

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KEMER BARAJLARIN YAPISAL PERFORMANSLARININ
SİSMİK KIRILGANLIK EĞRİLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Erdinç Erkan BAŞBOLAT

**TEMMUZ 2022
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KEMER BARAJLARIN YAPISAL PERFORMANSLARININ
SİSMİK KIRILGANLIK EĞRİLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Erdinç Erkan BAŞBOLAT

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 06 / 2022

Tezin Savunma Tarihi : 07 / 07 / 2022

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Basri BAŞAĞA

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

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

“Beton Kemer Barajların Performanslarının Sismik Kırılmalık Eğrileri Kullanılarak Belirlenmesi” isimli tez çalışmamda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, manevi desteğini sürekli hissettiğim, öğrencisi olmaktan ve kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum danışman Hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Basri BAŞAĞA 'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın en kritik anlarında, bilgileriyle bana yol gösteren, manevi destekte bulunan, tezimi inceleyip tavsiyelerini paylaşan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Necmettin GÜNEŞ'e teşekkür ederim.

Doktora eğitimim sürecince bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocalarım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK, Prof. Dr. Barış SEVİM, Prof. Dr. Murat Emre KARTAL ve Prof. Dr. Hakan ERSOY'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ndeki kıymetli mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim sevgili aileme şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca desteğini, sevgisi ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen, yoğun çalışma zamanlarımda evlatlarımızla ilgilenen değerli eşim Özlem'e sonsuz sevgilerimi sunarım.

Bu tez çalışmamı, vatana ve millete hayırlı bireyler olmalarını temenni ettiğim oğullarım Mustafa Ulaş ve Kemal Uras'a armağan ediyorum.

Erdinç Erkan BAŞBOLAT
Trabzon, 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “KEMER BARAJLARIN YAPISAL PERFORMANSLARININ SİSMİK KIRILGANLIK EĞRİLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan Basri BAŞAĞA ‘nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/07/2022

Erdinç Erkan BAŞBOLAT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ RTİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatürde Bulunan Tez Kapsamındaki Bazı Çalışması.....	1
1.2.1. Kemer Barajların Modellenmesi ve Dinamik Davranışları ile İlgili Çalışmalar.....	2
1.2.2. Kemer Barajların Hasar Analizleri ile İlgili Çalışmalar.....	10
1.2.3. Yer Hareketi Parametreleri ile Hasar İlişki ile İlgili Bazı Çalışmalar...	13
1.2.4. Beton Barajların Kırılgnalık Eğrilerinin Elde Edilmesi ile İlgili Çalışmalar.....	14
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	19
1.4. Kemer Barajların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi.....	20
1.5. Euler Yaklaşımına Dayalı Sıvı-Yapı Etkileşiminin Sonlu Elemanlar Formülasyonu.....	22
1.6. Sönümsüz Serbest Titreşim Formülasyonu.....	25
1.7. Newmark Yöntemi ile Zaman-Tanım Alanında Analiz.....	26
1.8. Malzeme Bakımından Lineer Olamayan Davranış Formülasyonu.....	28
1.8.1. Drucker-Prager Beton Malzeme Modeli.....	29
1.9. Kemer Barajlarda Oluşabilecek Hasarlar.....	32
1.10. Kırılgnalık Eğrisi Kavramı.....	33
1.10.1. Analitik Yöntem ile Kırılgnalık Eğrilerinin Oluşturulması.....	34

1.10.2.	Tehlike Analizi.....	37
1.10.3.	Yapı Analizi.....	37
1.10.4.	Hasar Analizi.....	38
1.11.	Kırılabilirlik Fonksiyonu Parametrelerinin Tahmini.....	38
1.11.1.	Bulut Analizi.....	39
1.11.2.	Dinamik Dayanıklılık Analizi (DDA).....	40
1.11.3.	Artımsal Dinamik Analiz (ADA).....	40
1.11.4.	Çoklu Seviye Analizi (ÇSA).....	42
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	44
2.1.	Beton Ağırlık Barajın Deprem Hasar Analizi.....	45
2.2.	Beton Kemer Barajın Deprem Hasar Analizi.....	53
2.2.1.	Baraj Bölgesinin Depremselliği.....	55
2.2.2.	Kemer Barajın Sonlu Elemanlar Modeli.....	57
2.2.3.	Kemer Barajın Statik Analizi.....	59
2.2.4.	Kemer Barajın Sönümsüz Serbest Titreşim Analizleri.....	63
2.2.5.	Yer Hareketlerinin Seçimi, Ölçeklenmesi ve Analiz Sonuçları.....	67
2.3.	Beton Kemer Baraj İçin Sismik Kırılabilirlik Eğrisinin ÇSA Yöntemi ile Oluşturulması.....	72
2.3.1.	Kırılabilirlik Eğrileri İçin Yer Hareketlerinin Seçimi ve Ölçeklenmesi...	73
2.3.2.	Yer Hareketi Parametreleri ile Hasar İlişki.....	81
2.3.3.	Kırılabilirlik Eğrisi Analizleri ve Sonuçlar.....	87
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	94
4.	KAYNAKLAR.....	96

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

KEMER BARAJLARIN YAPISAL PERFORMANSLARININ
SİSMİK KIRILGANLIK EĞRİLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Erdiñ Erkan BAŞBOLAT

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Basri BAŞAĞA
2022, 109 Sayfa

Bu çalışmada, beton kemer barajların sismik kırılğanlık eğrilerinin, performansa dayalı deprem mühendisliği kapsamında, oluşturulması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, ilk olarak bir beton ağırlık barajın iki boyutlu modeli oluşturulmuş ve sismik hasar analizi yapılmıştır. Bu analiz ile Drucker-Prager beton malzeme modeli parametrelerinin uygunluğu gösterilmiştir. Yüksek bir beton kemer barajın sismik hasar analizleri, bu malzeme modeli ile iki farklı deprem seviyesinde (işletme esaslı ve emniyet esaslı deprem seviyeleri) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, kırılğanlık eğrisi analizi yöntemlerinden olan Çoklu Seviye Analiz (ÇSA) yönteminin, kemer barajlara uygulanması için gerekli olan yer hareketlerinin seçimi ve ölçeklenmesi yapılmıştır. Seçilen yer hareketleri ile gerçekleştirilen lineer olmayan analizler sonucunda, kemer barajın yapısal tepkisi ile yer hareketi parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca, uygulama örneği olan bu kemer barajın kırılğanlık eğrileri, üç farklı hasar seviyesi (hafif, orta ve ağır) için, ÇSA yöntemi ile oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kemer Baraj, Drucker-Prager Malzeme Modeli, Kırılğanlık Eğrisi

PhD. Thesis

SUMMARY

STRUCTURAL PERFORMANCE DETERMINATION OF ARCH DAMS USING SEISMIC
FRAGILITY CURVES

Erdiñ Erkan BAŞBOLAT

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA
2022, 109 Pages

In this study, it is aimed to obtain the seismic fragility curves of concrete arch dams within the framework of performance-based earthquake engineering. For that reason, firstly, a two-dimensional model of a concrete gravity dam was created and seismic damage analysis was performed. With this analysis, the suitability of the parameters of the Drucker-Prager concrete material model has been demonstrated. The seismic damage analyses of a high concrete arch dam were carried out with this material model at two different earthquake levels (operational based and safety based earthquake levels). Then, the ground motions required for Multiple Stripe Analysis (MSA) method, which is one of the fragility analysis methods, were selected and scaled for the application of the arch dam. As a result of the nonlinear analyses performed with the selected ground motions, the correlation between the structural response of the arch dam and the ground motion parameters was investigated. In addition, the fragility curves of the example dam were obtained by the MSA method for three different damage levels (slight, moderate and severe).

