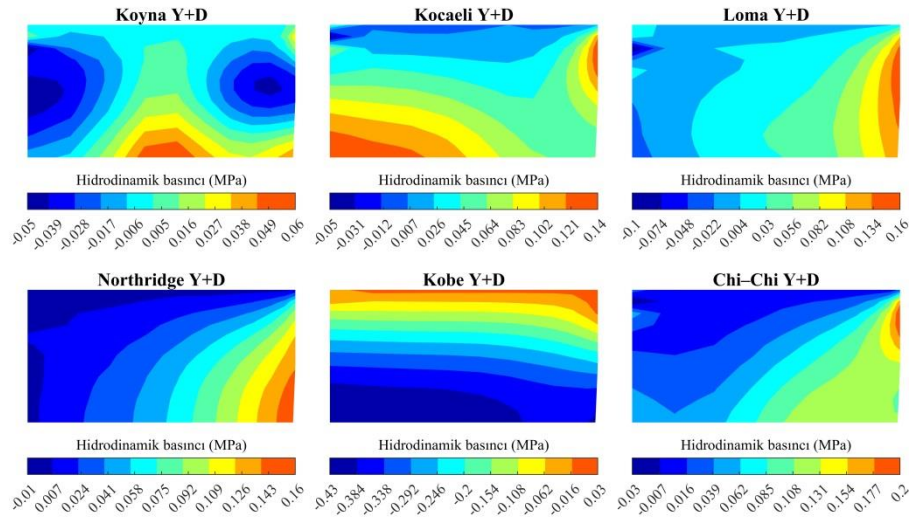
Barajın kret noktasında meydana gelen rölatif yatay yer değiştirme-zaman grafiği Şekil 52’de verilmiştir. Bu şekle göre, seçilen yer hareketi kayıtları aynı TYİ seviyesi ile normalize edilmiş olmasına rağmen, bu tepkiler farklı çıkmıştır. Her bir yer ivmesinden elde edilen tepkiler farklı olup aralarında önemli ölçüde fark vardır. (Kocaeli Y+D) ve (Chi-Chi Y+D) durumunda elde edilen mutlak maksimum tepkiler, (Koyna Y+D), (Kobe Y+D), (Northridge Y+D) ve (Loma Y+D) durumundan daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, yapıda daha fazla enerji biriktiren bu iki depremdeki deprem yükünün periyod darbesidir. Ayrıca bu şekle göre, (Koyna Y+D) ve (Kocaeli Y+D) durumlarında, depremin sonuna kadar daha yüksek deformasyonların devam ettiği de açıkça görülmüştür.



Şekil 56. Koyna barajının maksimum çekme gerilmesi konturları



Şekil 57. Koyna barajının maksimum basınç gerilmesi konturları



Şekil 58. Barajın boyun noktasındaki çekme gerilmesi maksimum olduğu andaki hidrodinamik basınç konturları

Bunun nedeni, bu depremlerin son sürelerinde de yüksek enerji darbesinden kaynaklanmaktadır. Tüm bu deprem yükleri arasında en büyük tepkiyi 80 sn süresi olan Chi-Chi deprem yükleri vermiştir. Halbuki, minimum tepki ise süresi 10 saniye olan Koyna deprem yükleri ile elde edilmiştir. Benzer davranış, mutlak maksimum yatay yer değiştirme ve hidrodinamik basınç tepkileri değerlendirilerek barajın memba yüzeyinde de gözlemlenmiştir (Şekil 53). Yine (Kocaeli Y+D) ve (Chi-Chi Y+D) durumlarında hesaplanan tepkiler büyük çıkmıştır. Ancak barajın topuğuna yakın hidrodinamik basıncın (Kobe Y+D) durumunda en büyük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, darbe tipi enerjiyi rezervuara düşey olarak aktaran dikey deprem bileşeninin önemli zaman süresine bağlıdır. Depremin önemli zaman süresi yaklaşık olarak seçilen deprem yükleri arasında en yüksek süre olan 8 sn'den-25 sn aralığındadır.

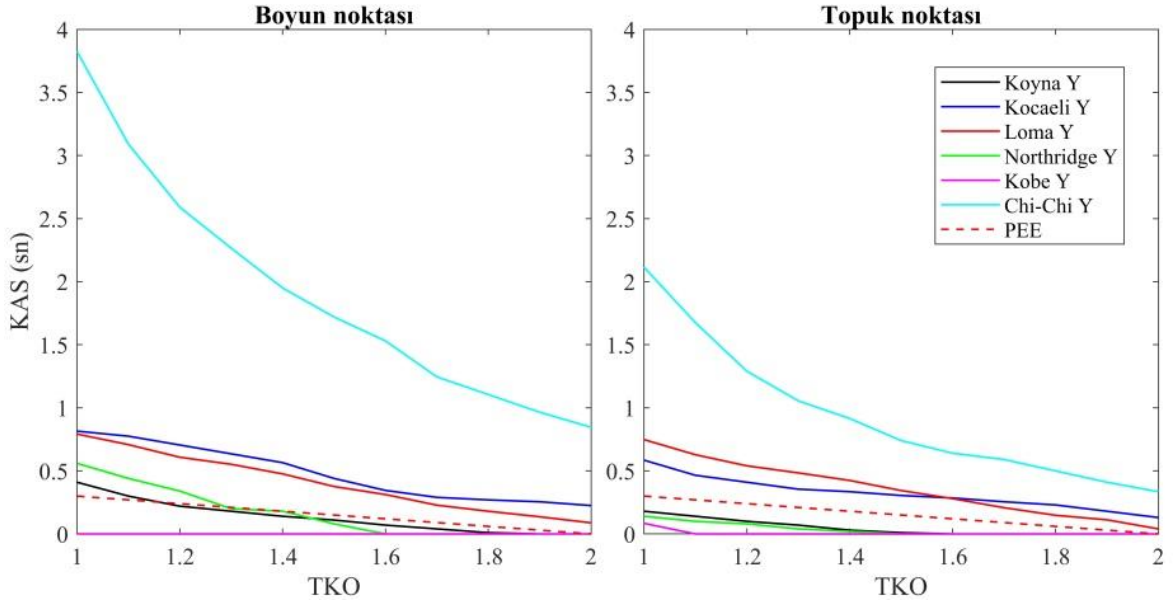
Barajın boyun ve topuğundaki çekme ve basınç gerilmesi tepkileri sırasıyla Şekil 54 ve 55'te verilmiştir. Bu şekillere göre, çoğu durumda baraj boynundaki gerilme tepkilerinin topuktakinden daha yüksek olduğu görülmüştür, çünkü gerilme tepkileri eğimin değiştiği bölgede daha çok yoğunlaşır. Dolayısıyla bu bölge barajın diğer bölgelerine göre daha fazla hasara yatkın olduğu anlaşılr. Ayrıca (Kocaeli Y+D) ve (Chi-Chi Y+D) durumlarından elde edilen gerilme tepkilerinin (Koyna Y+D), (Kobe Y+D), (Northridge Y+D) ve (Loma Y+D) durumlarından elde edilen gerilme tepkilerinden oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Çünkü Kocaeli ve Chi-Chi depremleri sisteme diğer depremlere göre daha fazla enerji aktarmaktadır. Ek olarak, aynı TYİ seviyesi için, daha uzun olan önemli yer hareketi sürelerinin, daha kısa olanlardan daha büyük gerilme tepkileri üretmesi muhtemeldir. Buna göre, daha uzun süreli önemli yer hareketi, betonun çekme dayanımını aşan daha fazla gerilme döngüsüne neden olur. Bu şekildeki çoğu durumda, baraj boynundaki çekme gerilmesi tepkileri, betonun çekme dayanımını aşmıştır, ki bu muhafazakâr bir durum değildir. Bu durumu açıkça ifade etmek için, şekilde gösterilen çekme gerilmesi tepkilerinin üzerine siyah düz çizgiler çizilmiştir ve TKO=1 ile gösterilmiştir. Hemen hemen tüm durumlar için gerilme tepkilerinin TKO=1'in üzerinde olduğu görülmüştür. Öte yandan, barajın topuk ve boyun noktalarındaki basınç gerilmesi tepkileri betonun basınç dayanımının altında olduğu görülmüştür.

Baraj gövdesindeki maksimum çekme, basınç gerilmesi tepkileri ve baraj boynundaki çekme gerilmesi tepkisinin maksimuma ulaştığı andaki hidrodinamik basıncın konturları sırasıyla Şekil 56-58'de verilmiştir. Şekil 56'ya göre, yüklerin şiddeti aynı TYİ seviyesinde olmasına rağmen, baraj gövdesindeki maksimum çekme gerilmesi dağılımının her bir deprem yüküne göre önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Şiddetli çekme gerilmesi yoğunlaşmalarının genellikle barajın boyun, topuk ve memba yüzeyindeki boğaz olmak üzere

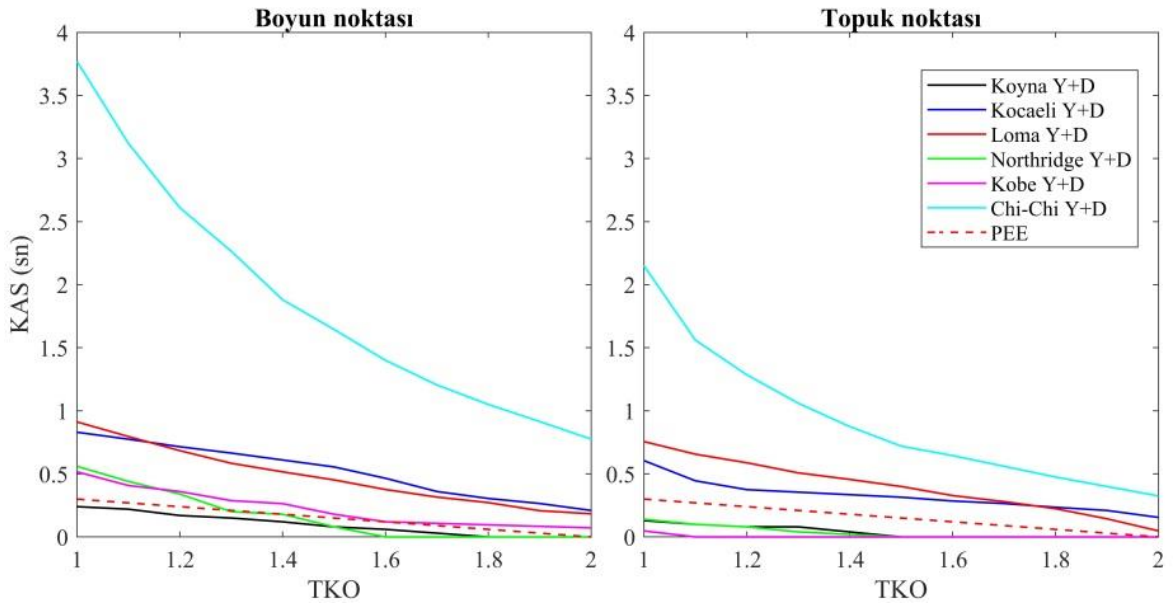
üç farklı bölgede olduğu görülmüştür. Ayrıca bu bölgelerdeki gerilme tepkilerinin genel olarak kritik durumu gösteren betonun çekme dayanımını aştığı da fark edilmiştir. (Kocaeli Y+D) ve (Chi-Chi Y+D) durumlarından elde edilen tepkiler, bütün durumlar arasında en yüksek olanıdır. Ayrıca benzer davranış barajın maksimum basınç gerilmesi konturlarında da gözlemlenmiştir (Şekil 57). Ancak tepkilerin kritik bir durum olmadığı betonun basınç dayanımının altında kaldığındandır. Rezervuar ortamındaki hidrodinamik basıncın dağılımı, barajın boynun noktasındaki çekme gerilmesi tepkisi maksimuma ulaştığında kontur grafiğiyle gösterilmiştir (Şekil 58). Bu şekle göre, rezervuar ortamındaki hidrodinamik basıncın dağılımının önemli ölçüde farklı olduğu görülmüştür. Tüm deprem yükleri arasında Chi-Chi ile elde edilen hidrodinamik basıncın en yüksek tepki olduğu görülmüştür. Tüm bu tepkileri değerlendirildiğinde, Koyna barajının önemli bölgelerinin çekme gerilmesi ve hidrodinamik basınç tepkileri gibi, aşırı tepkiler altında kaldığı ve bu bölgelerde hasarların meydana gelebileceği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, baraj gövdesinde hasar olasılığı hakkında daha fazla bilgi sahibi olmak için Koyna barajının sismik performansının incelenmesi gerekmektedir.

Barajın deprem yükleri altındaki performansı

Burada Koyna barajı sismik performansının değerlendirilmesi, daha önce açıklanan sistematik, niteliksel ve Ghanaat (2004a) tarafından sunulan yöntemle göre yapılmıştır. Bu yöntemle göre Koyna ağırlık barajının sismik performansı TKO, KAS ve AGAB parametrelerinin değerlendirilmesiyle yapılır. Değerlendirme, deprem yüklerinin Y ve Y+D bileşenleri altında doğrusal zaman tanım alanı analizinden elde edilen sonuçlarla gerçekleştirilerek sonuçlar üzerinde de karşılaştırmalı inceleme yapılmıştır. Şekil 54 ve 55'te verilen baraj gövdesi boyun ve topuk noktasındaki gerilme tepkilerine göre, barajın bu bölgeleri, seçilen deprem yükleri altında en aşırı gerilme durumlarını yaşadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle, baraja ait bu bölgelerinin performans eşik eğrileri sırasıyla Şekil 59 ve 60'ta verilmiştir. Ayrıca, seçilen deprem yükleri altında baraj kesitindeki aşırı gerilme bölgelerin değerlendirilmesi $DCR = 1$ için ve ilgili kontur grafikleri sırasıyla Şekil 61 ve 62'de verilmiştir. Şekil 59 ve 60'a bakıldığında, barajın boyun bölgesi, topuk bölgesine göre daha yüksek gerilme tepkilerini tecrübe ettiği anlaşılır. Dolayısıyla, baraj gövdesinin geneline bakılırsa, çatlaklar ilk olarak boyun noktasında meydana geldiği ve daha sonra baraj gövdesinin diğer bölgelerine doğru geliştiği tahmin edilebilir. Ayrıca, Loma Y, Kocaeli Y ve Chi-Chi Y yükleri tarafından elde edilen PEE eğrileri o bölgede ciddi hasarların oluşmasını ve kabul edilebilir PEE eşğinin üzerinde olduğunu göstermektedir.