Key Words: Arch Dam, Drucker-Prager Material Model, Fragility Curve

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Drucker-Prager ve Rankine kırılma yüzeyleri [131].....	29
Şekil 2. Çekme ve basınçtaki davranış fonksiyon grafikleri [131].....	31
Şekil 3. Beton kemer baraj inşası.....	33
Şekil 4. Kemer barajlarda beklenen deprem hasarları [107].....	33
Şekil 5. Lognormal dağılım için OYF ve KDF.....	36
Şekil 6. Örnek bir dinamik dayanıklılık fonksiyonu [157].....	40
Şekil 7. a) Her bir yer hareketi için ŞÖ'ne karşılık gelen göçme eğrileri b) Gözlemlenen göçme oranlarına karşılık gelen ŞÖ ve bu değerler için elde edilen kırılma eğrisi [146].....	41
Şekil 8. a) Her bir yer hareketi için elde edilen yapı tepkileri b) Gözlemlenen göçme oranlarına karşılık gelen ŞÖ ve bu değerler için elde edilen kırılma eğrisi [146].....	42
Şekil 9. Tez akış şeması.....	46
Şekil 10. Koyna beton ağırlık barajı.....	47
Şekil 11. Koyna baraj gövdesinin sonlu elemanlar modeli.....	47
Şekil 12. Baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemi sonlu elemanlar modeli.....	48
Şekil 13. Koyna barajının boş ve dolu durumları için mod şekilleri.....	50
Şekil 14. Koyna deprem ivme kaydının yatay ve düşey bileşenleri.....	52
Şekil 15. Koyna deprem kaydının yatay ve düşey tepki spektrumları.....	52
Şekil 16. Koyna baraj kretinin yatay yer değiştirme grafiği.....	53
Şekil 17. Koyna barajında oluşan kademeli hasar.....	54
Şekil 18. Kemer barajın Türkiye Deprem Tehlike Haritasındaki varsayılan konumu [164].....	55
Şekil 19. Farklı deprem seviyelerinin yatay ivme spektrumları.....	56
Şekil 20. Farklı deprem seviyelerinin düşey ivme spektrumları.....	57
Şekil 21. Baraj gövdesinin sonlu elemanlar ağı modeli.....	58
Şekil 22. Baraj-Rezervuar-temel etkileşim sistemi sonlu elemanlar modeli.....	58
Şekil 23. Rezervuar sınır şartlarının matematiksel gösterimi.....	59
Şekil 24. Hidrostatik su basıncı yükleme durumu.....	61
Şekil 25. Statik yükler altında barajın şekil değiştirmiş hali (sol sahilden).....	61

Şekil 26.	Memba-mansap yönü yer değiştirme (m) kontur (memba yüzeyi) dağılımı.....	62
Şekil 27.	a) Memba yüzü ve b) Mansap yüzü en büyük asal çekme gerilme dağılımı.....	62
Şekil 28.	a) Memba yüzü ve b) Mansap yüzü en büyük asal basınç gerilme dağılımı.....	63
Şekil 29.	Orta bloğun (21. blok) yatay yer değiştirme grafiği.....	63
Şekil 30.	Barajın mod şekilleri.....	64
Şekil 31.	Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının bileşke spektrumları ve ortalamaları (İED seviyesi).....	69
Şekil 32.	Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının bileşke spektrumları ve ortalamaları (EED seviyesi).....	70
Şekil 33.	Hedef spektrum ve ortalama ivme spektrumun karşılaştırılması (İED seviyesi).....	71
Şekil 34.	Hedef spektrum ve ortalama ivme spektrumun karşılaştırılması (EED seviyesi).....	71
Şekil 35.	Baraj gövdesinde oluşan deprem hasarları.....	72
Şekil 36.	Magnitüdü 4.9-7.9 arasında olan depremlerin ortalama spektral Şekillerinin karşılaştırılması [180].....	74
Şekil 37.	$S_a(T_1) = 0.1$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri.....	76
Şekil 38.	$S_a(T_1) = 0.2$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri.....	77
Şekil 39.	$S_a(T_1) = 0.3$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri.....	78
Şekil 40.	$S_a(T_1) = 0.4$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri.....	79
Şekil 41.	$S_a(T_1) = 0.5$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri.....	80
Şekil 42.	Ortalama spektral ivme grafikleri.....	81
Şekil 43.	Normalize edilmiş ortalama spektral ivme grafikleri.....	81
Şekil 44.	Sonlu elemanda oluşan hasar katsayıları.....	83
Şekil 45.	PGA - HHO ilişkisi.....	84
Şekil 46.	PGA – δ^{kret} ilişkisi.....	85
Şekil 47.	PGV - HHO ilişkisi.....	85
Şekil 48.	PGV - δ^{kret} ilişkisi.....	86
Şekil 49.	ASI - HHO ilişkisi.....	86

Şekil 50.	ASI - δ^{kret} ilişkisi.....	87
Şekil 51.	HHO - δ^{kret} ilişkisi.....	87
Şekil 52.	Deprem kayıtlarının barajda oluşturdukları hasar miktarları.....	89
Şekil 53.	Örnek kemer baraj için sismik kırılma eğrileri.....	91



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Betonun lineer olmayan davranış fonksiyonlarındaki sembollerin tanımları.....	31
Tablo 2. Koyna barajı modelinin malzeme özellikleri.....	49
Tablo 3. Betonun lineer olmayan davranış fonksiyonu katsayıları.....	49
Tablo 4. Koyna barajının periyotları.....	50
Tablo 5. Sismik tehlike hesap parametreleri [164].....	56
Tablo 6. Kemer baraj modelinin malzeme özellikleri.....	60
Tablo 7. Betonun lineer olmayan davranış fonksiyonu katsayıları.....	60
Tablo 8. Modal analiz sonuçları.....	64
Tablo 9. Seçilen deprem kayıtları.....	70
Tablo 10. Deprem seviyesi ile M_w ilişkisi.....	75
Tablo 11. $S_a(T_1) = 0.1$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri.....	76
Tablo 12. $S_a(T_1) = 0.2$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri.....	77
Tablo 13. $S_a(T_1) = 0.3$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri.....	78
Tablo 14. $S_a(T_1) = 0.4$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri.....	79
Tablo 15. $S_a(T_1) = 0.5$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri.....	80
Tablo 16. Hasar seviyeleri ve açıklamaları [116].....	88
Tablo 17. Deprem kayıtlarının barajda oluşturdukları hasar miktarları.....	90
Tablo 18. Hafif Hasar.....	91
Tablo 19. Orta Hasar.....	92
Tablo 20. Ağır Hasar.....	92
Tablo 21. Çeşitli deprem seviyeleri için hasar olasılıkları.....	93

SEMBOLLER DİZİNİ

ADA	: Artımsal Dinamik Analiz
ASI	: İvme Spektrum Şiddeti
ÇSA	: Çoklu Seviye Analizi
d_i^t	: Elemanda oluşan hasar katsayısı
DDA	: Dinamik Dayanıklılık Analizi
DDAF	: Dinamik Dayanıklılık Analiz Fonksiyonu
DP	: Drucker-Prager
EED	: Emniyet Esaslı Deprem
f	: Ölçeklendirme katsayısı
HHO	: Hasarlı Hacim Oranı
Hİ	: Hasar indeksi
İED	: İşletme Esaslı Deprem
KDF	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
KTK	: Karelerinin Toplamının Karekökü
LD	: Limit Durum
M_w	: Moment büyüklük
MTP	: Mühendislik Talep Parametresi
N	: Toplam eleman sayısı
OYF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
P	: Hidrodinamik basınç
PGA	: En büyük yer ivmesi
PGV	: En büyük yer hızı
R^2	: Katsayı
R_i	: Orijinal tepki değeri
\hat{R}_i	: Regresyon tepki değeri
\bar{R}	: Ortalama tepki değeri
R_{rup}	: Fayın kırılma düzlemine olan uzaklık
Sa	: Spektral ivme
Sa(T ₁)	: Yapının birinci periyot spektral ivme değeri

$Sa^{hdf}(T_i)$: Hedef spektral ivme değeri
$Sa^{kyl}(T_i)$: Deprem kaydının spektral ivme değeri
S_d	: Spektral yer değıştirme
S_{DS}	: Kısa periyot
S_{D1}	: 1.0 saniye periyot
S_v	: Spektral hız
ŞÖ	: Şiddet Ölçüsü
V_i	: i'nci elemanın hacmi
T	: Periyot
t	: Zaman
$w(T_i)$: Periyodun ağırlığını gösteren fonksiyon
x, y, z	: Kartezyen koordinatlar
V_{S30}	: Zeminin ilk 30 metre için kayma dalgası hızı
c_0	: Sudaki ses hızı
E_s	: Sıvının hacimsel elastisite modülü
ρ_s	: Sıvının kütle yoğunluğu
g	: Yerçekimi ivmesi
n	: Rezervuar-baraj ara yüzeyi
a_n	: Normal doğrultudaki ivme
$[M_s]$: Sıvı kütle matrisi
$[C_s]$: Sıvı sönüm matrisi
$[K_s]$: Sıvı rijitlik matrisi
$[R]$: Sıvı-yapı ara yüzeyi ile ilgili bir
$\{\ddot{U}_{sy}\}$: Sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı ivmeleri
$\{F_{sg}\}$: Sıvı yük vektörü
$\{P\}$: Hidrodinamik basınç vektörü
$\{\dot{P}\}$: Hidrodinamik basınç vektörünün zamana göre bir kez kısmi türevi
$\{\ddot{P}\}$: Hidrodinamik basınç vektörünün zamana göre iki kez kısmi türevi
$[M_y]$: Yapı ortamına ait kütle matrisi
$[C_y]$: Yapı ortamına ait sönüm matrisi

$[K_y]$: Yapı ortamına ait rijitlik matrisi
$[\ddot{U}_y]$: Yapı ortamına ait ivme vektörü
$[\dot{U}_y]$: Yapı ortamına ait hız vektörü
$[U_y]$: Yapı ortamına ait yer değiştirme vektörü
$\{F_y\}$: Yapının dış yük vektörü
$\{F_{sy}\}$: Yapıya gelen ek dış yük vektörü
$\{\omega_n\}$: Sıvı-yapı etkileşim sisteminin doğal frekans vektörü
U_t	: t anındaki yer değiştirme vektörü
\dot{U}_t	: t anındaki hız vektörü
\ddot{U}_t	: t anındaki ivme vektörü
U_{t+1}	: t+1 anındaki yer değiştirme vektörü
\dot{U}_{t+1}	: t+1 anındaki hız vektörü
\ddot{U}_{t+1}	: t+1 anındaki ivme vektörü
β ve γ	: Newmark integrasyon parametreleri
f_c	: Betonun aksenal basınç dayanımıdır
f_R	: Rankine kırılma fonksiyonu
f_{t-st}	: Betonun statik aksenal çekme dayanımı
T_s	: Aksenal çekme gerilme dayanımı
f_{DPc}	: Basınç gerilmesi altında DP kırılma fonksiyonu
β_c ve σ_{Yc}	: DP basınç fonksiyon katsayıları
R_b	: İki aksenli basınç dayanımı
R_c	: Tek aksenli basınç dayanımı
Ω_t	: Çekmedeki akma fonksiyonu
Ω_c	: Basınçtaki akma fonksiyonu
$f_X(x)$: Olasılık yoğunluk fonksiyonu
F_X	: Kümülatif dağılım fonksiyonu
$\mu_{\ln x}$: $\ln(x)$ 'in ortalaması
$\sigma_{\ln x}$: $\ln(x)$ 'in standart sapmasını
θ_d	: Kırılma fonksiyonunun medyanı
β_d	: $\ln(\hat{\sigma}_d)$ 'nin standart sapması
$\hat{\theta}_d$: Kırılma fonksiyonunun medyanı (tahmin edilen)

$\hat{\beta}_d$: $\ln(\text{ŞÖ})$ 'nün standart sapması (tahmin edilen)
T_R	: Depremın tekrarlama periyotu (yıl)
P_E	: Depremın olma olasılığı
t_L	: Yapının servis ömrü
δ^{kret}	: Baraj kret seviyesi yatay deplasman



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Suyun doğru bir şekilde kullanımını ve yönetimi (içme, sulama, enerji üretimi ve taşkın kontrolü gibi) için barajlar inşa edilmektedir. Ülkemizde 861 adet baraj bulunmaktadır. Her ne kadar bunlardan çok azı beton kemer baraj olsa da kemer barajlar maliyetleri yüksek olan ve enerji elde etmek için inşa edilen özel mühendislik yapılarıdır. Bu barajların yıkılması ya da hasar görmesi, telafisi mümkün olmayan sonuçlar oluşturabilir. Ülkemizde ve dünyada depremden dolayı yıkılan herhangi bir beton kemer baraj yoktur. Fakat hasar gören ve maliyeti yüksek onarım ve güçlendirme geçiren barajlar vardır. Örnek olarak Pacoima kemer barajı (116 m yüksekliğinde, 1971 ve 1994 California depremleri) verilebilir. Bu nedenle, kemer barajların deprem etkisi altındaki performanslarının sürekli olarak kontrol edilmesi önem arz etmektedir.

İnşaat mühendisliğinde performansa dayalı sismik değerlendirme yöntemi, mevcut veya yeni yapılacak olan yapıların farklı depremler etkisi altında alacağı hasarın önceden tanımlanan seviyelere göre performanslarının belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Bu yaklaşımda, hasar seviyesini istatistiksel olarak belirlemek için kullanılan yöntemlerden birisi de kırılma eğrileridir. Kırılma eğrileri, yapıların belirli bir sismik şiddet etkisi altında maruz kalabilecekleri hasar seviyesini olasılık olarak verirler. Dolayısıyla “olasılık eğrileri” olarak da adlandırılırlar. Kırılma eğrileri, ilk olarak nükleer enerji santrallerinin deprem güvenliğini belirlemek için 1980 yılında ortaya konmuş olsa da daha sonra diğer yapı türleri için de elde edilmeye başlanmıştır. Fakat kemer barajların kırılma eğrilerinin oluşturulması konusunda sınırlı sayıda çalışma olduğundan dolayı bu alanda detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır.

1.2. Literatürde Bulunan Tez Kapsamındaki Bazı Çalışması

Bu tez çalışmasının amacına uygun olarak, kemer barajların modellenmesi, dinamik davranışları ve hasar analizleri konularında bir literatür araştırması yapılmıştır.

Kırılma eğrilerinde kullanılan şiddet ölçüleri ve hasar indeksleri, beton ağırlık ve

beton kemer barajlar için benzerlik göstermektedir. Ayrıca kemer barajların kırılgnlık eğrilerinin elde edilmesi konusunda sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu nedenlerden dolayı, kırılgnlık eğrileri ile ilgili literatür araştırması, beton ağırlık barajları da kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

1.2.1. Kemer Barajların Modellenmesi ve Dinamik Davranışları ile İlgili Çalışmalar

Kemer barajların dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar 1980 yıllarında başlamış olup günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalar devam etmektedir.

Chopra vd. [1-6], suyun sıkışabilirlik özelliğini dikkate alarak kemer baraj-rezervuar etkileşim sistemlerinin sismik etki altındaki lineer ve lineer ötesi davranışlarını incelemişlerdir.

Elkhodary [7] kemer barajların yüzeyindeki hidrodinamik basıncı, sınır eleman kullanarak temsil eden bir yöntem ortaya koymuştur.

Clough vd. [8] Çin'de iki adet kemer baraj üzerinde çalışmalar yaparak temel ve rezervuar modellerinin baraj davranışı üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir.

Dowling [9] büzülme derzlerinin kademeli olarak açılıp kapanmasını dikkate alan lineer ötesi analiz yöntemi ortaya koymuştur. Fenves vd. [10] ise bu hareketi temsil eden bir ara eleman tanımlayarak, kemer barajların lineer ötesi davranışını hesaplayan ADAP-88 programını yapmışlardır. Hohber [11] derzleri temsil eden ara elemana kayma hareketini de dahil ederek kemer barajların lineer ötesi davranışı üzerine analitik çalışmalar yapmıştır.