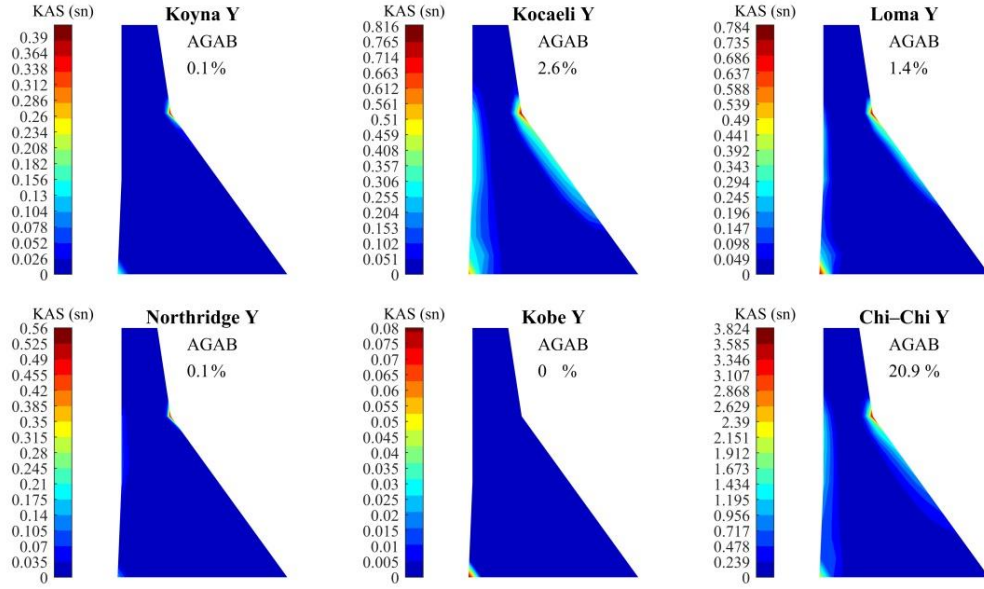


Şekil 59. Seçilen deprem yüklerinin Y bileşenleri altında Koyna barajının boyun ve topuk noktasındaki performans eğrilerinin değerlendirilmesi

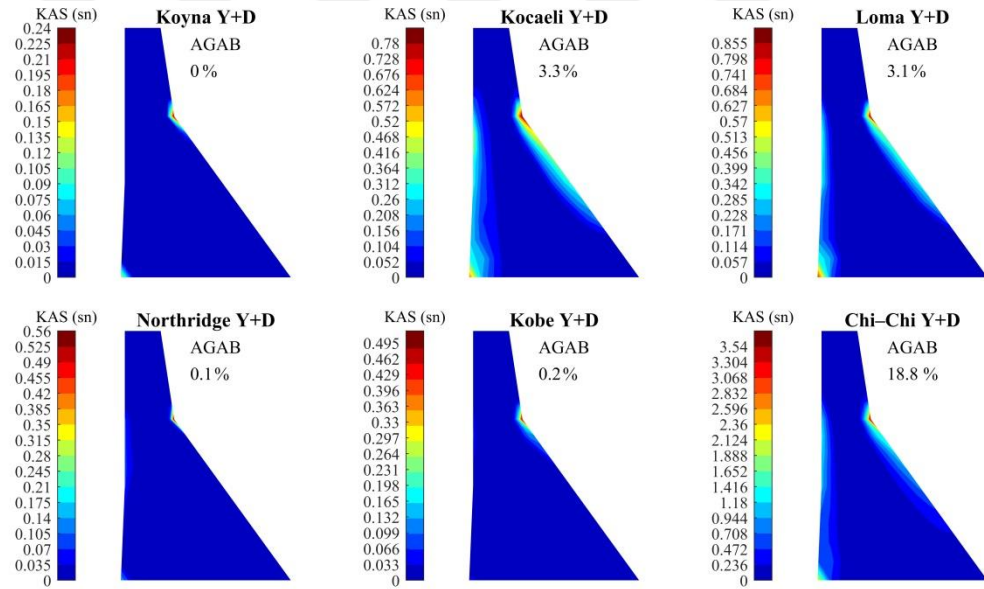


Şekil 60. Seçilen deprem yüklerinin Y+D bileşenleri altında Koyna barajının boyun ve topuk noktasındaki performans eğrilerinin değerlendirilmesi

Ancak deprem yüklerinin Y+D bileşenleri eşzamanlı olarak sisteme yüklenmesi ile Kobe Y+D, Loma Y+D, Kocaeli Y+D ve Chi-Chi Y+D durumlarında elde edilen PEE eğrileri kabul eşiğinin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu durumda, bu depremlerin D bileşeninin boyun noktasındaki kümülatif gerilme tepki süresini arttırdığı görülmüştür. DCR = 1 ve DCR= 2’de kümülatif çekme gerilmesi süresinin, Chi-Chi depreminde en yüksek olduğu görülmüştür. Bu altı addet deprem verisi arasından Chi-Chi depremi, sistemi en şiddetli bir şekilde etkileyerek betonun çekme dayanımını aşan yüksek çekme gerilme tepkilerine neden olmuştur.



Şekil 61. TKO = 1’de AGAB konturları ile Koyna barajının performans değerlendirmesi (seçilen deprem yüklerinin Y bileşeni altında)



Şekil 62. TKO = 1’de AGAB konturları ile Koyna barajının performans değerlendirmesi (seçilen deprem yüklerinin Y+D bileşeni altında)

Sonuç olarak, Chi-Chi depreminden elde edilen tepkileri değerlendirilerek, baraj gövdesinde ciddi hasarlar meydana geldiği beklenebilir. Ayrıca, Y+D deprem bileşenleri sisteme uygulandığında ufak farklılıklarla benzer davranış elde edilmiştir. AGAB kontur grafikleri değerlendirildiğinde, baraj kesitindeki aşırı gerilme bölgesi ve yüzdelikleri Koyna, Kocaeli, Loma, Northridge, Kobe ve Chi-Chi depremlerin Y bileşeni altında sırasıyla %0,1, %2,6, %1,4, %0,1, %0 ve %20,9 olarak hesaplanmıştır. Bu yüzdelikler, baraj gövdesinin Koyna, Kocaeli, Loma, Northridge ve Kobe depremleri altında AGAB’nin küçük yüzdeleri (aşırı gerilme altındaki bölgeler %15’ten azdır) nedeniyle küçük ve kabul edilebilir hasar

seviyelerine maruz kaldığını açıklamaktadır. Ancak Chi-Chi depremi durumu, baraj kesitinde izin verilen sınırın üzerinde olan aşırı gerilme bölgesinin %20,9 nedeniyle baraj gövdesinde ciddi hasarlar meydana geldiğini ifade etmektedir. Chi-Chi depreminden elde edilen tepkiler, barajın boyun, topuk ve boyun noktasının önünde memba yüzünde yer alan bazı bölgelerde çatlaklar ve derzlerin açılması gibi olası ciddi hasarların meydana geldiğine işaret etmektedir. Çatlakların oluşumu ve gelişimi ile ilgili detaylar, doğrusal olmayan analiz prosedürü uygulanarak daha iyi anlaşılabilir. Düşey deprem bileşenlerinin dahil edilmesi, yukarıda açıklanan yatay bileşenle aynı davranışı göstermektedir. Y ve Y+D deprem durumu arasındaki farkların küçük olduğu görülmüştür. Tüm bu kapsamlı sonuçlar dikkate alındığında, Koyna barajının normalize edilmiş Koyna, Kocaeli, Loma, Northridge ve Kobe deprem yüklerinin hem Y ve hem Y+D bileşenleri altındaki sismik performans değerlendirmesine göre, baraj gövdesinin düşük ile orta seviye arasında çok az hasar görme olasılığı göstermektedir. Ancak, Chi-Chi deprem yükleri altında baraj gövdesi, göçme olasılığı ile birlikte ciddi düzeyde hasar olasılığı göstermektedir.

Çeşitli deprem yükleri altında Koyna barajındaki çatlak hasarlarının başlaması ve gelişimi literatürde yapılan kapsamlı araştırmalara konu olmuştur (Chopra and Chakrabarti 1973; Ghrib and Tinawi 1995; Lee and Fenves 1998; Calayir and Karaton 2005). Bu çalışmaların sonuçları genel olarak Koyna barajının kret, topuk ve boyun noktası önünde memba yüzündeki bazı bölgeleri en çok zarar görebilecek bölgeler olduğunu açıklamıştır; ki bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyumludur. Bu nedenle, lineer zaman tanım alanı tepkilerinin niteliksel değerlendirmesi, ciddi deprem yükleri altında barajlardaki hasar seviyeleri ve konumlarının tahmini hakkında kabul edilebilir bilgiler verebildiği anlaşılmıştır.

Bu bölümde, Koyna barajının sismik performans değerlendirilmesi, hesaplanan lineer tepkileri yardımıyla yapılmıştır. Tepkiler, hem Y hem de Y+D bileşenleri dikkate alınarak altı farklı ve aynı TYİ düzeyinde normalize edilmiş deprem yükü altında elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların literatürde verilen sonuçlarla uyumlu olmasıyla birlikte aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Baraj gövdesinin temel periyodu, Y ve D deprem davranış spektrumunun sırasıyla yükselen ve alçalan kısmında yer alan 0,3074 sn olarak hesaplanmıştır. Baraj gövdesi, Y deprem bileşeninden D bileşenine göre daha fazla deformasyona uğradığını göstermektedir.
- Deprem kayıtlarının büyüklüğü aynı TYİ seviyesine normalize edilmiş olsa da, tepkilerin büyüklüğü hala farklıdır. Seçilen deprem kayıtları arasında en yüksek deformasyon tepkisini Kocaeli Y+D ve Chi-Chi Y+D vermiştir.

- En yüksek hidrodinamik basınç tepkileri, barajın topuğunda üreten deprem Kobe Y+D olmuş, çünkü bu deprem yükünün D bileşeni, önemli süresi boyunca rezervuar bölgesine daha fazla enerji aktarmaktadır.
- Koyna barajının boyun ve topuk bölgelerindeki çekme ve basınç gerilme tepkilerinin tüm deprem yükleri altında en yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle, bu bölgelerin PEE'leri seçilen deprem yüklerinin çoğunda izin verilen PEE'nin üzerinde yer alarak yüksek hasar olasılığını göstermiştir.
- Koyna, Kocaeli, Loma, Northridge ve Kobe depremlerinin sadece Y bileşenleri altında elde edilen AGAB değerleri sırasıyla %0,1, %2,6, %1,4, %0,1 ve %0 olup, baraj gövdesinde kabul edilebilir düzeyde hasar üretmektedir. Bu deprem yüklerinin Y+D bileşenleri altında sırasıyla %0, %3,3, %3,1, %0,1 ve %0,2 benzer AGAB değerleri elde edilmiştir.
- Chi-Chi depreminin Y ve Y+D bileşenleri altında baraj gövdesindeki AGAB değerleri sırasıyla %20,9 ve %18,8 olarak elde edilmiştir; ki barajın boyun, topuk ve boyun noktasının önünde memba yüzünde yer alan bazı bölgelerde ciddi hasarlara neden olmuştur.

Yaşlanan Beton Ağırlık BRE Probleminin Çeşitli Deprem Yükleri Altındaki Davranışı ve Performansı

Bu incelemede, beton ağırlık barajların çeşitli deprem yükleri altındaki sismik davranışıyla sismik performansının incelenmesi, yukarıdaki bölümlerde bahsedilen beton yaşlanma modeli kullanılarak yapılmıştır. Bir önceki incelemede seçilen altı gerçek ve 0,3 g normalize edilmiş deprem yüklerinin yatay ve düşey bileşenleri, baraj-rezervuar etkileşim probleminin rijit tabanına eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Ayrıca, deprem yüklerinin Y ve Y+D bileşenlerinin yaşlanan baraj gövdesinin sismik performansı üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Betonun zaman içerisinde bozulması, AAR ve mekanik etkiler nedeniyle meydana geldiği kabul edilmiştir. Baraj gövdesinin ömür boyunca sismik performansı ve olası hasar seviyesi, doğrusal zaman tanım alanı tepkileri kullanılarak niteliksel olarak değerlendirilmiştir. Önceki örnekte ele alınan bütün sayısal parametrelerin aynısı bu incelemede de ele alınmıştır. Baraj gövdesi olarak yine Koyna barajı seçilmiştir. Bu probleme ait sınır koşullar ve malzeme özellikleri de önceki örnekle aynısı ele alınmıştır. Bu örneğe ait sonlu eleman ağı Şekil 47'de ve seçilen deprem yüklerinin özellikleri ise Tablo 11'de verilmiştir.

Beton ağırlık barajın ömür boyunca sismik performansının değerlendirmesinde, betonun ömür boyunca çekme dayanımının tahmin edilmesi gerekmektedir. Bunun için,

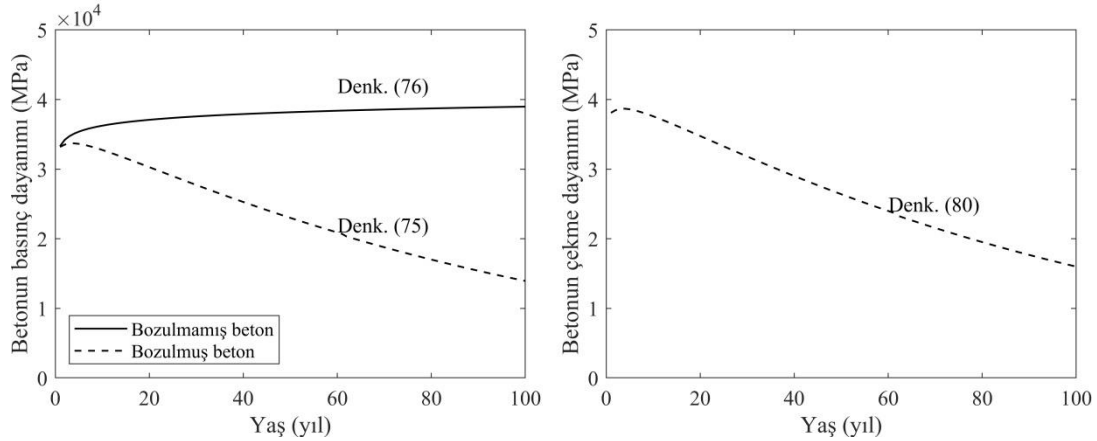
kemo-mekanik etkilerden bozulan betonun çekme dayanımı Pan *et al.* (2014) tarafından aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır;

$$F_t = F_{t0} \left(\frac{E_m}{E_0} \right) \quad (80)$$

Bu bağıntıda, E_0 , F_{t0} , E_m ve F_t , sırasıyla betonun başlangıçtaki (bozulmamış) elastisite modülü (Denklem 76), başlangıçtaki çekme dayanımı, bozulmuş betonun elastisite modülü (Denklem 75) ve bozulmuş betonun çekme dayanımıdır. Bozulmamış betonun çekme dayanımı, basınç dayanımı yardımıyla (F_c) ve Oluokun *et al.* (1991) tarafından sunulan bağıntıyla hesaplanabilmektedir,

$$F_{t0} = 0,294 F_c^{0,69} \quad (81)$$

Bu incelemede bozulmamış betonun basınç dayanımı 36,3 MPa olarak ele alınmıştır. Birleşik problemin sismik davranışıyla sismik performans 0 yıl, 50 yıl ve 75 yıl olmak üzere 3 farklı yaşta incelenmiştir. Betonun baraj ömrü boyunca bozulan ve bozulmayan elastisite modülüyle bozulan çekme dayanımı sırasıyla Denklem 75, 76 ve 80 yardımıyla hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Şekil 63'te gösterilmiştir. Bu şekle göre, kemo-mekanik etkiler nedeniyle betonun ömür boyunca elastik modülü ve çekme dayanımının önemli ölçüde azaldığı açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar baraj-rezervuar etkileşim probleminin sismik analizinde ve performans değerlendirmesinde girdi parametresi olarak kullanılmıştır.

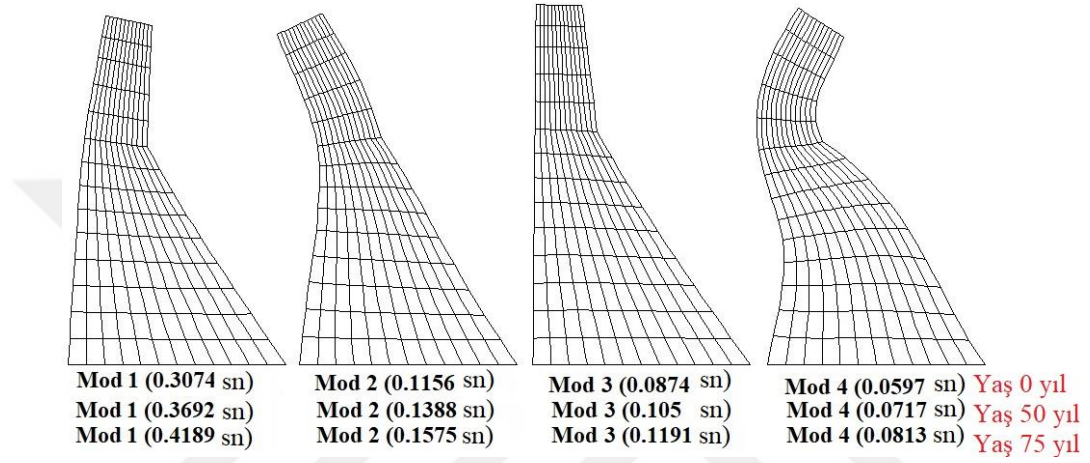


Şekil 63. Betonun mekanik özelliklerinin 100 yıl boyunca değişimi

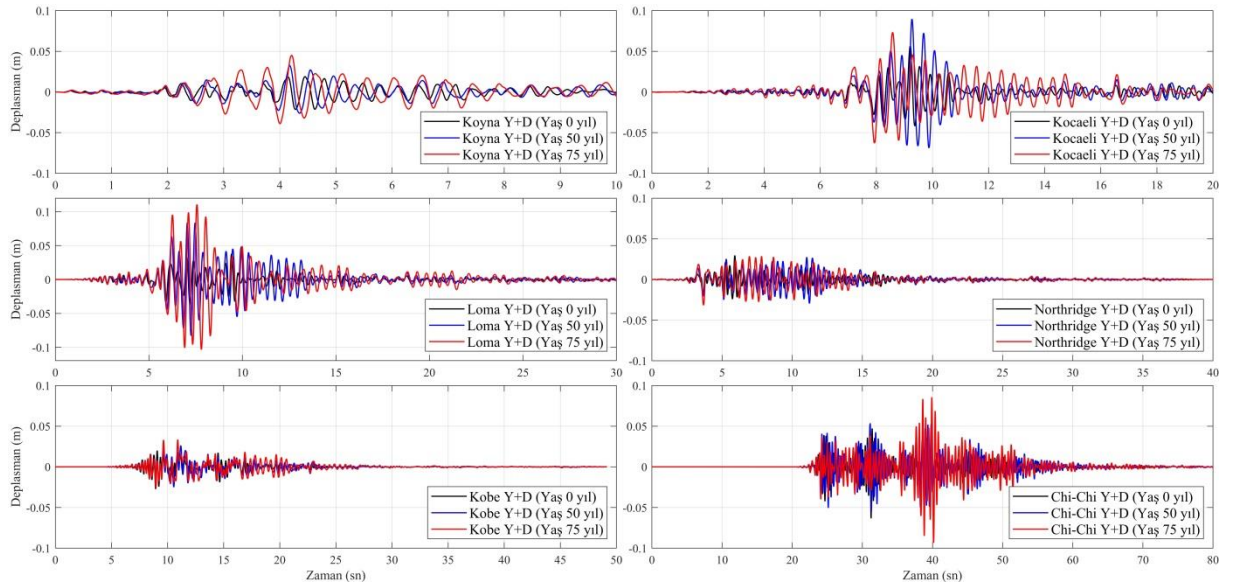
Yaşlanan barajın deprem yükleri altındaki davranışı

Baraj gövdesinin Denklem 32 yardımıyla serbest titreşim analizi, baraj yapısının dinamik özellikleri hakkında bilgiyi verir. Bu nedenle yaşlanan baraj gövdesinin ilk dört modal periyodu mod şekilleri ile birlikte Şekil 64'te verilmiştir. Bu şekle göre, yaşlanan beton baraja ait mod şekilleri ömür boyunca aynı olduğu ancak modal periyotlarının yaşlanmadan

dolayı uzadığı görülmüştür. Baraj gövdesinin seçilen yaşlara göre temel periyotlarının 0,3074-0,4189 sn aralığında olduğu görülmektedir. Bu aralık, sırasıyla Şekil 49’da verilen Y ve D deprem tepki spektrumunun artan ve azalan kısmında yer almaktadır. Bu bilgiye göre baraj gövdesi yatay deprem bileşeninden düşey bileşene göre daha fazla etkilendiği anlaşılmıştır. Bu bölümde de gösterilen sonuçlar ilgili deprem yükleri ile açıklanmıştır. Örneğin Koyna depreminin sadece Y bileşeni altındaki sonuçlar Koyna Y olarak gösterilmiştir. Benzer şekilde Koyna depreminin Y+D bileşeni altındaki sonuçlar ise Koyna Y+D olarak gösterilmiştir.



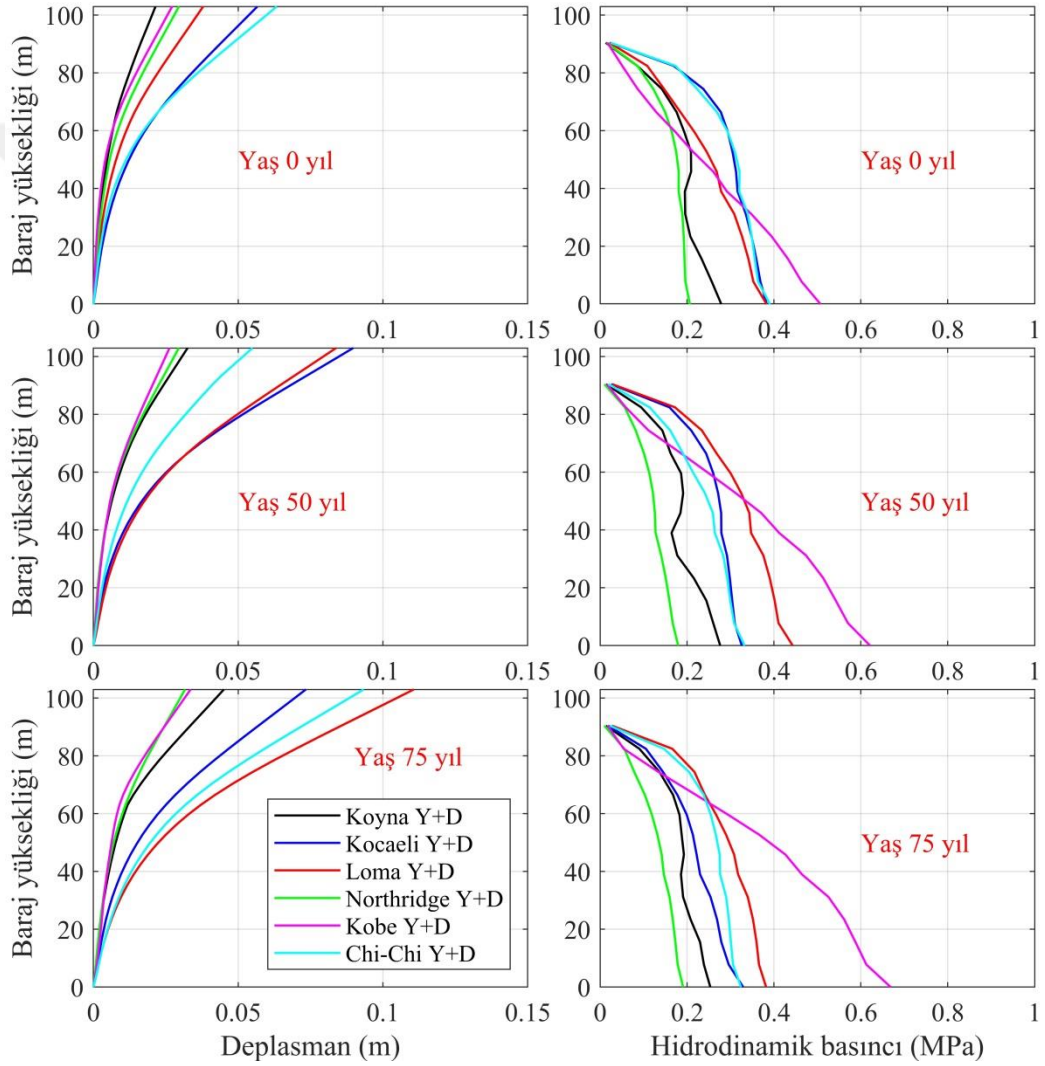
Şekil 64. Koyna barajının farklı yaşlarındaki temel periyotları ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri



Şekil 65. Koyna barajının farklı yaşlarındaki kret noktasının yatay yer değiştirme-zaman grafiği

Seçilen deprem yüklerinin etkisi altında Koyna barajının farklı yaşlarındaki kret noktasının yatay yer değiştirme zaman grafiği Şekil 65’te verilmiştir. Bu şekle göre, deprem kayıtlarının TYİ’leri aynı seviyede olmasına rağmen deplasman tepkileri tamamen farklı

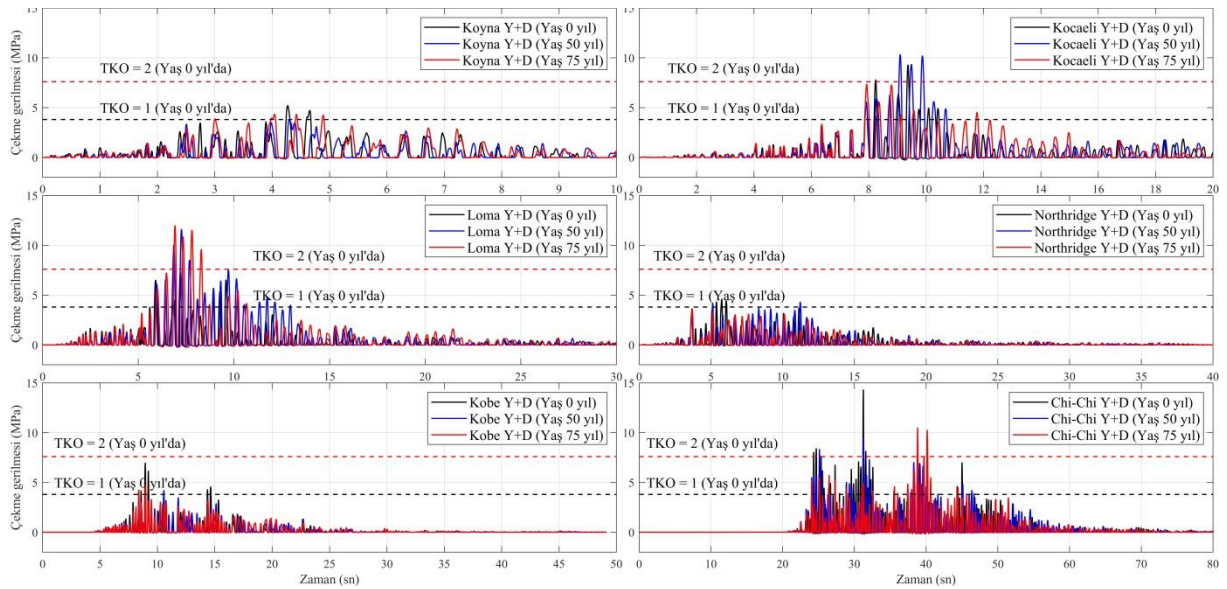
olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca her yaşa ait tepkiler de farklı olduğu ve ileri yaşlarda önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, betonun elastisite modülünde azalma eğilimine neden olan kemo-mekanik eylemlerdir ve baraj gövdesi daha esnek hale gelerek deplasmanlar artmıştır. Önemli deprem süresi kadar depremlerin toplam süresi, tepki üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Yani, depremlerin yapıyı en çok etkileyebildiği bir önemli deprem süresi vardır. Bu sürenin uzun olması yapıda büyük deformasyonlarla birlikte büyük gerilme tepkilerine neden olur. Tüm bu deprem yükleri arasında Kocaeli, Loma ve Chi-Chi yer hareketleri sisteme daha fazla enerji aktararak daha büyük deformasyonlar üretmiştir. Diğer taraftan ise Kobe depremi minimum deplasman tepkisi üretmiştir.