Zhang ve Chopra [12] değişerek yayılan yer hareketini dikkate alarak kemer barajların deprem davranışlarını incelemişlerdir.

Amerikan ordu mühendisleri [13] beton kemer barajların tasarımı için tasarım kriterleri, statik ve dinamik analiz yöntemleri, sıcaklık etkileri, beton deneyleri, temel ve zemin incelemeleri konularında detaylı bilgi sağlayan bir kılavuz hazırlamışlardır.

Feng vd. [14] üç boyutlu sınır elemanlar kullanarak beton kemer barajların dinamik yükler altında çatlak analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Silva ve Julio [15] beton kemer barajları kabuk eleman olarak modellemişlerdir. Membran metodu kullanarak barajın mod şekillerini elde etmişlerdir.

Lan ve Yang [16, 17] beton kemer barajların modellenmesinde kullanılan lineer

olmayan malzeme modellerini araştırmışlardır. Bu amaçla, NFC3D isminde üç boyutlu lineer olmayan analiz yapabilen sonlu eleman programı geliştirerek beton bir kemer barajın dinamik analizlerini geekleştirmışlerdir. Analizler sonucunda barajda oluşan gerilmeleri ve çatlakları incelemişlerdir.

Hall [18] yayılı çatlak modelini kullanarak Pacoima beton kemer barajının lineer olmayan dinamik analizlerini yapabilen bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşımda, yapının modellenmesini, rezervuar ve temel etkileşimini, çatlak oluşumunu, derzlerdeki düğüm noktalarının açılıp kapanmasını, su basıncını, sürtünmeli kayma hareketini ve kesme kırılmasını dikkate almıştır.

Ohmachi ve Jalali [19] yakın fay yer hareketinin ve düşey yer hareketinin kemer barajların lineer dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Uygulama olarak Morrow Point kemer barajı seçilmiş ve baraj kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Yatay yer hareketleri, farklı açılarda uygulanarak barajda oluşan gerilmelerin değişimi incelenmiştir. Ayrıca düşey yer hareketinin barajın davranışına etkisi incelenmiştir.

Camara [20] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sisteminin dinamik davranışını belirlemek amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Geliştirdikleri yöntemde, baraj sonlu elemanlar ile modellenirken rezervuar ve temel ise sınır elemanlar ile temsil edilmiştir. Modelde ayrıca derzlerdeki düğüm noktalarının açılıp kapanması ve değişerek yayılan yer hareketi de dikkate alınmıştır. Bu alışmada Pacoima Barajı uygulama rneği olarak seçilmiş ve baraja 1971 San Fernando depremi etki ettirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda barajda herhangi bir çatlak veya hasar oluşmadığı vurgulanmıştır.

Nassarzade vd. [21] tersinir problem yaklaşımını kullanarak kemer baraj-rezervuar etkileşim sistemlerinin doğal frekanslarını ve mod Şekillerini elde etmişlerdir. Çalışmada deneysel olarak elde edilen doğal frekanslar ve modlar analitik olarak elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Chuhan vd. [22] sedimantasyondan dolayı oluşan yansıma etkilerini iki farklı kemer baraj modelinde incelemişlerdir. Baraj, suyun sıkışabilirlik etkisi dikkate alınarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir.

Ahmedi vd. [23] kemer barajlardaki büzülme derzlerinin çekme ve kesme davranışını, arayüzey elemanlar kullanarak modellemişlerdir. Baraj-rezervuar sistemlerinin sonlu elemanlar metoduyla lineer olmayan analizleri geçekleştirilmiştir ve elemanın kesme davranışı içermeyen sistemlerde daha iyi sonuçlar verdiği grlmştir.

Azmi ve Paultre [24] kemer barajlardaki düşey büzülme derzlerinin açılıp kapanma ve

kayma hareketlerini tanımlayan sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir.

Calayır ve Karaton [25] Karakaya kemer barajının lineer olmayan dinamik davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştirlerdir. Bu çalışmada rezervuar Euler ve Lagrange yaklaşımlarıyla modellenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda her iki yaklaşımdan elde edilen değerlerin yakın olduğu gösterilmiştir.

Lotfi ve Espandar [26] kemer barajlardaki düşey büzülme derzlerinin ve baraj gövdesi etrafındaki inşaat derzlerinin davranışlarını dikkate alan sonlu elemanlar modelleri oluşturmuşlardır. Yapılan detaylı analizlerden elde edilen maksimum çekme gerilmelerinin dağılımı incelendiğinde, derzlerdeki bağlantı elemanlarının tanımlanmasında kullanılan özelliklerin baraj davranışına etkisi olduğu görülmüştür.

Toyoda vd. [27] Japonya'da bulunana bir kemer baraja çevresel ve zorlanmış titreşim testleri uygulayarak barajın doğal frekanslarını elde etmişlerdir. Daha sonra barajın düşey derzlerinin açılıp kapanmasını dikkate aldıkları sonlu elemanlar modelinde dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir.

Noble ve Nuss [28] kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışını incelemek için Morrow Point barajını sonlu elemanlar yöntemi ile modellemiştirlerdir. Modelde rezervuar etkisi Westergaard yaklaşımıyla oluşturulmuş, temel modeli ise esnek ve rijit durumlar için incelenmiştir. Analizler sonucunda elde edilen dinamik karakteristikler daha önceden bu baraj için yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Xiuli ve Jinting [29] kemer baraj-rezervuar-temel kayası sistemlerinin sismik davranışını incelemek için iki farklı model oluşturmuştur. Bunlardan birincisinde eklenmiş kütleli rezervuar yaklaşımı ve ikincisinde rezervuar için sıkışabilir sıvı eleman kullanmıştır. Eklenmiş kütleli yaklaşımda gerilmelerin daha fazla olduğu görülmüştür.

Akköse [30] Drucker-Prager yaklaşımını kullanarak Tip-5 kemer barajının lineer olmayan sismik davranışını incelemiştir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış olup baraj-rezervuar etkileşimi Lagrange yaklaşımı ile temsil edilmiştir.

Akköse vd. [31] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin, 1940 El Centro depremi ivme kaydını kullanarak, hem lineer hem de lineer olmayan dinamik davranışlarını incelemiştirlerdir.

Calayır ve Karaton [32] Karakaya kemer barajının lineer ve lineer olmayan sismik davranışını, Drucker-Prager malzeme modelini kullanarak incelemiştirlerdir. Oluşturulan üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde sıvı-yapı etkileşimi Euler yaklaşımı ile modellenmiştir.

Shahkarami vd. [33] ANSYS sonlu elemanlar programını kullanarak Karun III Kemer Barajı'nın baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemini modellemiştir. Analizler sonucunda, betonda ve temel kayasında oluşan çekme basınç gerilmelerine bağlı olarak kritik bölgeler belirlenmiş ve bu bölgelerde detaylı incelemeler yapılmıştır.

Alves ve Hall [34] üniform ve üniform olmayan deprem yer hareketlerinin kemer barajların sismik davranışı üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmada Pacoima kemer barajı kullanılmış ve değişerek yayılan yer hareketinin önemi vurgulanmıştır.

Sevim vd. [35] tek eğrilikli ve çift eğrilikli kemer barajların dinamik davranışlarını 1940 ElCentro depremi yer hareketini kullanarak SAP2000 programı ile incelemiştir. Çalışmada, sıvı-yapı etkileşimi Wetergaard yaklaşımı ile temsil edilmiştir ve baraj gövdesinin sınırları ankastre kabul edilmiştir. Analizler sonucunda çift eğriliğe sahip kemer barajların deprem davranışının tek eğriliğe sahip kemer barajlara göre daha iyi olduğu vurgulanmıştır.

Du vd. [36] temel modelinin, kemer barajların lineer olmayan deprem davranışına etkilerini incelemiştir. Çalışmada, Xiaowan kemer barajının temel kayası yansıtmayan sınır şartı ile temsil edilerek zaman-tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir.