Şekil 66. Koyna barajının farklı yaşlarında memba yüzündeki mutlak maksimum yer değiştirme ve hidrodinamik basınç tepkileri

Baraj gövdesinin memba yüzündeki mutlak maksimum yatay deformasyon ve hidrodinamik basınç tepkileri Şekil 66'da verilmiştir. Bu şekle göre, tepkiler genellikle betonun bozulmasıyla bir artış trendi göstermiştir. Normalize edilmiş deprem yükleri altında elde edilen bu tepkilerin büyüklükleri de farklı çıkmıştır, çünkü her bir deprem, birleştirilmiş

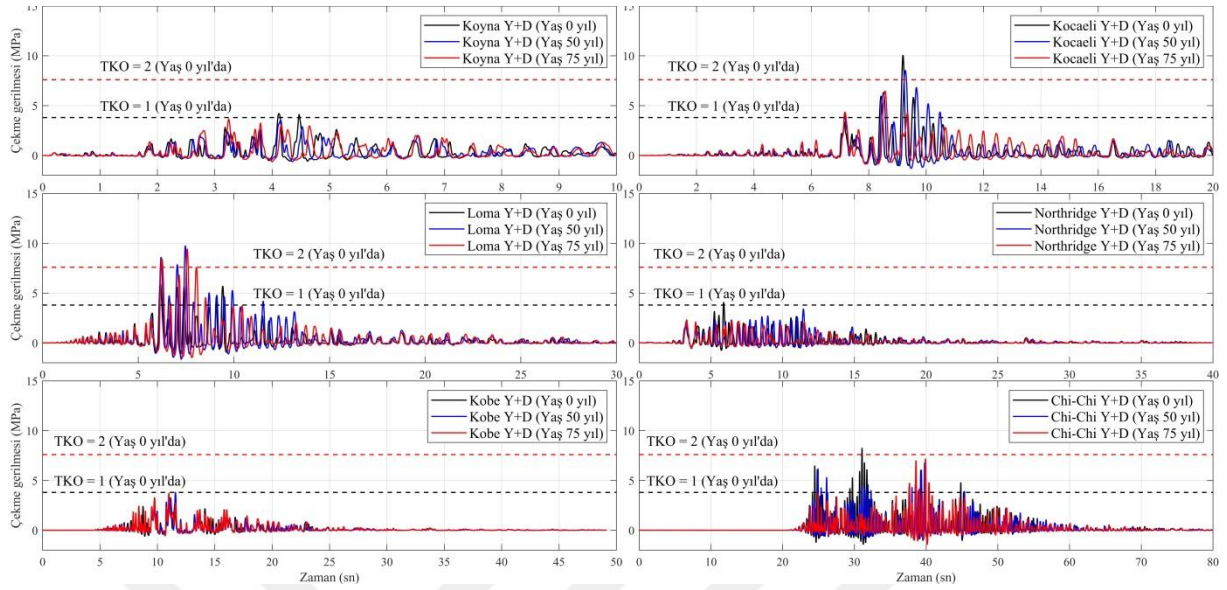
sistemi etkileyecek kendi davranış ve özellikleri vardır. Ayrıca, barajın her yaşı için en yüksek yer değiştirme tepkisini veren belirli bir deprem yükü olduğu görülmüştür. Örneğin 0 yaşında Chi-Chi depremi, 50 yaşında Kocaeli ve 75 yaşında ise Loma depremidir. Bu gerçeklik, baraj gövdesinin o yaştaki temel periyoduna bağlı olmasıdır. Baraj gövdesinin o yaştaki temel periyodu, deprem ivmesi davranış spektrumunun yükselen kısmında yer alıyorsa, tepkiler önemli olup dolayısıyla büyüklükleri de artar. Ancak baraj gövdesi memba yüzündeki hidrodinamik basınçların bu durumdan etkilenmediği görülmüştür. Her yaşta en yüksek tepkiyi Kobe deprem yükleri altında elde edilmiştir. Bu durumun nedeni, seçilen kayıtlar arasında en uzun ve önemli deprem süresi yüksek olan Kobe depremindeki D bileşeninin etkisi olmasıdır. Böylece, depremlerin düşey bileşeninin hidrodinamik tepkiler üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.



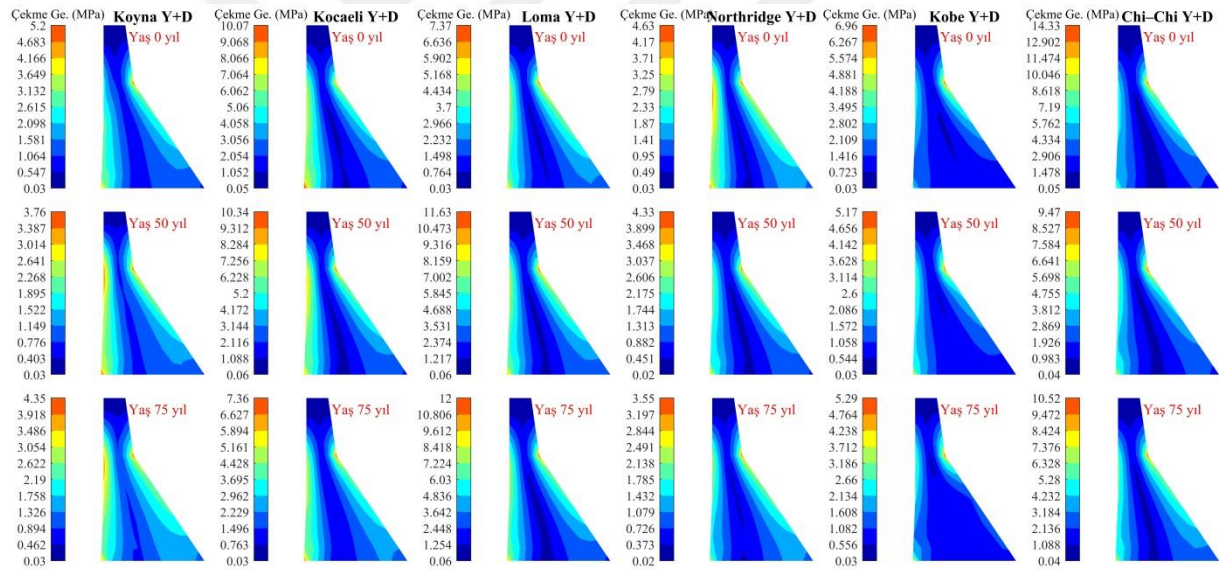
Şekil 67. Koyna barajının boyun noktasındaki çekme gerilmesi-zaman grafiği, farklı yaşlarda

Baraj gövdesinin boyun ve topuk noktasına ait çekme gerilmesi-zaman grafiği, barajın farklı yaşları için sırasıyla Şekil 67 ve 67’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu tepkilere göre, barajın boyun noktasındaki gerilmelerin büyüklüğü, topuk noktasındakinden daha büyük olduğu görülmüştür. Yer hareketlerinin şiddeti aynı seviyede normalize edilmiş olmasına rağmen, her bir deprem yükünden elde edilen tepkilerin farklı olduğu görülmüştür. Ayrıca ileri yaşlarda hesaplanan bu tepkiler, erken yaşta hesaplanan tepkilere göre farklılık göstermiştir. Boyun noktasında hesaplanan gerilmelerin, betonun ömür boyunca bozulması artmasıyla azalma veya artırma konusunda karar vermek zor olsada, barajın topuk noktasındaki bu tepkiler hep azalım göstermiştir. Bunun nedeni, gerilme tepkilerini artıran D deprem bileşeninin etkisi olduğu düşünülmüştür. Beton ne kadar bozulursa, topuk noktasında o kadar az gerilme tepkisi elde edildiği görülmüştür. Şekil 65-68’de verilen sonuçlara genel

olarak bakılırsa, betonun ömür boyunca bozulmasının deformasyonların artmasına ve gerilme tepkilerinin azalmasına neden olduğu söylenebilir.



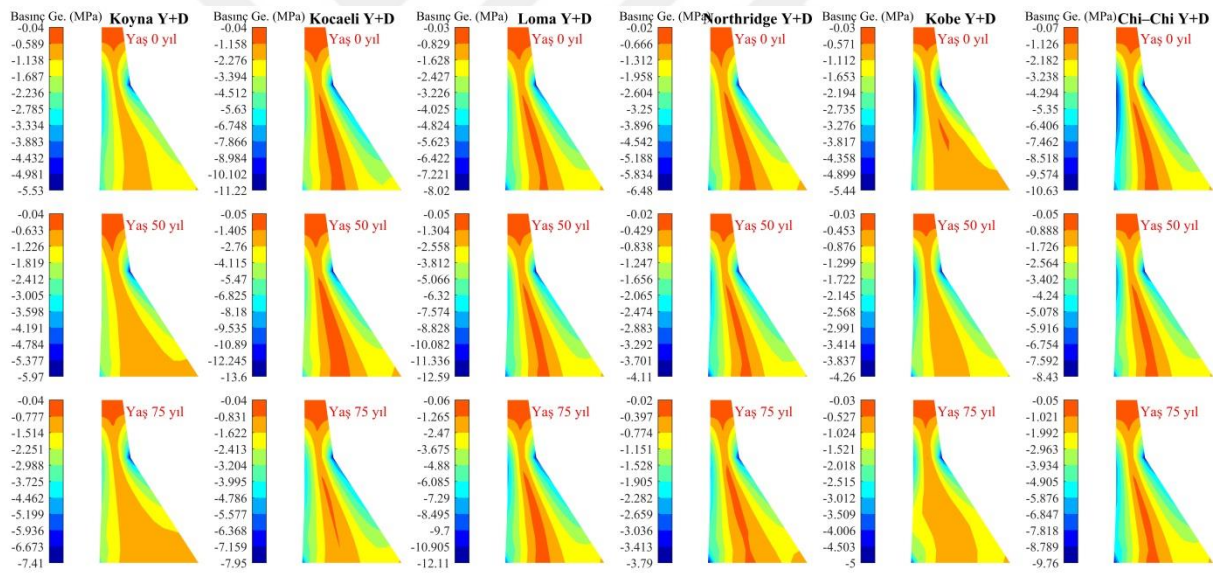
Şekil 68. Koyna barajının topuk noktasındaki çekme gerilmesi-zaman grafiği, farklı yaşlarda



Şekil 69. Koyna barajının farklı yaşlarındaki maksimum çekme gerilmesi konturları

Baraj gövdesinde meydana gelen maksimum çekme ve basınç gerilmesi tepkilerinin kontur çizimleri sırasıyla Şekil 69 ve 70'te verilmiştir. Bu tepkilere göre, barajın ileri yaşlarında gerilme tepkilerinin farklı olduğu açıkça ortaya konmuştur. Genel olarak çekme gerilmesi tepkilerinin farklı yaşlarda betonun çekme dayanımını aştığı görülmüştür. Bununla birlikte, basınç gerilmesi tepkilerinin betonun basınç dayanımının altında olduğu görülmektedir. Bu tepki, çekme gerilmesi tepkisinin aksine muhafazakâr bir tepkidir. Çekme gerilmesi tepkilerinin betonun çekme dayanımını aşılması, baraj gövdesinde çatlakların, derz açılmasının ve diğer hasarların oluşmasına neden olur. Ayrıca bu tepkilerin geneline

bakılırsa, betonun bozulmasıyla birlikte ileri yaşlarda gerilme tepkilerinin azaldığı görülmektedir. Ancak bazı ileri yaşlarda gerilme tepkilerinin erken yaş tepkilerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, baraj gövdesinin o yaştaki temel periyoduna ve deprem yüklerinin ivme davranış spektrumu ile olan ilişkisine bağlıdır. Baraj gövdesinin o yaştaki temel periyodu, ivme davranış spektrumunun yükselen kısmında yer alıyorsa, hesaplanan tepki önceki yaştan daha yüksek olur. Aksi takdirde, hesaplanan tepki daha önceki yaştan daha küçük olur. Benzer durum, basınç gerilmesi tepkisi için de geçerli olduğu görülmüştür. Ayrıca bu şekillere göre aşırı gerilme tepkilerinin genellikle barajın boyun, topuk ve boyun noktasının önündeki bazı bölgelerde (memba yüzünde) meydana geldiği açıkça görülmüştür. Bu durumun nedeni, baraj kesitinin gerilme tepkilerini bu bölgelerde yoğunlaştıran geometrisine bağlıdır. Yukarıda verilen tepkilerin değerlendirilmesiyle Koyna barajının ileri yaşlarındaki tepkiler barajın dayanıksızlığına ve büyük hasar görebileceğine işaret eder. Bu nedenle baraj gövdesinin sismik performansının değerlendirilmesi gerekli bir konu olduğu düşünülerek bir sonraki başlık altında incelenmiştir.

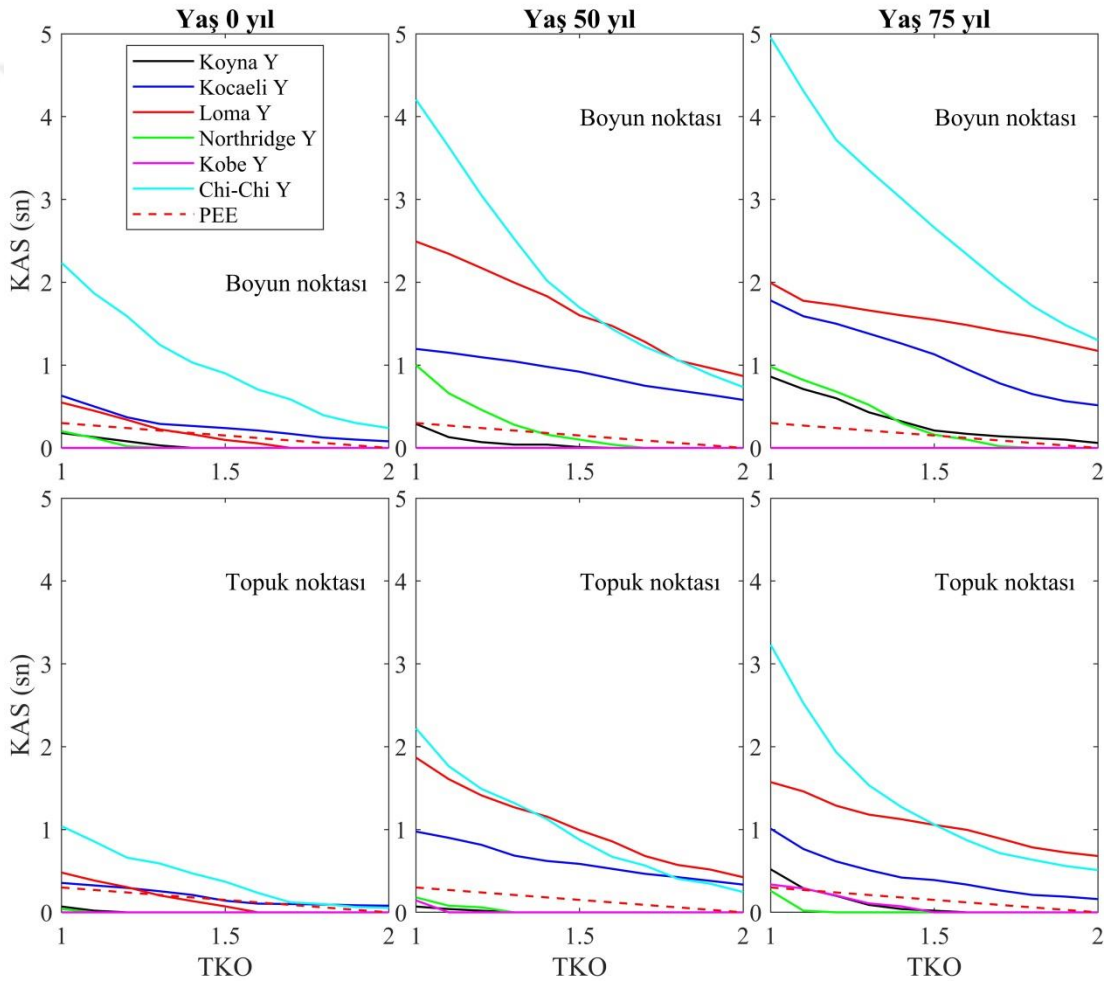


Şekil 70. Koyna barajının farklı yaşlarındaki maksimum basınç gerilmesi konturları

Yaşlanan barajın deprem yükleri altındaki performansı

Şiddetli deprem hareketlerinde beton barajlardaki çekme gerilmesi, malzemenin çekme mukavemetini genellikle aşar. Bu nedenle barajların sismik performans değerlendirmesi birçok araştırmacı tarafından doğrusal ve doğrusal olmayan teoriler (Ghanaat 2004b; Bayraktar *et al.* 2010; Wang *et al.* 2015; Gorai and Maity 2021; Wang *et al.* 2021) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca betonun doğrusal olmayan davranışı birçok araştırmacı tarafından betonun çekme çatlaması davranışı yardımıyla incelenmiştir. Betondaki çatlak oluşumu, ayırık çatlak yaklaşımı veya lekeli çatlak yaklaşımı kullanılarak tahmin

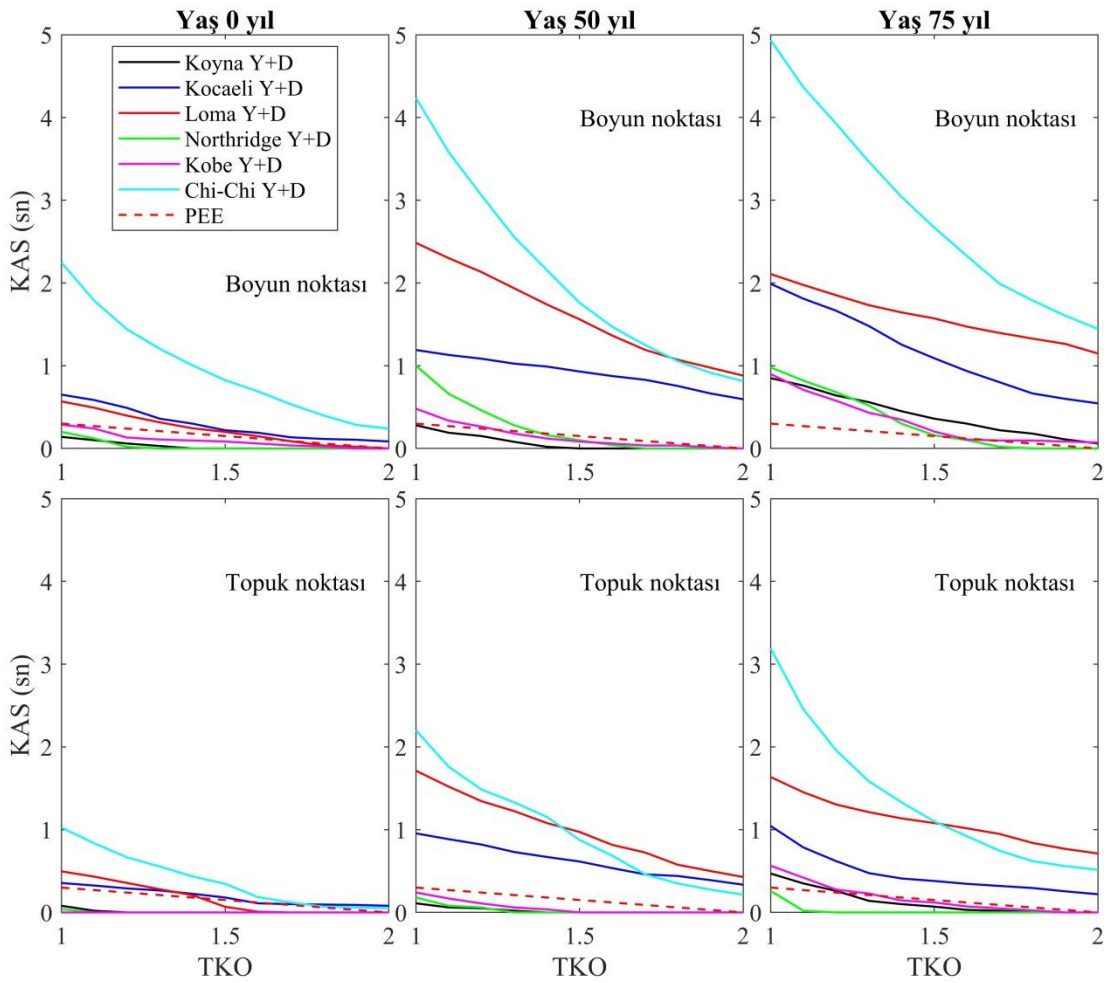
edilebilir. Bunun dışında hasar plastisite modeli, beton barajların doğrusal olmayan davranışını simüle etmek için en bilinen modeldir. Literatürde, aynı girdi parametreleri için farklı sonuçlar veren birkaç modelin geliştirildiği ve doğrusal olmayan bir analizin büyük hesaplama çabası ve maliyeti gerektirdiği açıktır. Böylece, Ghanaat (2002) ve Ghanaat (2004b) tarafından önerilen yöntem, daha az hesaplama çabası ile doğrusal zaman tanım alanı tepkilerini kullanarak baraj gövdesinin olası hasar seviyelerini tahmin etmek mümkün olmuştur. Bu lineer değerlendirme yöntemi önceki bölümlerde açıklandığı TKO, KAS ve AGAB'ye dayalıdır. Bu yöntem ayrıca USACE kılavuzunda (USACE 2003) yer almaktadır ve çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır (Ghanaat 2004b; Bayraktar *et al.* 2010; Wang *et al.* 2015; Gorai and Maity 2021; Wang *et al.* 2021).



Şekil 71. Seçilen farklı yer hareketi altında (sadece yatay bileşeni) Koyna barajının boyun ve topuk noktasına ait farklı yaşlarındaki performans eğrilerinin karşılaştırılması

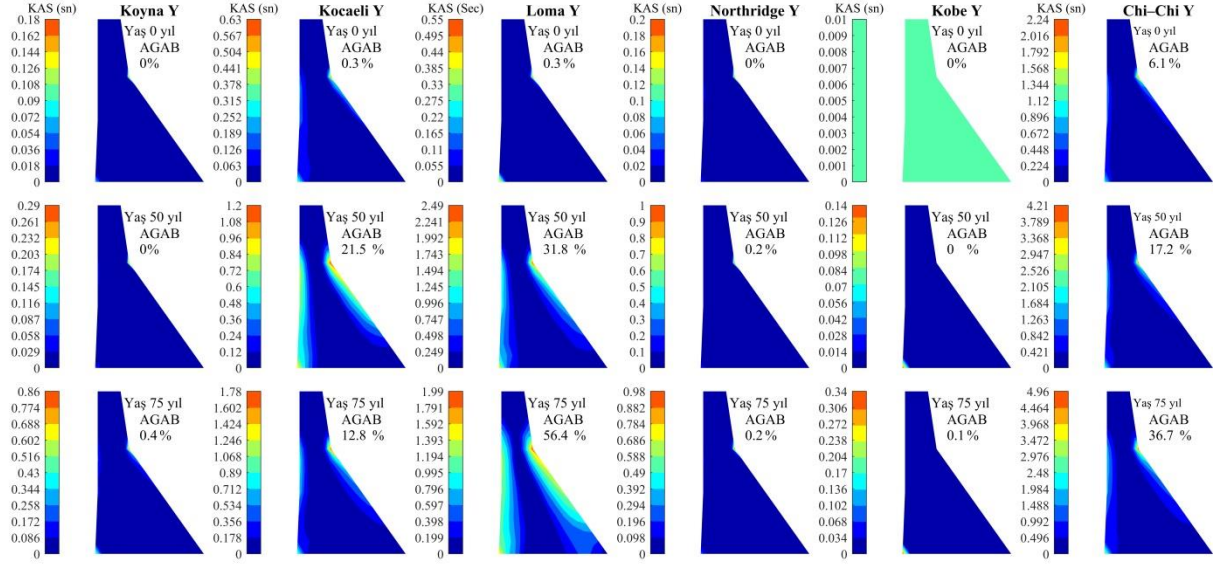
Bir önceki bölümde elde edilen sonuçlara göre, baraj gövdesinin boyun ve topuğuk noktasındaki gerilme tepkilerinin yoğunlaşması, o yaştaki betonun çekme dayanımının üzerinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle, Şekil 71 ve 72, sırasıyla seçilen deprem yüklerinin Y ve Y+D bileşenleri altında ve farklı yaşlarda elde edilen boyun ve topuk noktalarına ilişkin

performans eğrilerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Bu şekillere göre, boyun noktasındaki gerilme sapmalarının büyüklüğünün (KAS) topuk noktasındakinden daha yüksek olduğu görülerek baraj kesitinde çatlakların (hasarların) başlangıcını işaret eder. Tüm bu deprem yükleri arasında Chi-Chi depremi ile elde edilen performans eğrilerinin barajın tüm yaşı boyunca kritik olduğu ve PEE eğrisinin üzerinde kaldığı görülmüştür. Buna göre, KAS değeri barajın yaşıyla birlikte arttığı ve PEE eğrisinin üzerinde kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, barajın boyun ve topuk noktaları TKO=1 ve TKO=2'ye karşılık gelen gerilme talebinin ötesinde kalarak barajın sonraki yaşlarında daha fazla hasar göreceğini belirtmektedir. Bu durum Chi-Chi depreminin diğer depremlere göre daha fazla hasar verdiğine işaret etmektedir. Ancak Koyna, Northridge ve Kobe deprem yükleri altında elde edilen performans eğrilerinin, bu bölgelerde küçük hasarlara sebep olmuştur. Bu depremler altında elde edilen performans eğrileri, PEE'nin hemen hemen altında olduğu görülmektedir. Ayrıca, betondaki bozulmanın artmasıyla gerilme sapmalarının arttığı da görülmüştür.

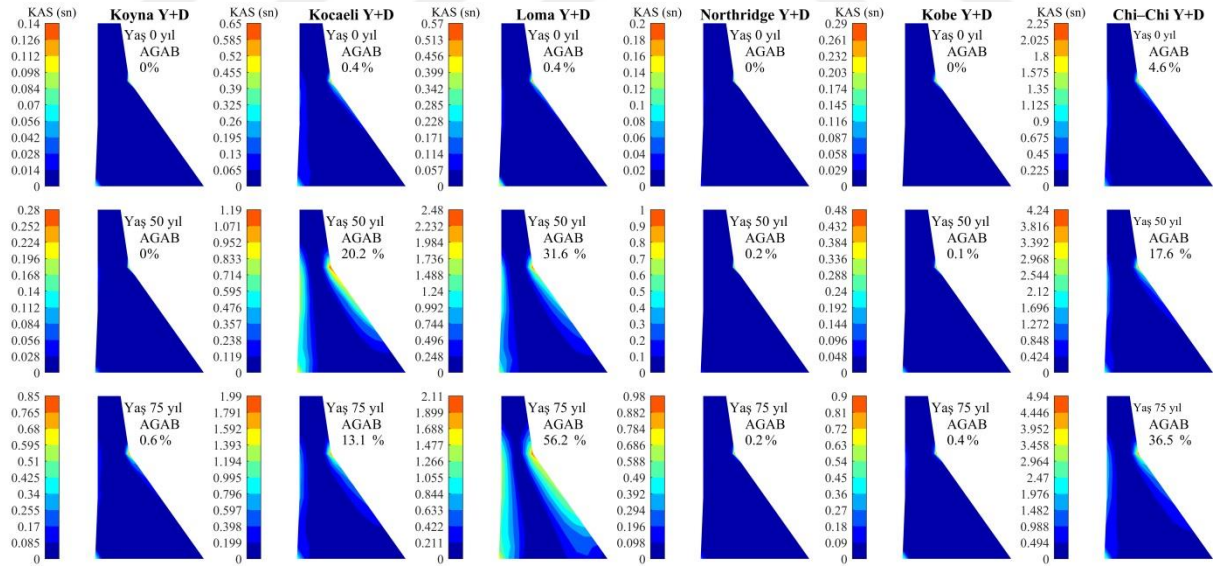


Şekil 72. Seçilen farklı yer hareketi altında (yatay+düşey bileşeni) Koyna barajının boyun ve topuk noktasına ait farklı yaşlarındaki performans eğrilerinin karşılaştırılması

Seçilen deprem yüklerinin Y ve Y+D bileşenleri altındaki yaşlanan Koyna barajına ait aşırı gerilme altında bölgelerinin kontur grafikleri, sırasıyla Şekil 73 ve 74'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu sonuçlara göre seçilen depremlerin D bileşeninin AGAB üzerindeki etkisinin küçük olduğu görülmüştür. Analizde seçilen deprem yüklerinin D bileşeni dikkate alındığında AGAB'de küçük bir değişiklik meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 73. Koyna barajının TKO = 1 için AGAB'nin kontur çizimleri (seçilen deprem yüklerinin Y bileşeni altında)



Şekil 74. Koyna barajının TKO = 1 için AGAB'nin kontur çizimleri (seçilen deprem yüklerinin Y+D bileşeni altında)

Barajın topuk ve boyun noktasında 0 yaşında küçük çatlaklar oluşturan tek bir deprem yükü vardır, o da Chi-Chi depremidir. Bu noktalarda deprem yükleri altında elde edilen performans eğrileri genel olarak PEE'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu durum çatlakların ileriki yaşlarda daha derine ilerleyeceğine işaret etmektedir. Sonuç olarak 50 yaşında barajın

topuk ve boyun bölgesinde belirgin çatlaklar ve ciddi hasarlar görülebilir. Ayrıca, barajın 75 yaşlarında, boyun noktasının altında memba yüzünde yer alan bölgede de daha fazla çatlakların geliştiği tesbit edilmiştir. Koyna barajının Chi-Chi depremin H bileşeni altındaki AGAB değerleri 0, 50 ve 75 yaşlarında sırasıyla %6,1, %17,2 ve %36,7 olarak hesaplanmıştır. Ancak bu depremin Y+D bileşeni altındaki bu değerler 0, 50 ve 75 yaşlarında sırasıyla %4,6, %17,6 ve %36,6 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre baraj gövdesi, 0 yaşında AGAB değeri için küçük/kabul edilebilir düzeyde hasar gördüğü anlaşılmıştır. Daha sonraki yaşlarda, AGAB değerlerinin izin verilen değeri olan %15'ten büyük olması ciddi hasar olasılığını göstermiştir. Loma depreminin Y ve Y+D bileşeni altında da barajın ileri yaşlarında benzer sonuçlar daha büyük hasarla elde edilmiştir. Deprem yükünün Y bileşeni altındaki AGAB değerleri bu deprem kaydı için %31,8 (50 yaşta) ve %56,4 (75 yaşta) olarak bulunurken, Y+D bileşeni altında bu değerler %31,6 (50 yaş) ve %56,2 (75 yaşta) elde edilmiştir. Bu AGAB değerleri izin verilen %15'lik değerinin üstünde olduğundan kabul edilemez bir durumdur. Bu nedenle baraj gövdesinde uzun derinlikte çatlaklar oluştuğu anlaşılmıştır. Hatta barajın yıkılma olasılığını da göstermektedir. Ayrıca barajın ileriki yaşlarında Kocaeli deprem yükleri ile de ilginç sonuçlar elde edilmiştir. Bu deprem altındaki sonuçlara göre, barajın 50 yaşında AGAB değeri %21,5 (kabul edilemez), 75 yaşında ise %12,8 (kabul edilebilir) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar Kocaeli depreminin hem Y hem de Y+D durumları için geçerlidir. Bunun nedeni barajın o yaştaki temel periyodunun Kocaeli ivme davranış spektrumundaki yer aldığı konumuna bağlıdır. Sonuçlar, barajın 50 yaşındaki temel periyodunun (0,3692 sn) Kocaeli ivme tepkisi spektrumunun yükselen kısmında, 75 yaşındaki barajın temel periyodunun (0,4189 sn) alçalan kısmında yer aldığını açıklığa kavuşturmaktadır. Diğer taraftan, Koyna, Northridge ve Kobe depremlerinin Y ve Y+D bileşenleri altında elde edilen Koyna barajının farklı yaşlarındaki AGAB değerlerinin izin verilen %15'lik sınırının altında olduğu görülmüştür. Bu deprem yükleri altında baraj gövdesi küçük/kabul edilebilir düzeyde hasar görmüştür. Sonuç olarak, bu deprem yükleri altında, Koyna barajındaki hasar seviyesinin niteliksel değerlendirmesi ile doğrusal zaman tanım alanı analizi, kritik koşulları tahmin etmek için oldukça uygun bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, Chi-Chi, Kocaeli ve Loma deprem yükleri altında, baraj gövdesindeki çatlakların yanı sıra baraj yıkılmasını kesin olarak tahmin etmek için doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinin yapılması daha iyi sonuçlar verir. Chi-Chi, Kocaeli ve Loma yer hareketi ile aynı özelliklere sahip deprem yükleri, özellikle barajın ileriki yaşlarında ciddi hasarlara yol açmıştır. Dolayısıyla bu tip depremlerin var olan yaşlanan barajların dinamik tepkilerini değerlendirmek için gerekli bir konu olduğu anlaşılmıştır.