Sani ve Lotfi [37] kemer barajların modelini oluştururken, hiper-sıvı elemanlar kullanarak, rezervuarı yarı sonsuz olarak modellemiştir. Kemer barajın lineer dinamik analizlerini gerçekleştirerek bu basitleştirilmiş yöntemin etkisini araştırmıştır.

Akköse vd. [38] kemer barajların lineer ve lineer olmayan deprem davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, tip-5 kemer barajının modelinde, betonun lineer olmayan davranışı Drucker-Prager yaklaşımı ile sıvı-yapı etkileşimi ise Lagrange yaklaşımı ile temsil edilmiştir. Barajın dolu ve boş olması durumları dikkate alınarak lineer ve lineer olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Akköse vd. [39] aynı yaklaşım modeliyle beş farklı su seviyesini dikkate alarak su seviyesinin kemer barajların lineer olmayan sismik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Analizlerde ElCentro deprem kaydı kullanılmıştır. Çalışmada, su seviyesindeki artışın barajın tepkilerinde de artışa sebep olduğu vurgulanmıştır.

Bayraktar vd. [40] tip-5 kemer barajının sismik performansını, Imperial Valley (1940), Parkfield (1966) ve Mammoth Lakes (1980) deprem kayıtlarını kullanarak incelemiştir. Çalışmada, zaman-tanım alanında lineer analizler sonucunda elde edilen asal çekme gerilmesi değerlerinin talep-kapasite oranı ve elastik olmayan yığışmalı süre grafikleri gösterilmiştir.

Lemos vd. [41] Cabril Kemer Barajı'nın deprem davranışını düşey derzlerin etkisini dikkate alarak araştırmışlardır. Çalışmada çift eğrilikli barajın üç boyutlu sonlu eleman modeli, derzlerin olması ve olmaması durumları için oluşturulmuştur. Modelde rezervuarın etkisi Westergaard yaklaşımı ile temsil edilmiştir.

Noorzad vd. [42] Amir-Kabir Kemer Barajı'nın lineer olmayan dinamik analizlerini, temel kayasının etrafına sınırsız elemanlar ekleyerek ve suyun sıkışabilirliğini dikkate alarak, gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucunda kütleli modelin, baraj gövdesinde meydana gelen çatlakları düşürdüğü görülmüştür.

Moradloo vd. [43] kemer barajların geometrik bakımdan lineer olmayan davranışını incelemiştir. Morrow Point Kemer Barajı, Saint Venant-Kirchhoff modeline göre büyük yerdeğiştirmeler yapabilen ve rijit temelli olarak modellenmiş ve lineer ötesi analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda barajda oluşan basınç gerilmeleri düşerken, çekme gerilmelerinin arttığı görülmüştür.

Bayraktar vd. [44] yakın fay deprem kayıtlarının baraj-sıvı-temel etkileşim sistemlerinin davranışına etkisini incelemiştir. Çalışmada sıvı-yapı etkileşiminde Lagrange yaklaşımı ve malzeme bakımından lineer olmayan davranış da Drucker-Prager modeli kullanılmıştır. Zaman-tanım alanında lineer olmayan analizler sonucunda, yakın fay depremi etkisinde baraj gövdesinde daha fazla gerilme ve yerdeğiştirmeler olduğu görülmüştür.

Wang ve Chopra [45] barajların değişen yayılı yer hareketi etkisi altındaki davranışını incelemek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem, İsviçre'de bulunan Mauvoisin Kemer Barajı'ndan elde edilen 1996 Valpelline deprem kayıtları kullanılarak, barajın lineer analizleri yapılarak test edilmiştir.

Chopra ve Wang [46] kemer barajların değişerek yayılan yer hareketi etkisindeki davranışlarını incelemiştir. Çalışmada İsviçre'de bulunan Mauvoisin Barajı'nın ve ABD'de bulunan Pacoima Barajı'nın lineer analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda; (1) Mauvoisin Barajı'nda 1996 Valpelline depremi ile yapılan analizlerde, değişerek yayılan yer hareketi dikkate alındığında daha yüksek gerilme değerleri elde edilmiştir. Ancak, baraj yüzeylerindeki gerilme dağılımları fazla değişmemiştir. (2) Pacoima Barajı'nda, 2001 depremi kullanılarak yapılan analizlerde değişerek yayılan yer hareketinin çekme gerilmelerini artırdığı görülmüştür. Ancak, 1994 Northridge depremi ile yapılan analizlerde değişerek yayılan yer hareketinin etkisi çok fazla görülmüştür.

Bayraktar vd. [47] Berke Barajı'na çevresel titreşim testleri uygulayarak barajın mod şekillerini ve doğal frekanslarını elde etmişlerdir. Barajın sonlu elemanlar modeli ANSYS yazılımı kullanılarak ve sıvı-yapı etkileşimi Lagrange yaklaşımı ile oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli deneysel olarak elde edilen değerler kullanılarak düzeltilmiştir. Daha sonra barajın lineer olmayan davranışı Drucker-Prager malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Baraj-sıvı-temel etkileşim sisteminin sonlu elemanlar modeli ile lineer olmayan deprem analizleri yapılarak barajda oluşan yerdeğiştirmeler ve gerilmeler elde edilmiştir. Analizler sonucunda, sonlu elemanlar modelinin deneysel veriler ile güncellenmesinin önemi vurgulanmıştır.

Wang [48] baraj-rezervuar-temel kayası etkileşim sistemlerinin lineer analizlerinde kullanılacak sönüm oranını hesaplamak için, barajın elastisite modülünün temel kayasının elastisite modülüne oranlarını, barajın ve temel kayasının ayrı ayrı sönümlerini değiştirerek bir dizi analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmada Mauvoisin Kemer Barajı'nın frekans alanında lineer analizleri yapılmıştır.

Aminfar vd. [49] İran'da bulunan Karun 4 Kemer Barajı'nın sismik performansını arttırmak için baraj gövdesini parçalara ayırarak modellemiştir. Yapılan analizler sonucunda parçalara ayırarak oluşturulan model, bütün olarak oluşturulan modelden daha düşük gerilme değerleri vermiştir.

Sevim [50] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinde baraj gövde malzeme özelliklerinin barajın sismik performansına etkisini incelemiştir. Çalışmada Tip-5 kemer barajının sonlu elemanlar modeli ANSYS programında oluşturulmuş ve lineer analizler yapılmıştır. Analizlerde barajın beton malzeme özellikleri değiştirilmiş ve barajın talep-kapasite eğrileri elde edilmişti. Çalışmada malzeme özelliklerinin baraj davranışına etkisinin önemi vurgulanmıştır.

Hariri Ardebili ve Mirzabozorg [51] rezervuardaki yüzey dalgalarının, barajın sismik davranışına etkilerini incelemiştir.

Wang vd. [52] kemer baraj-rezervuar-temel kayası etkileşim sistemlerinin lineer olmayan analizi için bir yöntem önermiştir. Oluşturulan modelde baraj-rezervuar ve baraj-temel dinamik etkileşimi, düşey derzlerin açılıp kapanması, yarı-sonsuz temel kayasının yayılma sönümü, suyun sıkışabilirliği ve yarı-sonsuz rezervuarın sönümü dikkate alınmıştır. Ayrıca, modelde yüzey deprem kayıtlarının kullanımı için yeni bir eşdeğer yük şeması tavsiye etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda modelde dikkate alınan bu faktörlerin, barajın deprem davranışında ne kadar etkili olduğu vurgulanmıştır.

Hariri Ardebili ve Mirzabozorg [53] yakın fay deprem kayıtlarının simetrik bir kemer barajın deprem davranışına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada Karaj Kemer Barajı'nın temeli rijit ve kütsüz olarak iki farklı şekilde modellenmiştir ve sonuçlar bu iki model üzerinden karşılaştırılmıştır.