Bu bölümde, yaşlanan Koyna beton ağırlık barajının çeşitli deprem yükleri altındaki davranışının ve sismik performansının değerlendirmesi yapılmıştır. Birleşik sistemin sismik tepkileri, hem Y hem de Y+D bileşenleri dikkate alınarak altı gerçek ve 0,3 g normalize edilmiş deprem kayıtları altında elde edilmiştir. Bu deprem yüklerinin ürettiği sismik performans ve olası hasar seviyeleri ayrıca incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Baraj gövdesi 75 yaşına kadar olan 0,3074-0,4189 sn aralığında temel periyotları, genellikle yatay ve düşey deprem davranış spektrumunun sırasıyla yükselen ve alçalan kısmında yer almıştır. Bu nedenle, baraj gövdesi yatay deprem bileşeni altında daha şiddetli tepkilere maruz kaldığı anlaşılmıştır.
- Betonun kemo-mekanik eylemler neticesinde bozulması nedeniyle, baraj gövdesinin rijitliği azalır, bu da yatay kret yer değiştirmelerinde artışa ve gerilme tepkisinde azalmaya neden olur.
- Deprem kayıtlarının TYİ'leri aynı seviyeye normalize edilmiş olsa da, tepkilerin büyüklüğü hala farklıdır. Daha yüksek darbe periyoduna sahip deprem yükleri, TYİ seviyesi aynı olsa bile yüksek tepkilere neden olur. Tüm bu deprem yükleri arasında Kocaeli, Loma ve Chi-Chi deprem yükleri daha yüksek tepkileri vermiştir. Ancak, minimum tepki Kobe deprem yükleri ile elde edilmiştir.
- Barajın her yaşında, en yüksek yer değiştirme tepkisini veren belirli bir deprem yükü bulunmuştur. Yani, 0 yaşında Chi-Chi, 50 yaşında Kocaeli ve 75 yaşında Loma baraj gövdesini yüksek deformasyonlara zorlamıştır. Bunun nedeni, baraj gövdesinin o yaştaki temel periyotlarıyla tepki spektrum arasındaki ilintidir.
- Ancak, baraj gövdesinin memba yüzündeki (özellikle topuk noktasındaki) hidrodinamik basınçlar yukarıdaki açıklanan sonuçlara benzemediği görülmüştür. Bütün yaşta en yüksek tepki Kobe depremi altında elde edilmiştir. Bu durumun arkasındaki sebep, Kobe depreminin D bileşenindeki şiddet, en yüksek TYİ büyüklüğü olabilir. Yani bu sonuç, depremin düşey bileşeni, hidrodinamik tepkiler üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğuna işaret eder.
- Seçilen deprem yüklerinin D bileşeni, AGAB'de küçük değişimler getirdiği ve getirilen değişimlerin önemsiz olabildiği anlaşılmıştır. Baraj gövdesindeki AGAB değerleri, Chi-Chi depreminin Y bileşeni altında ve 0, 50 ve 75 yaşlarda sırasıyla %6,1, %17,2 ve %36,7 olarak hesaplanmıştır. Bu değer ise, Chi-Chi depreminin Y+D bileşeni altında ve 0, 50 ve 75 yaşlarda sırasıyla %4,6, %17,6 ve %36,6 olarak hesaplanmıştır.

- Tüm bu deprem kayıtları arasında sadece Chi-Chi depremi, barajın erken yaşlarında (yaş 0 yıl) boyun ve topuk noktalarında küçük çatlaklar oluşturmuştur. Bu çatlaklar, daha sonraki yaşlarda betonun bozulmasıyla büyük derinlikte önemli ölçüde artmıştır, ve barajın diğer bölgelerine yayılmıştır.
- Chi-Chi, Kocaeli ve Loma yer hareketleri, özellikle barajın ileri yaşlarında, daha büyük bir sismik performans talebi oluşturmaktadır. 75 yaşında olan bu yer hareketi kayıtları, baraj gövdesinde çekme çatlağına ve derz açılmasına hatta barajın yıkılmasına neden olup ciddi hasarlar vermektedir.



SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, beton ağırlık barajların sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla iki boyutlu lineer dinamik davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için, baraj gövdesi üzerine doğrudan etkisi olan sonsuz uzunlukta rezervuar ve sonsuz zemin ortamları dikkate alınarak etkin bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Sonsuz ortamlarda radyasyon sönümleme kavramı, sonsuz elemanlar vasıtasıyla gerçekleştirilerek daha gerçekçi bir model sunmaya çalışılmıştır. Burada sunulan model, literatürdekilerle kıyas edildiğinde yeteri kadar doğru sonuçlar verdiği ve daha hızlı analiz yaptığı tespit edilmiştir.

Barajlar, yapı-zemin-sıvı etkileşim problemi sınıfına giren karmaşık bir problemdir. Baraj gövdesinin gerçekçi davranışının tahmin edilebilmesi için önemli parametreleri (örneğin; yakın ortamların boyutu, betonun zamanla bozulması, sediment tabakasının zamanla artması ve dinamik davranışa olan etkisi, histeretik sönümü, çeşitli deprem yüklerin etkisi, barajların sismik performansı vb.) dikkate almak gerekir. Bu parametrelerin çoğu, özellikle sonlu eleman yöntemi yardımıyla daha güçlü bir yöntem olduğundan dolayı dikkate alınması mümkündür. Dolayısıyla, bu parametreleri dikkate alınarak ağırlık barajların dinamik tepkileri üzerinde çeşitli parametrik inceleme yapılmıştır. İncelemelerin sonucunda, bu parametrelerin baraj gövdesi dinamik davranışı üzerindeki etkisi bariz olduğu, barajların analizi ve tasarımında kaçınılmaz olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçların geneline bakılırsa, beton ağırlık barajların analizi ve tasarımı için önemli noktalara işaret edilmiştir. Bu önemli noktalar, yukarıda bahsedilen dört farklı bölümde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Literatürde mevcut olan dağınık bilgileri toparlayarak, bu tip problemlerin dinamik analizi için etkin bir sonlu eleman modeli ortaya konulmuştur. Ayrıca, sonsuz su ortamını temsil eden Lagrange sonsuz sıvı elemanı önerilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modeli, zaman analizi açısından hızlı olduğu, sonuçların güvenilirlik açısından güvenilir olduğu, geniş parametreleri kapsayabilmektedir.

Bu incelemede elde edilen sonuçlar ve yorumlar, baraj problemi için halen yetersiz olduğunu ifade etmekte fayda vardır. Elde edilen sonuçları daha gerçekçi sonuçlara taşıyabilmek için gelecekte yapılabilecek çalışma konuları aşağıda sıralanmıştır:

- ✓ Yakın ortamların boyutunun baraj gövdesi üzerinde olan etkisi, geometrisi farklı olan barajlar için çeşitli deprem yükleri altında incelenilirse daha faydalı sonuçlar elde edilebilir.

- ✓ Bu incelemeyi yapılırken, zemin türlerinin tepkiler üzerinde olan etkisi ne derecededir? Acaba, bu etkiyi dahil edildiğinde aynı sonuçlar elde edilir mi?
- ✓ Barajların yaşlanması, önemli bir araştırma konusudur. Literatürde bu konu hakkında önemli boşluklar halen mevcuttur. Acaba, betonun homojen olmamasıyla yaşanan barajın davranışı ilerideki yaşlarda nasıl olur? Eğer yaşlanma faktörü izotrop varsayılmayıp ortotrop olarak ele alınırsa sonuçlar daha mı gerçekçi olur? Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla halen uyumlu kalır mı?
- ✓ Yaşlanan bir beton ağırlık barajın gövdesindeki hasarların çoğunluğu hangi noktalarda meydana gelebileceğini ve seviyesini, bu tez çalışmasında yapılan incelemelerle, artık tahmin edilebilir. Bununla birlikte, baraj gövdelerinde en çok hasar görebilen bölgelerinin güçlendirilmesi genç bir araştırma konusu olduğu düşünülmüştür. Bizim ülkede, çok sayıda yaşlanan baraj bulunmaktadır. Ömürleri boyunca çeşitli etkilere maruz kalıp danımlarını kayb etmişlerdir. Bu barajların tehlikeli durumlara yaklaştığı artık açıktır. Dolayısıyla, bu barajların herhangi kritik durumlara karşı güçlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için yep yeni bir yöntemle birlikte güçlendirmede kullanılabilecek yeni malzemeler türetilebilir.
- ✓ Tezin Materyal ve Metot bölümünde yazılan Denklem 31, Denklem 38, ve Denklem 39, baraj-rezervuar-zemin etkileşim problemi için çeşitli titreşim sönümleme mekanizmaları dikkate alınırsa, sonuçlar ne derecede farklı olur? Ve hangi mekanizma daha gerçekçi sonuç verir? Bu konu, şiddeti yüksek, orta ve düşük deprem yükleri için incelenerek sonuçları üzerinde karşılaştırmalı tartışma yapılabilir.
- ✓ Barajların dinamik analizi, literatürde Denklem 31 yardımıyla yapılarak oldukça çeşitli incelemelere konu olmuştur. Ancak, bu denklem modal analiz yöntemiyle çözüldüğünde, modların tepkiler üzerinde olan katkısı konusunda halen boşluk olduğu düşünülmüştür. Çünkü, bu konu hakkında tutarlı sonuçlara rastlanamamıştır. Ayrıca, bu incelemeyi yapılırken çeşitli deprem yükleri altında denenmesiyle genel davranışa ne kadar farklılık getirebilir.
- ✓ Bu tez çalışmasında geliştirilen modele, malzeme veya geometri açısından lineer ötesi analizlerin dahil edilmesi mümkün değildir. Çünkü, bu model frekans tanım alanında analiz yapar. Ayrıca, her adımda sonuçların kontrol edilmesi yöntemin kısıtlılığından dolayı mümkün değildir. Ancak, bu tip lineer ötesi analizler, Denklem 31'i Wilson-θ gibi yöntemlerle mümkün olabilir. Bu durumları dikkate alınmakla lineer ötesi analizler yapılırsa, barajların yaşlanması ve performansı değerlendirilmesinde daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abramowitz, M., 1964. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. US Government Printing Office, New York, USA.
- Akkas, N., Akay, H. and Yilmaz, C., 1979. Applicability of general-purpose finite element programs in solid-fluid interaction problems. Computers and Structures, 10(5), 773-783.
- Akköse, M., 1997. Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan İki ve Üç Boyutlu Statik ve Dinamik Analizi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Akköse, M. and Şimşek, E., 2010. Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction. Applied Mathematical Modelling, 34(11), 3685-3700.
- Akpınar, U., 2019. Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams. PhD Thesis, Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye.
- Ang, A.-S. and Newmark, N., 1971. Development of a Transmitting Boundary for Numerical Wave Motion Calculations. Defense Atomic Support Agency.
- Antes, H. and Von Estorff, O., 1987. Analysis of absorption effects on the dynamic response of dam reservoir systems by boundary element methods. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15(8), 1023-1036.
- Ardebili, M. A. and Mirzabozorg, H., 2012. Effects of near-fault ground motions in seismic performance evaluation of a symmetric arch dam. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 49(5), 192-199.
- Asghari, E., Taghipour, R., Bozorgnasab, M. and Moosavi, M., 2018. Seismic analysis of concrete gravity dams considering foundation mass effect. KSCE Journal of Civil Engineering, 22(12), 4988-4996.
- Avilés, J. and Sánchez-Sesma, F. J., 1986. Hydrodynamic pressures on dams with nonvertical upstream face. Journal of Engineering Mechanics, 112(10), 1054-1061.
- Azizan, N. Z. N., Mandal, A., Majid, T. A., Maity, D. and Nazri, F. M., 2017. Numerical prediction of stress and displacement of ageing concrete dam due to alkali-aggregate and thermal chemical reaction. Structural Engineering and Mechanics, 64(6), 793-802.
- Bathe, K.-J., 2006. Finite Element Procedures. Klaus-Jurgen Bathe, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Batta, V. and Pekau, O., 1996. Application of boundary element analysis for multiple seismic cracking in concrete gravity dams. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25(1), 15-30.
- Bayliss, A. and Turkel, E., 1980. Radiation boundary conditions for wave-like equations. Communications on Pure applied Mathematics, 33(6), 707-725.

- Bayraktar, A., 1991. Beton Ağırlık Barajlarda Baraj-Su-Zemin Etkileşiminin Statik ve Dinamik Analizde Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Bayraktar, A. and Dumanoglu, A., 1998. The effect of the asynchronous ground motion on hydrodynamic pressures. *Computers and Structures*, 68(1-3), 271-282.
- Bayraktar, A., Dumanoglu, A. and Calayir, Y., 1996. Asynchronous dynamic analysis of dam-reservoir-foundation systems by the Lagrangian approach. *Computers and Structures*, 58(5), 925-935.
- Bayraktar, A., Hançer, E. and Dumanoglu, A. A., 2005. Comparison of stochastic and deterministic dynamic responses of gravity dam-reservoir systems using fluid finite elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, 41(14), 1365-1376.
- Bayraktar, A., Türker, T., Akköse, M. and Ateş, Ş., 2010. The effect of reservoir length on seismic performance of gravity dams to near-and far-fault ground motions. *Natural Hazards*, 52(2), 257-275.
- Bayram, Y., 2008. Değişerek Yayılan Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Zemin Sistemlerinin Stokastik Dinamik Analizi. Doktor Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Turkey.
- Beer, G. and Meek, J., 1981. Infinite domain elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17(1), 43-52.
- Bettess, P., 1977. Infinite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 11(1), 53-64.
- Bettess, P., 1980. More on infinite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 15(11), 1613-1626.
- Bettess, P. and Bettess, J. A., 1984. Infinite elements for static problems. *Engineering Computations*.
- Bettess, P. and Bettess, J. A., 1991a. Infinite elements for dynamic problems: Part 1. *Engineering Computations*, 8(2), 99-124.
- Bettess, P. and Bettess, J. A., 1991b. Infinite elements for dynamic problems: Part 2. *Engineering Computations*, 8(2), 125-151.
- Bettess, P. and Zienkiewicz, O. C., 1977. Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 11(8), 1271-1290.
- Bhattacharjee, S. and Leger, P., 1993. Seismic cracking and energy dissipation in concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(11), 991-1007.
- Birk, C. and Ruge, P., 2007. A symmetric time-domain model for 3D dam-reservoir interaction including radiation damping. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(5), 661-682.
- Bouaanani, N., Paultre, P. and Proulx, J., 2002. Two-dimensional modelling of ice cover effects for the dynamic analysis of concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(12), 2083-2102.
- Bougacha, S. and Tassoulas, J. L., 1991a. Effects of sedimentary material on the response of concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20(9), 849-858.

- Bougacha, S. and Tassoulas, J. L., 1991b. Seismic analysis of gravity dams. I: modeling of sediments. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(8), 1826-1837.
- Bougacha, S. and Tassoulas, J. L., 1991c. Seismic response of gravity dams. II: Effects of sediments. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(8), 1839-1850.
- Bulson, P. S., Caldwell, J. B. and Severn, R. T., 1983. *Engineering Structures Developments in the Twentieth Century*
- Burman, A., 2011. Transient Analysis of Aged Concrete Damfoundation Coupled System.
- Burman, A., Maity, D., Sreedeeep, S. and Gogoi, I., 2011. Long-term influence of concrete degradation on dam–foundation interaction. *International Journal of Computational Methods*, 8(03), 397-423.
- Burman, A., Nayak, P., Agrawal, P. and Maity, D., 2012. Coupled gravity dam–foundation analysis using a simplified direct method of soil–structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 34(1), 62-68.
- Bustamante, J. I. and Flores, A., 1966. Water pressure on dams subjected to earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 92(5), 115-127.
- Calayır, Y., 1994. Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Calayir, Y. and Karaton, M., 2005. A continuum damage concrete model for earthquake analysis of concrete gravity dam–reservoir systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(11), 857-869.
- Chakrabarti, A. and Nalini, V., 1985. Hydrodynamic pressure on a dam during earthquakes. *Journal of Engineering Mechanics*, 111(12), 1435-1439.
- Chakrabarti, P. and Chopra, A. K., 1972. Hydrodynamic pressures and response of gravity dams to vertical earthquake component. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1(4), 325-335.
- Chakrabarti, P. and Chopra, A. K., 1973. Earthquake analysis of gravity dams including hydrodynamic interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2(2), 143-160.
- Chandrashaker, R. and Humar, J., 1993. Fluid–foundation interaction in the seismic response of gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(12), 1067-1084.
- Chandrupatla, T. and Belegundu, A., 2021. *Introduction to Finite Elements in Engineering*. Cambridge University Press,
- Chen, D.-H., Yang, Z.-H., Wang, M. and Xie, J.-H., 2019. Seismic performance and failure modes of the Jin'anqiao concrete gravity dam based on incremental dynamic analysis. *Engineering Failure Analysis*, 100, 227-244.
- Chopra, A. K., 1967a. Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 93(6), 205-223.
- Chopra, A. K., 1967b. Reservoir-dam interaction during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 57(4), 675-687.
- Chopra, A. K., 1968. Earthquake behavior of reservoir-dam systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 94(6), 1475-1500.

- Chopra, A. K., 2020. Earthquake Engineering for Concrete Dams: Analysis, Design, and Evaluation. John Wiley & Sons,
- Chopra, A. K. and Chakrabarti, P., 1971. The Koyna earthquake of December 11, 1967, and the Performance of Koyna Dam. California Univ Berkeley Earthquake Engineering Research Center.
- Chopra, A. K. and Chakrabarti, P., 1973. The Koyna earthquake and the damage to Koyna dam. Bulletin of the Seismological Society of America, 63(2), 381-397.
- Chopra, A. K. and Chakrabarti, P., 1981. Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 9(4), 363-383.
- Chopra, A. K. and Gupta, S., 1982. Hydrodynamic and foundation interaction effects in frequency response functions for concrete gravity dams. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10(1), 89-106.
- Chopra, A. K., Wilson, E. L. and Farhoomand, I., 1969. Earthquake analysis of reservoir-dam systems. Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile.
- Chuhan, Z. and Chongbin, Z., 1987. Coupling method of finite and infinite elements for strip foundation wave problems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15(7), 839-851.
- Chuhan, Z., Xinfeng, C. and Guanglun, W., 1999. A coupling model of FE-BE-IE-IBE for non-linear layered soil-structure interactions. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28(4), 421-441.
- Chwang, A. T., 1978. Hydrodynamic pressures on sloping dams during earthquakes. Part 2. Exact theory. Journal of Fluid Mechanics, 87(2), 343-348.
- Chwang, A. T. and Housner, G. W., 1978. Hydrodynamic pressures on sloping dams during earthquakes. Part 1. Momentum method. Journal of Fluid Mechanics, 87(2), 335-341.
- Clayton, R. and Engquist, B., 1977. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations. Bulletin of the Seismological Society of America, 67(6), 1529-1540.
- Clough, R. and Penzien, J., 1975. Dynamics of Structures. New York: McGraw-Hill,
- Cohen, M., 1980. Silent Boundary Methods for Transient Wave Analysis. California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research.
- Cook, R. D., 2007. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Dolen, T. P., 2007. Materials properties model of aging concrete. US Department of Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center ...,
- Domínguez, J., Gallego, R. and Japón, B. R., 1997. Effects of porous sediments on seismic response of concrete gravity dams. Journal of Engineering Mechanics, 123(4), 302-311.
- Domínguez, J. and Medina, F., 1989. Boundary elements for the analysis of the seismic response of dams including dam-water-foundation interaction effects. II. Engineering Analysis with Boundary Elements, 6(3), 158-163.
- Dominguez, J., Medina, F. and Maeso, O., 1993. Dynamic Analysis in Dam-Soil-Reservoir Systems. Boundary Elements in Dynamics. Computational Mechanics Publications, Southampton, 607-647.

- Dravinski, M., 1982. Influence of interface depth upon strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(2), 597-614.
- Durbin, F., 1974. Numerical inversion of Laplace transforms: an efficient improvement to Dubner and Abate's method. *The Computer Journal*, 17(4), 371-376.
- Düzgün, O., 2007. Topografik Yapının Zemin Yapı Sistemlerinin Dinamik Davranışı Üzerindeki Etkileri. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- El-Aidi, B. and Hall, J. F., 1989a. Non-linear earthquake response of concrete gravity dams part 1: modelling. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18(6), 837-851.
- El-Aidi, B. and Hall, J. F., 1989b. Non-linear earthquake response of concrete gravity dams Part 2: Behaviour. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18(6), 853-865.
- Engquist, B. and Majda, A., 1977. Absorbing boundary conditions for numerical simulation of waves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74(5), 1765-1766.
- Estorff, O. V. and Antes, H., 1991. On FEM-BEM coupling for fluid-structure interaction analyses in the time domain. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 31(6), 1151-1168.
- Feng, K., 1983. Finite element method and natural boundary conditions. *International Proceedings of the International Congress of Mathematicians*, 1439-1453.
- Fenves, G. and Chopra, A. K., 1983. Effects of reservoir bottom absorption on earthquake response of concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11(6), 809-829.
- Fenves, G. and Chopra, A. K., 1984. Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12(5), 663-680.
- Fenves, G. and Chopra, A. K., 1985a. Effects of reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction on frequency response functions for concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13(1), 13-31.
- Fenves, G. and Chopra, A. K., 1985b. Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams: Combined hydrodynamic and foundation interaction effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 111(6), 736-756.
- Fenves, G. and Chopra, A. K., 1985c. Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams: Separate hydrodynamic and foundation interaction effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 111(6), 715-735.
- Fenves, G. and Chopra, A. K., 1987. Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams. *Journal of Engineering Mechanics*, 113(8), 1688-1708.
- Finn, W. L. and Varoğlu, E., 1973. Dynamics of gravity dam-reservoir systems. *Computers and Structures*, 3(4), 913-924.
- Flores, A., Herrera, I. and Lozano, C., 1969. Hydrodynamic pressure generated by vertical earthquake component. *Proceedings of Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile.
- 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*, USA.

- Ghanaat, Y., 2004a. Failure modes approach to safety evaluation of dams. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Ghanaat, Y., 2004b. Failure modes approach to safety evaluation of dams. Proceedings of the 13th World Conference on earthquake engineering, Vancouver, Canada.
- Ghrib, F. and Tinawi, R., 1995. An application of damage mechanics for seismic analysis of concrete gravity dams. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 24(2), 157-173.
- Givoli, D., 2004. High-order local non-reflecting boundary conditions: a review. *Wave Motion*, 39(4), 319-326.
- Givoli, D., 2013. *Numerical Methods for Problems in Infinite Domains*. Elsevier, Amsterdam, London, New York.
- Givoli, D. and Patlashenko, I., 1998. Optimal local non-reflecting boundary conditions. *Applied Numerical Mathematics*, 27(4), 367-384.
- Gogoi, I., 2006. *Dynamic Response of Ageing Concrete Gravity Dams with Unbounded Reservoir*. PhD Thesis, Indian Institute of Technology Guwahati, India.
- Gogoi, I. and Maity, D., 2007. Influence of sediment layers on dynamic behavior of aged concrete dams. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(4), 400-413.
- Gogoi, I. and Maity, D., 2010. A novel procedure for determination of hydrodynamic pressure along upstream face of dams due to earthquakes. *Computers and Structures*, 88(9-10), 539-548.
- Gorai, S. and Maity, D., 2019. Seismic response of concrete gravity dams under near field and far field ground motions. *Engineering Structures*, 196, 109292.
- Gorai, S. and Maity, D., 2021. Numerical investigation on seismic behaviour of aged concrete gravity dams to near source and far source ground motions. *Natural Hazards*, 105(1), 943-966.
- Greeves, E. J., 1991. *The Modelling and Analysis of Linear and Nonlinear Fluid-Structure Systems with Particular Reference to Concrete Dams*. PhD Thesis, University of Bristol, Bristol, UK.
- Grimal, E., Sellier, A., Multon, S., Le Pape, Y. and Bourdarot, E., 2010. Concrete modelling for expertise of structures affected by alkali aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 502-507.
- Guan, F., Moore, I. D. and Lin, G., 1994. Transient response of reservoir–dam–soil systems to earthquakes. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 18(12), 863-880.
- Gupta, S. and Gupta, I. D. 2004. The prediction of earthquake peak ground acceleration in Koyna region, India.
- Gutierrez, J. A. and Chopra, A., 1976. *A Substructure Method for Earthquake Analysis of Structure-Soil Interaction*. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Gutierrez, J. A. and Chopra, A. K., 1978. A substructure method for earthquake analysis of structures including structure-soil interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6(1), 51-69.

- Häggblad, B. and Nordgren, G., 1987. Modelling nonlinear soil-structure interaction using interface elements, elastic-plastic soil elements and absorbing infinite elements. *Computers and Structures*, 26(1-2), 307-324.
- Hall, J. F., 1986. Study of the earthquake response of Pine Flat dam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14(2), 281-295.
- Hall, J. F. and Chopra, A. K., 1980. *Dynamic Response of Embankment, Concrete-Gravity and Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction*. University of California, Earthquake Engineering Research Center, California, USA.
- Hall, J. F. and Chopra, A. K., 1982a. Hydrodynamic effects in the dynamic response of concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(2), 333-345.
- Hall, J. F. and Chopra, A. K., 1982b. Two-dimensional dynamic analysis of concrete gravity and embankment dams including hydrodynamic effects. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(2), 305-332.
- Hamdi, M. A., Ousset, Y. and Verchery, G., 1978. A displacement method for the analysis of vibrations of coupled fluid-structure systems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 13(1), 139-150.
- Hamilton, E. L., 1971. Elastic properties of marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 76(2), 579-604.
- Hanna, Y. G. and Humar, J. L., 1982. Boundary element analysis of fluid domain. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 108(2), 436-450.
- Hatami, K., 1997. Effect of reservoir bottom on earthquake response of concrete dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16(7-8), 407-415.
- Hatano, T., 1950. Seismic force effect on gravity dam. *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*, 1950(5), 83-90.
- Hinton, E. and Campbell, J., 1974. Local and global smoothing of discontinuous finite element functions using a least squares method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 8(3), 461-480.
- Humar, J. and Jablonski, A., 1988. Boundary element reservoir model for seismic analysis of gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16(8), 1129-1156.
- Hung, T.-K. and Wang, M.-H., 1987. Nonlinear hydrodynamic pressure on rigid dam motion. *Journal of Engineering Mechanics*, 113(4), 482-499.
- Karabalis, D. and Beskos, D., 1984. Dynamic response of 3-D rigid surface foundations by time domain boundary element method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12(1), 73-93.
- Karman, T. V., 1933. Discussion of water pressures on dams during earthquakes. *Transactions, ASCE*, 98, 434-436.
- Kausel, E., 1988. Local transmitting boundaries. *Journal of Engineering Mechanics*, 114(6), 1011-1027.
- Kellezi, L., 2000. Local transmitting boundaries for transient elastic analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(7), 533-547.
- Khalili, N., Valliappan, S., Yazdi, J. T. and Yazdchi, M., 1997. 1D infinite element for dynamic problems in saturated porous media. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 13(9), 727-738.

- Köseoğlu, E., 2007. Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımıyla Stokastik Dinamik Analizi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- Kotsubo, S., 1957. Dynamic water pressure on dams due to irregular earthquakes. Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, 1957(47), 38-45.
- Kramer, S. L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, 794, New York, USA.
- Kramer, S. L., 2003. Geoteknik Deprem Mühendisliği. Gazi Kitabevi, Ankara, Türkiye.
- Küçükarslan, S., 2004a. Dynamic analysis of dam-reservoir-foundation interaction in time domain. Computational Mechanics, 33(4), 274-281.
- Küçükarslan, S., 2004b. Time-domain dynamic analysis of dam-reservoir-foundation interaction including the reservoir bottom absorption. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28(9), 963-980.
- Kuhl, D., Bangert, F. and Meschke, G., 2004. Coupled chemo-mechanical deterioration of cementitious materials Part II: Numerical methods and simulations. International Journal of Solids and Structures, 41(1), 41-67.
- Lamb, H., 1924. Hydrodynamics. Cambridge University Press, New York, USA,.
- Le Bellégo, C., Gérard, B. and Pijaudier-Cabot, G., 2000. Chemo-mechanical effects in mortar beams subjected to water hydrolysis. Journal of Engineering Mechanics, 126(3), 266-272.
- Lee, J. and Fenves, G. L., 1998. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams. Earthquake engineering & structural dynamics, 27(9), 937-956.
- Liao, Z. P. and Wong, H., 1984. A transmitting boundary for the numerical simulation of elastic wave propagation. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3(4), 174-183.
- Lindman, E., 1973. On getting all of the waves out of the box. Proceedings of the Sixth Conference on Numerical Simulation of Plasmas, Berkeley, USA.
- Lindman, E., 1975. Free-space boundary conditions for the time dependent wave equation. Journal of Computational Physics, 18(1), 66-78.
- Liu, P. L.-F., 1986. Hydrodynamic pressures on rigid dams during earthquakes. Journal of Fluid Mechanics, 165, 131-145.
- Løkke, A., 2019. Direct Finite Element Method for Nonlinear Earthquake Analysis of Concrete Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction. Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarters at the University of California, Berkeley.
- Lotfi, V., 2003. Seismic analysis of concrete gravity dams by decoupled modal approach in time domain. Electronic Journal of Structural Engineering, 3, 102-116.
- Lotfi, V., 2004. Dynamic analysis of concrete gravity dams by decoupled modal approach in time domain. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Lotfi, V., Roesset, J. M. and Tassoulas, J. L., 1987. A technique for the analysis of the response of dams to earthquakes. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15(4), 463-489.

- Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L., 1969. Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4), 859-877.
- Maeso, O., Aznarez, J. and Dominguez, J., 2004. Three-dimensional models of reservoir sediment and effects on the seismic response of arch dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(10), 1103-1123.
- Maity, D. and Bhattacharyya, S., 1999. Time-domain analysis of infinite reservoir by finite element method using a novel far-boundary condition. *Finite Elements in Analysis and Design*, 32(2), 85-96.
- Maity, D. and Bhattacharyya, S. K., 2003. A parametric study on fluid–structure interaction problems. *Journal of Sound and Vibration*, 263(4), 917-935.
- Medina, F. and Domínguez, J., 1989. Boundary elements for the analysis of the seismic response of dams including dam-water-foundation interaction effects. I. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 6(3), 152-157.
- Medina, F., Dominguez, J. and Tassoulas, J. L., 1990. Response of dams to earthquakes including effects of sediments. *Journal of structural Engineering*, 116(11), 3108-3121.
- Medina, F. and Penzien, J., 1982. Infinite elements for elastodynamics. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(5), 699-709.
- Mei, C. C., Foda, M. A. and Tong, P., 1979. Exact and hybrid-element solutions for the vibration of a thin elastic structure seated on the sea floor. *Applied Ocean Research*, 1(2), 79-88.
- Nath, B., 1969. Hydrodynamic pressures on high dams due to vertical earthquake motions. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers*, 42(3), 413-421.
- Nath, B., 1971. Coupled hydrodynamic response of a gravity dam. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 48(2), 245-257.
- Nayak, P. and Maity, D., 2013. Seismic damage analysis of aged concrete gravity dams. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 14(5), 424-439.
- Olson, L. G. and Bathe, K.-J., 1983. A study of displacement-based fluid finite elements for calculating frequencies of fluid and fluid-structure systems. *Nuclear Engineering and Design*, 76(2), 137-151.
- Olson, L. G. and Bathe, K.-J., 1985a. Analysis of fluid-structure interactions. A direct symmetric coupled formulation based on the fluid velocity potential. *Computers and Structures*, 21(1-2), 21-32.
- Olson, L. G. and Bathe, K. J., 1985b. An infinite element for analysis of transient fluid—structure interactions. *Engineering Computations*, 2, 319-330.
- Oluokun, F. A., Burdette, E. G. and Deatherage, J. H., 1991. Splitting tensile strength and compressive strength relationships at early ages. *Materials Journal*, 88(2), 115-121.
- Omidi, O. and Lotfi, V., 2007. Application of pseudo-symmetric technique for seismic analysis of concrete arch dams. *Fourth International Conference on Fluid–Structure Interaction*,
- Öziş, Ü., 1983. *Su Yapıları*. DEÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayın, Bornova, İzmir.
- Pan, J., Feng, Y., Xu, Y., Jin, F., Zhang, C. and Zhang, B., 2013a. Chemo-damage modeling and cracking analysis of AAR-affected concrete dams. *Science China Technological Sciences*, 56(6), 1449-1457.

- Pan, J., Feng, Y. T., Jin, F. and Zhang, C., 2013b. Numerical prediction of swelling in concrete arch dams affected by alkali-aggregate reaction. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(4), 231-247.
- Pan, J., Xu, Y., Jin, F. and Zhang, C., 2014. A unified approach for long-term behavior and seismic response of AAR-affected concrete dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63, 193-202.
- Peer, 2013. PEER Strong Motion Database. <http://peer.berkeley.edu>
- Pelecanos, L., Kontoe, S. and Zdravković, L., 2013. Numerical modelling of hydrodynamic pressures on dams. *Computers and Geotechnics*, 53, 68-82.
- Raphael, J. M., 1984. Tensile strength of concrete. In *Journal Proceedings: ACI Journal*, 81(2), 158-165,
- Rasa, A. Y., 2017. Çok Katlı Yapıların Geçici Titreşimlerinin Durum-Uzayı Yaklaşımı ile İncelenmesi ve Modların Birleştirilmesi Yöntemiyle bir Karşılaştırma. Master Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- Rasa, A. Y. and Budak, A., 2021. Static and Dynamic Investigation of Structure-Foundation-Reservoir Problem Utilizing Finite Element Method. PACE-2021, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.
- Rasa, A. Y., Budak, A. and Düzgün, O. A., 2022. An efficient finite element model for dynamic analysis of gravity dam-reservoir-foundation interaction problems. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 19(6).
- Rasa, A. Y., Budak, A. and Düzgün, O. A., 2023a. Concrete ageing effect on the dynamic response of machine foundations considering soil-structure interaction. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*.
- Rasa, A. Y., Budak, A. and Düzgün, O. A., 2023b. Concrete deterioration effects on dynamic behavior of gravity dam-reservoir interaction problems. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-20.
- Rasa, A. Y., Budak, A. and Düzgün, O. A., 2023c. Seismic Performance Evaluation of Concrete Gravity Dams Using an Efficient Finite Element Model. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 1-20.
- Rasa, A. Y. and Özyazıcıoğlu, M. H., 2021. Determination of the exact mode frequencies of multi-storey structures by state-space method and a comparison with mode superposition method. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 7(1), 1-10.
- Rea, D., Liaw, C. Y. and Chopra, A. K., 1974. Mathematical models for the dynamic analysis of concrete gravity dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3(3), 249-258.
- Reddy, J., 2004. *An Introduction to the Finite Element Method*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Reinoso, E., Wrobel, L. and Power, H., 1997. Three-dimensional scattering of seismic waves from topographical structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16(1), 41-61.
- Saini, S. S., 1978. Modelling of hydrodynamic effects on dams using finite elements. *Journal of Institution of Engineers (India)*, 59(13), 204-210.
- Saini, S. S., Bettess, P. and Zienkiewicz, O., 1978. Coupled hydrodynamic response of concrete gravity dams using finite and infinite elements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6(4), 363-374.

- Samii, A. and Lotfi, V., 2007. Comparison of coupled and decoupled modal approaches in seismic analysis of concrete gravity dams in time domain. *Finite Elements in Analysis Design*, 43(13), 1003-1012.
- Schumann, K., Stipp, M., Behrmann, J. H., Klaeschen, D. and Schulte-Kortnack, D., 2014. P and S wave velocity measurements of water-rich sediments from the Nankai Trough, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2), 787-805.
- Seghir, A., Tahakourt, A. and Bonnet, G., 2009. Coupling FEM and symmetric BEM for dynamic interaction of dam–reservoir systems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 33(10), 1201-1210.
- Sharan, S., 1987a. A non-reflecting boundary in fluid-structure interaction. *Computers and Structures*, 26(5), 841-846.
- Sharan, S., 1987b. Time-domain analysis of infinite fluid vibration. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(5), 945-958.
- Sharan, S., 1992. Efficient finite element analysis of hydrodynamic pressure on dams. *Computers and Structures*, 42(5), 713-723.
- Sharan, S. K., 1985a. Finite element analysis of unbounded and incompressible fluid domains. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 21(9), 1659-1669.
- Sharan, S. K., 1985b. Finite element modeling of infinite reservoirs. *Journal of Engineering Mechanics*, 111(12), 1457-1469.
- Sharan, S. K., 1986. Modelling of radiation damping in fluids by finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 23(5), 945-957.
- Sommerfeld, A., 1949. *Partial Differential Equations in Physics*. Academic Press, New York, USA.
- Spyrakos, C. and Beskos, D., 1986. Dynamic response of flexible strip-foundations by boundary and finite elements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(2), 84-96.
- Steffens, A., Li, K. and Coussy, O., 2003. Aging approach to water effect on alkali–silica reaction degradation of structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 129(1), 50-59.
- Sun, B., Deng, M., Zhang, S., Wang, C. and Du, M., 2022. Seismic performance assessment of high asphalt concrete core rockfill dam considering shorter duration and longer duration. *Structures*, 39, 1204-1217.
- Tan, H. and Chopra, A. K., 1995a. Dam-foundation rock interaction effects in frequency-response functions of arch dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24(11), 1475-1489.
- Tan, H. and Chopra, A. K., 1995b. Earthquake analysis of arch dams including dam-water-foundation rock interaction. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24(11), 1453-1474.
- Touhei, T. and Ohmachi, T., 1993. A FE–BE method for dynamic analysis of dam–foundation–reservoir systems in the time domain. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(3), 195-209.
- Tsai, C.-S., Lee, G. C. and Ketter, R. L., 1992. Solution of the dam-reservoir interaction problem using a combination of FEM, BEM with particular integrals, modal analysis and substructuring. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 9(3), 219-232.

- Tsai, C. and Lee, G., 1991. Time-domain analyses of dam-reservoir system. II: substructure method. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(9), 2007-2026.
- Usace, 2003. Time-history dynamic analysis of concrete hydraulic structures.
- Valliappan, S. and Zhao, C., 1992. Dynamic response of concrete gravity dams including dam–water–foundation interaction. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 16(2), 79-99.
- Wang, C., Zhang, H., Zhang, Y., Guo, L., Wang, Y. and Thira Htun, T. T., 2021. Influences on the seismic response of a gravity dam with different foundation and reservoir modeling assumptions. *Water*, 13(21), 3072.
- Wang, G., Wang, Y., Zhou, W. and Zhou, C., 2015. Integrated duration effects on seismic performance of concrete gravity dams using linear and nonlinear evaluation methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, 223-236.
- Wang, G., Zhang, S., Wang, C. and Yu, M., 2014. Seismic performance evaluation of dam-reservoir-foundation systems to near-fault ground motions. *Natural Hazards*, 72(2), 651-674.
- Washa, G. W., Saemann, J. C. and Cramer, S. M., 1989. Fifty-year properties of concrete made in 1937. *Materials Journal*, 86(4), 367-371.
- Werner, P. W. and Sundquist, K., 1949. On hydrodynamic earthquake effects. *Transactions American Geophysical Union*, 30(5), 636-657.
- Westergaard, H. M., 1933. Water pressures on dams during earthquakes. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 98(2), 418-433.
- Wilson, E., Farhoomand, I. and Bathe, K., 1972. Nonlinear dynamic analysis of complex structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1(3), 241-252.
- Wilson, E. L. and Khalvati, M., 1983. Finite elements for the dynamic analysis of fluid-solid systems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19(11), 1657-1668.
- Withey, M., 1961. Fifty year compression test of concrete. In *Journal Proceedings, American Concrete Institute*.
- Wong, H., 1982. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(4), 1167-1183.
- Yazdchi, M., Khalili, N. and Valliappan, S., 1999. Dynamic soil–structure interaction analysis via coupled finite-element–boundary-element method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(7), 499-517.
- Yerli, H., 1998. İki ve Üç Boyutlu Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar Kullanılarak Analizi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukrova Üniversitesi, Adana, Türkiye.
- Yerli, H., Temel, B. and Kiral, E., 1998. Transient infinite elements for 2D soil-structure interaction analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(10), 976-988.
- Yun, C.-B., Kim, D.-K. and Kim, J.-M., 2000. Analytical frequency-dependent infinite elements for soil–structure interaction analysis in two-dimensional medium. *Engineering Structures*, 22(3), 258-271.

- Zangar, C. N., 1952. Hydrodynamic Pressures on Dams due to Horizontal Earthquake Effects. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Information Office, Denver, Colorado, USA.
- Zhai, Y., Zhang, L., Bi, Z., Zhang, H. and Cui, B., 2022. Seismic performance evaluation of AAR-affected concrete gravity dams under main aftershock sequence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 157, 107258.
- Zhang, S., Wang, G., Pang, B. and Du, C., 2013. The effects of strong motion duration on the dynamic response and accumulated damage of concrete gravity dams. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 45, 112-124.
- Zhao, C. and Liu, T., 2003. Non-reflecting artificial boundaries for transient scalar wave propagation in a two-dimensional infinite homogeneous layer. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 58(10), 1435-1456.
- Zienkiewicz, O., Kelly, D. and Bettess, P., 1977. The coupling of the finite element method and boundary solution procedures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 11(2), 355-375.
- Zienkiewicz, O. C. and Nath, B., 1963. Earthquake hydrodynamic pressures on arch dams-an electric analogue solution. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 25(2), 165-176.
- Zienkiewicz, O. C. and Newton, R. E., 1969. Coupled vibration of a structure submerged in a compressible fluid. *Proceedings of International Symposium on Finite Element Techniques*, University of Stuttgart, Germany.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Taylor, R. L. and Taylor, R. L., 2000. *The Finite Element Method: Solid Mechanics*. Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. and Zhu, J. Z., 2005. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Zill, D. G., 2020. *Advanced Engineering Mathematics*. Jones and Bartlett Publishers, Burlington, Massachusetts, United States.
- Abramowitz, M., 1964. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. US Government Printing Office, New York, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Ahmad Yamin Rasa
Doğum tarihi:	
Doğum yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Medeni durumu:	
Email:	
Eğitim	
Lise:	Bahter Lisesi, Belh, Afganistan
Lisans:	Belh Üniversitesi, Belh, Afganistan
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	C1 ve Duolingo puanı (115)≅87 TOEFL
Türkçe:	C1
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
(1) Rasa, A. Y. , Budak, A. and Düzgün, O. A., 2023. Concrete ageing effect on the dynamic response of machine foundations considering soil-structure interaction. <i>Journal of Vibration Engineering & Technologies</i> . 1-13.	
(2) Rasa, A. Y. , Budak, A. and Düzgün, O. A., 2023. Seismic performance evaluation of concrete gravity dams using an efficient finite element model. <i>Journal of Vibration Engineering & Technologies</i> . 1-20.	
(3) Rasa, A. Y. , Budak, A. and Düzgün, O. A., 2023. Concrete deterioration effects on dynamic behavior of gravity dam–reservoir interaction problems. <i>Journal of Vibration Engineering & Technologies</i> , 1-20.	
(4) Rasa, A. Y. , Budak, A. and Düzgün, O. A., 2022. An efficient finite element model for dynamic analysis of gravity dam-reservoir-foundation interaction problems. <i>Latin American Journal of Solids and Structures</i> , 19(6).	
(5) Rasa, A. Y. and Budak, A., 2021. Static and dynamic investigation of structure-foundation-reservoir problem utilizing finite element method. <i>PACE-2021, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye</i> .	
(6) Rasa, A. Y. , Budak, A. and Düzgün, O. A., 2023. The influence of concrete degradation on seismic performance of gravity dams. <i>Earthquakes and Structures</i> . (Durum: Revize)	