Hariri Ardebili ve Mirzabozorg [54] malzemenin lineer olmayan davranışının ve düşey derzlerin, kemer barajların sismik performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada lineer ve lineer olmayan analizler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Chen vd. [55] sönüm oranının yüksek kemer barajların deprem davranışına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, rezervuar eklenmiş kütle yaklaşımı ile modellenmiştir. Ayrıca temel kayası, %5 sönümlü kütsüz, %10 sönümlü kütsüz ve %5 sönümlü kütleli ve sonsuz sınır şartlı olarak üç farklı şekilde modellenmiştir ve analiz edilmiştir.

Zeinizadeh ve Mirzabozorg [56] geometri bakımından lineer olmayan davranışın, yüksek kemer barajların sismik davranışına olan etkilerini incelemişlerdir. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde barajın büyük yerdeğiştirmeler yapabilmesine izin verilmiş, temel kayası kütsüz olarak alınmış, düşey derzlerin hareketine izin verilmiş ve derzlerin arasına su basıncının etkimesine izin verilmiştir.

Hariri-Ardebili vd. [57] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sitemlerinin sismik davranışlarını, gerilmeye bağlı ve birim şekil değiştirmeye bağlı olarak iki farklı şekilde değerlendirmiştir. Analizler sonucunda strese bağlı yaklaşımda barajın kemer etkisi konservatif sonuçlar verirken, birim şekil değiştirmeye bağlı yaklaşımda ise konsol etkisi konservatif sonuçlar vermektedir.

Hariri Ardebili ve Mirzabozorg [58] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sitemlerinin sismik dayanımlarını, gerçek deprem kayıtları ve suni olarak üretilen deprem kayıtları kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada, temel kayası i) kütsüz, ii) kütleli ve sonsuz sınır elemanlı ve iii) kütleli ve viskoz sönümlü olarak üç farklı şekilde modellenmiştir. Deprem kayıtları sonlu elemanlar modellerine üç yönlü ve aynı anda etki ettirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kütsüz modelde daha fazla gerilmelerin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca deprem yer hareketi süresinin kısa olduğu zaman modeller arasında fazla farkın olmadığı ancak süre uzayınca farkın da arttığı görülmüştür.

Hamidian vd. [59] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sitemlerinin deprem davranışlarını lineer ve lineer olmayan yöntemlerle incelemişlerdir. Çalışmada, temel kayası rijit ve esnek olarak ve ayrıca rezervuarın dolu ve boş olması durumları dikkate alınarak

analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda malzeme bakımından lineer olmayan davranışın kemer barajlar üzerindeki etkileri vurgulanmıştır.

Tarinejad vd. [60] ve Akbari vd. [61] kemer barajların deprem davranışını değiştirerek yayılan yer hareketini dikkate alarak incelemiştir. Tarinejad vd. [60] değiştirerek yayılan yer hareketi kayıtlarını sismik dalga saçılma analizleri sonucunda elde etmişlerdir. Elde edilen kayıtlar ile yapılan analizler sonucunda elde edilen yerdeğiştirmeye değerlerinin, kayıtlardan elde edilen yerdeğiştirme değerlerine yakın olduğu görülmüştür. Akbari vd. [61] ise değiştirerek yayılan yer hareketi kayıtlarını Monte-Carlo Simülasyon tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Analizler sonucunda değiştirerek yayılan yer hareketinin baraj gövdesindeki gerilme değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Hariri Ardebili vd. [62] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin sismik güvenilirliklerini dört farklı su seviyesi için lineer analizler yaparak incelemiştir.

Hesari vd. [63] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin sismik davranışlarını, baraj gövdesini düşey derzleri ile ve yekpare olarak iki farklı şekilde modelleyerek incelemiştir. Çalışmada, düşey derzlerin baraj davranışına etkisi vurgulanmıştır.

Hariri Ardebili ve Saouma [64] yakın ve uzak fay deprem etkilerinin kemer barajlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. İran'da bulunan Karaj kemer barajının sonlu elemanlar modelinde temel kayasını rijit, kütleli ve kütsüz olarak üç farklı şekilde modelleyerek baraj modeli üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Bu çalışmada iki set yakın ve uzak fay ivme kayıtları seçilerek baraja etki ettirilmiştir. Yakın fay depremleri uzak fay depremlerine göre baraj üzerinde daha fazla yerdeğiştirme ve gerilme oluşturdukları gözlemlenmiştir. Kütsüz modelde ise en yüksek yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır.

Hariri Ardebili ve Kianoush [65] yüksek kemer barajların sismik davranışlarını, bütün lineer olmayan davranışları sonlu elemanlar modeline etkileyerek incelemiştir. Deprem analizlerinden önce, sonlu elemanlar modeli statik ve termal olarak kalibre edilmiştir. Analizler sonucunda, sonlu elemanlar modelinde dikkate alınan lineer olmayan etkilerin önemi vurgulanmıştır.

Garcia vd. [66] kemer barajların sismik davranışlarını, rezervuar seviyesine göre ve rezervuar kısmında biriken sedimentin seviyesine göre incelemiştir.

Ferdousi vd. [67] temel kayasının homojen olmayan özelliklerinin, kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin deprem davranışlarına etkisini incelemiştir.

Hariri-Ardebili ve Kianoush [68] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin sismik davranışlarını, açılmış düşey derzlerin arasındaki basınç etkisini de dikkate alarak, suni olarak üretilen deprem kayıtları ile incelemiştir.

Jianwen vd. [69] kemer baraj-temel etkileşim sisteminin sismik dayanımını, sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Modelde temel kayasının homojen olmayan malzeme özellikleri ve bölgede bulunan fay kırıkları da dikkate alınmıştır.

Hesmati vd. [70] kemer baraj-rezervuar-temel kayası etkileşim sistemlerinin sismik performanslarını, gerilmeye bağlı ve birim şekil değiştirmeye bağlı olarak incelemiş ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Zaman tanım alanında lineer analizler yapılarak, barajın talep-kapasite eğrileri oluşturulmuştur.

Hariri Ardebili vd. [71] değişerek yayılan yer hareketi etkisinde, kemer baraj-rezervuar-temel kayası etkileşim sistemlerinin lineer sismik performanslarını, stokastik analizler ile incelemiştir. Analizler sonucunda, değişerek yayılan yer hareketinin barajda oluşan yerdeğişimleri ve su basıncını düşürdüğü görülmüştür. Baraj gövdesinde oluşan maksimum asal gerilme bölgeleri, düzgün yayılan yer hareketi etkisinde barajın üst kısımlarında iken değişerek yayılan yer hareketi etkisinde bu bölgeler aşağıda oluşmaktadır. Çalışmada, değişerek yayılan yer hareketinin kemer baraj-rezervuar-temel kayası etkileşim sistemlerinin analizlerinde dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Hariri Ardebili vd. [72] kemer baraj-rezervuar-temel kayası etkileşim sistemlerinin, sismik etki altındaki kademeli hasar miktarını belirlemek için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Buna göre, sonlu elemanlar modelinde dinamik dayanıklılık analizi metodu kullanılarak lineer olmayan analizler yapılmıştır. Çalışmada, kemer barajların hasarı için dört farklı limit durum belirlenmiştir: 1. Düşey derz hasarı 2. Yerel malzeme kırıkları 3. Genel hasar 4. En üst düzey hasar. İki farklı kemer baraj için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar, zaman-tanım alanında lineer olmayan analizlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların makul bir şekilde uyumlu olduğu görülmüştür.

Omid ve Lotfi [73] sıvı-yapı etkileşimde kullanılan Euler yaklaşımının simetrik olmayan matrislerin çözümü için yeni bir simetrik yöntem önermişlerdir. Çalışmada, bu yöntemin kemer barajların dinamik analizlerinin süresini daha kısalttığı vurgulanmıştır.

1.2.2. Kemer Barajların Hasar Analizleri ile İlgili Çalışmalar

Kemer barajların sismik hasar analizleri sonucunda baraj gövde betonunda

oluşabilecek hasar miktarları belirlenir. Bu hasarları elde etmek için betonun lineer olmayan davranışını dikkate alarak yapılan çalışmalar mevcuttur.

Espandar ve Lotfi [74] kemer barajların dinamik davranışını incelemek için beton malzemeyi, ortogonal olmayan yayılı çatlak modeli ve elasto-plastik model yaklaşımları ile modellemişlerdir. Analizler sonucunda elde edilen değerler birbirleriyle karşılaştırmışlardır.

Lotfi ve Espandar [75] beton malzemenin lineer olmayan davranış modellerinden ortogonal olmayan yayılı çatlak ve ayırık çatlak yöntemlerinin beraber çalıştığı, kemer barajlar için bir sonlu elemanlar programı geliştirmişlerdir. Bu program kullanılarak yapılan kemer barajların sismik analizlerinden elde edilen sonuçlar diğer basitleştirilmiş yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Bu her iki yöntemin de bir arada çalıştığı modelin, diğer modellerden daha gerçekçi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Karaton [76] kemer barajlarda oluşan sismik hasarların yerlerini belirlemek için Tip-5 kemer barajın sıvı-yapı-temel etkileşimi de dikkate alarak incelemiştir. Yapılan lineer ve lineer olmayan analizler sonucunda hasarın genellikle kret seviyesinde ve barajın alt ve yan kenarlarında oluştuğu vurgulanmıştır.

Mirzabozorg ve Ghaemian [77] beton malzemeyi yayılı çatlak yaklaşımı ile modelleyerek kemer barajların lineer olmayan sismik davranışını üç boyutlu olarak incelemiştir.

Zhong vd. [78] Çin’de bulunan çift eğrilikli ve 296 m yüksekliğindeki bir beton kemer barajın, Mohr-Coulomb malzeme modelini kullanarak, lineer olmayan davranışını deprem yükü altında incelemiştir. Deprem analizleri sonucunda çatlakların ilk olarak kretin orta üst noktalarında meydana geldiği ve daha sonra yamaçlara ve orta bölgeye doğru genişlediği belirtilmiştir.

Hariri Ardebili vd. [79] dinamik dayanıklılık analiz yöntemini kullanarak kemer barajların farklı seviyelerdeki performansını değerlendirmiştir. Bu yöntemde, yoğunlaştırılmış ivme fonksiyonları kullanılarak analizler yapılmış ve sonuçlar zaman-tanım alanında yapılan analizlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Alembagheri ve Ghaemian [80] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemlerinin sismik hasar analizlerini, lineer olmayan artımsal dinamik analiz metodu ile değerlendirmiştir.

Wang vd. [81] Pacoima kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sisteminin deprem hasar analizlerini lineer olmayan yöntemler ile yapmıştır. Modelde baraj-temel yüzeyinde değişerek yayılan yer hareketi de dikkate alınarak 1994 Northridge depremi ile analizler

yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda yüzeyde kaydedilen deprem kayıtlarının, barajda oluşan hasarı tespit edemediği görülmüştür. Çalışmada, analizlerde değişerek yayılan yer hareketinin dikkate alınmasının önemi vurgulanmıştır.

Hariri Ardebili ve Mirzabozorg [82] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sitemlerinin sismik dayanımlarını, baraj gövdesini izotropik ve ortotropik malzemeler ile modelleyerek incelemiştir. Çalışmada lineer ve lineer olmayan analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda, ortotropik malzeme davranışı, izotropik malzemeye göre daha fazla yer değiştirme değerleri vermiştir.

Meghella ve Furgani [83] dinamik dayanıklılık analiz yöntemini kullanarak yaparak kemer barajların farklı seviyelerdeki deprem performansını değerlendirmiştir. Modelde düşey derzler ve betonun plastik davranışı dikkate alınmıştır. Yapılan bu dinamik analizleri, zaman-tanım alanında lineer olmayan analizlerle karşılaştırılmıştır. Bu yöntemin barajların deprem değerlendirmesinde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Hariri Ardebili [84] temel kayasının lineer olmayan malzeme davranışının, beton barajların deprem davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, beton malzeme Willam-Wanke kırılma kriteri ve temel kayası Drucker-Prager akma kriteri ile modellenmiştir. Temel kayasının sınırlarına viskoz sönümleyici elemanlar yerleştirilerek dışa giden dalgalar sönümlenmiştir. Analizler sonucunda, temel kayasının lineer olmayan davranışının, baraj gövdesinde daha fazla çatlak oluşmasına sebep olduğu görülmüştür.

Hariri-Ardebili ve Mirzabozorg [85] kemer barajların lineer olmayan davranışını dinamik dayanıklılık analiz yöntemi ile ve klasik zaman-tanım alanında lineer olmayan analiz yöntemleri ile incelemiştir. Analizler sonucunda her iki yöntemle elde edilen çatlakların uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Pan vd. [86] kemer baraj-rezervuar-temel etkileşim sitemlerinin sismik performanslarını, lineer olmayan artımsal dinamik analiz metodu ile değerlendirmiştir. Çalışmada rezervuar eklenmiş kütle yöntemi ile modellenmiştir.

Hariri Ardebili ve Seyed Kolbadi [87] beton barajların sismik çatlak oluşumlarını yayılı çatlak modeli kullanarak incelemiştir. Kırılma kriteri olarak Willam ve Warnke metodu kullanılmıştır. Analizler sonucunda, çatlakların daha az alana yayıldığı görülmüş ve çatlaklar literatüre uygun bölgelerde oluşmuştur.

Wang vd. [88] suni olarak üretilen ivme kayıtlarının kemer barajların sismik davranışına ve hasar oluşumuna etkisini incelemiştir. Çalışmada, tepki spektrumları, en büyük ivme değerleri, hızları ve yerdeğiştirmeleri aynı olan, 32 adet suni ivme kaydı

oluşturularak lineer olmayan analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda, barajın bu ivme kayıtlarına verdiği tepkilerin farklı düzeyde oldukları görülmüştür.

Omidi ve Lotfi [89] kemer barajların lineer olmayan sismik analizlerini yapmak için yeni bir sonlu elemanlar programı yapmışlardır. Bu programda, betonun çekme çatlağını ve basınç ezilmesini kapsayan plastik-hasar tekniğini ve ayırık çatlak yaklaşımını birleştirmişlerdir. Çalışmada, bu yöntemin kemer barajların lineer olmayan analizlerinde etkisi vurgulanmıştır.

Wang vd. [90] değişerek yayılan yer hareketinin yüksek kemer barajların üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada daha önce Tsinghua Üniversitesi'nde geliştirilen yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, yarı-sınırlı kanyonun ışımaya sönümü, baraj-rezervuar etkileşimi, büzülme derzlerinin açılıp-kapanma hareketi, betonun sismik çatlak hasarı ve temel kayasının lineer olmayan davranışı dikkate alınmaktadır. Çalışmada, Pacoima kemer barajının üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve barajın davranışı 1994 Northridge depremi kullanılarak incelenmiştir. Analiz sonucunda modelde oluşan hasarın gerçekte oluşan hasar ile örtüştüğü belirtilmiştir.

1.2.3. Yer Hareketi Parametreleri ile Hasar İlişki ile İlgili Bazı Çalışmalar

Baraj türü yapıların, yer hareketi parametreleri ile Mühendislik Talep Parametresi (MTP) veya Hasar İndeksi (Hİ) arasındaki ilişkisi bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Hariri-Ardebili vd. [91] İran'da bulunan Dez çift eğrilikli beton kemer barajın sonlu elemanlar modelini, baraj gövdesinde bulunan düşey derzleri de dikkate alarak oluşturmuştur. Modelde sıvı-yapı etkileşimi Eulerian-Lagrangian yaklaşımı ile temel ise kütsüz olarak modellenmiştir. Çoklu seviye analizi (ÇSA) yaklaşımı kullanılarak lineer ve lineer olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. ÇSA'da üç farklı seviye ve her seviyede 9 adet yer hareketi kullanılmıştır. Lineer analizlerde Hİ olarak hasar dağılım oranı (gerilme dayanımını aşan alanın, toplan alana oranı) ve 9 farklı yer hareketi parametresi seçilmiştir. Analizler sonunda, Hİ ile en yüksek korelasyonun en büyük yer ivmesi (PGA) ve ivme spektrum şiddeti (ASI) arasında olduğu belirlenmiştir. Bu parametreler ile Hİ arasında R^2 değeri sırasıyla 0.634 ve 0.671 olarak elde edilmiştir.

Hariri-Ardebili ve Saouma [92] Kaliforniya Pine Flat beton ağırlık barajının iki boyutlu sonlu elemanlar modelinin yapısal tepkilerini, bulut analizi yöntemi ile

incelemişlerdir. Bu kapsamda 100 adet ölçeklenmemiş deprem yer hareketi kullanılarak kret yatay deplasmanları elde edilmiştir. Ayrıca yer hareketlerinin 70 adet parametresini beş ayrı kategoride incelemişlerdir. Bu kategoriler i) ölçeklenemeyen ŞÖ, ii) yer hareketine bağlı tekil ŞÖ, iii) yer hareketine bağlı birden fazla tekil ŞÖ'nün göz önüne alınarak elde edildiği bileşik ŞÖ, iv) yapıdan bağımsız spektral ŞÖ, v) yapıya bağlı spektral ŞÖ ve vi) vektör-tabanlı ŞÖ. Bulut analizi sonucunda elde edilen MTP-ŞÖ ilişkisiyle yapılan lineer regresyonlarda en büyük R^2 değerleri yapının birinci mod spektral ivme $Sa(T_1)$, spektral hız $Sv(T_1)$ ve spektral yer değiştirme $Sd(T_1)$ parametreleri için sırasıyla 0.87, 0.85 ve 0.87 olarak elde edilmiştir. Diğer bazı parametrelerden elde edilen R^2 değerleri ise en büyük yer hızı (PGV) için 0.67, ivme spektrum şiddeti (ASI) için 0.67 ve en büyük yer ivmesi (PGA) için 0.42'dir.

Liang vd. [93] çift eğrilikli bir beton kemer barajın sonlu elemanlar modelinde, betonda plastik hasar oluşabileceği ve düşey derzlerin açılabilceğini dikkate almışlardır. Sıvı-yapı etkileşim modeli ise daha kolay analiz yapabilmek için eklenmiş kütle yaklaşımı ile oluşturulmuştur. Dinamik dayanıklılık analiz (DDA) yöntemini kullanmak için baraj bölgesinin depremsellik düzeyine uygun 14 adet yer hareketi seçmişlerdir. Bu yer hareketlerinin yatay ve düşey ortalama tepki spektrumları hedef spektrum alınarak, zaman tanım aralığında dinamik dayanıklılık analiz fonksiyonları (DDAF) (ivme kayıtları) türetilmiş ve türetilen ivme kayıtları kullanılarak analizler yapılmıştır. Maksimum deplasman MTP olarak seçilmiş ve diğer parametreler ile arasındaki korelasyon lineer regresyon yapılarak elde edilmiştir. ASI, $Sa(T_1)$ ve PGA ile maksimum tepe deplasman ilişkisi için elde edilen R^2 değerleri sırasıyla 0.87, 0.84, 0.81 olarak belirlenmiştir.

1.2.4. Beton Barajların Kırılma Eğrilerinin Elde Edilmesi ile İlgili Çalışmalar

Beton barajların kırılma eğrilerinin elde edilmesi konusunda yapılan çalışmalar, performansa dayalı deprem mühendisliği alanındaki gelişmeler ile son yıllarda artmıştır.

İlk kez De Araujo ve Awruch [94] bir beton ağırlık barajın sismik değerlendirmesini olasılıksal yöntem ile yapmıştır. Çalışmada Brezilya'da bulunan Tucuruı beton ağırlık barajının sonlu elemanlar modeli, baraj-rezervuar-temel etkileşimi dikkate alınarak oluşturulmuştur. Betonun özellikleri ve sismik etki rastgele değişken alınarak Monte Carlo Yöntemi (MCY) ile 50 adet olasılıksal analiz yapılmıştır. Barajın tabanındaki çatlamanın güvenlik katsayılarının kümülatif dağılım fonksiyonları oluşturulmuştur.

Ellingwood ve Tekei [95] iki boyutlu bir beton ağırlık barajın malzeme özelliklerini ve sismik etkiyi rastgele değişken olarak Latin Hiperküp Örnekleme (LHÖ) yöntemi ile analizler yapmıştır. Seçilen 12 adet deprem kaydının spektral ivme (S_a) değerleri, 6 farklı seviyeye (0.3 g, 0.5 g, 0.7 g, 0.9 g, 1.0 g ve 1.2 g) ölçeklenerek toplam 72 adet analiz yapılmıştır. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinde baraj-rezervuar-temel etkileşimi dikkate alınmış ve dört farklı limit durum (LD) incelenmiştir: i) barajın boyun bölgesindeki betonun çekmede veya basınçta çatlaması, ii) barajın topuk bölgesindeki temel kayasının hasarı, iii) baraj-temel arasındaki kayma ve iv) baraj kretinin tabana göre yer değiştirme oranı. Analizler sonucunda bu dört farklı LD için lognormal dağılıma uygun kırılma eğrileri elde edilmiştir.

Lin ve Adams [96] doğu ve batı Kanada'da bulunan beton barajlar için bir dizi ampirik sismik kırılma eğrisini, Kaliforniya için ATC-13 raporunda [97] verilen hasar olasılıklarını kullanarak, elde etmişlerdir.

Yao vd. [98] bir beton kemer barajın sismik kırılma eğrisini elde etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, ÇSA-ADA yaklaşımı birlikte kullanılmıştır. Seçilen barajda 25 tane düşey derz bulunurken, modelde 3 tanesi dikkate alınmıştır. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde Westergard [99] yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmada sadece sismik etkinin değişkenliği dikkate alınmıştır. Toplamda 18 adet deprem kaydı seçilmiş ve bu yer hareketleri üç gruba ayrılarak (her grupta 6 adet kayıt) en büyük yer ivme (PGA) değerlerine göre ölçeklenmiştir. I. Grup 0.1 ve 0.2 g 'ye, II. Grup 0.3, 0.4 ve 0.5 g 'ye III. Grup 0.6, 0.7 ve 0.8 g 'ye ölçeklenmiştir. Toplam 48 adet analiz gerçekleştirilerek, derzlerdeki kayma ve açılma miktarı ile barajın yer değiştirmesi elde edilmiştir.

Yücel [100] EAGD-84 sonlu elemanlar kodunu [101] kullanarak tipik 2-boyutlu beton barajların sismik kırılma eğrilerini elde etmiştir. Modellerde, baraj yüksekliği, mansap yüzey eğimi, betonun ve temel kayasının elastisite modüllerinin oranı ve betonun çekme dayanımı parametreleri dikkate alınmıştır. Toplamda 135 farklı model ve her model için 20 lineer sismik analiz koşulmuştur. Dolayısıyla çalışmada toplam 2700 analiz düşey etki dikkate alınmadan yapılmıştır.

Zhong vd. [102] yer hareketinin ve beton malzemenin değişkenliği dikkate alınarak MCY ile bir kemer barajın lineer olmayan analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Altı farklı limit duruma göre kırılma eğrileri, lognormal kümülatif dağılım fonksiyonu ile elde edilmiştir.

Abdelhamid vd. [103] çalışmalarında bir beton ağırlık barajının sismik kırılma eğrilerini, hem sismik etkinin hem de modellemenin belirsizliklerini dikkate alarak, Tekei

ve Ellingwood'un çalışmasında [95] verilen yöntem ile oluşturmuşlardır. Çalışmada sonlu elemanlar modeli iki boyutlu olup dört farklı limit durum göz önüne alınmıştır. Ayrıca 6 adet yakın fay etkili yer hareketi seçilerek sözde-spektral ivme (PSA) değerleri 0.2 ile 2.0 g arasında 0.2 artımla ölçeklenerek modele uygulanmıştır.

Ghanaat vd. [104] Mühleberg beton ağırlık barajının sismik kırılmalık eğrilerini [95]'de kullanılan yöntemle benzer bir yaklaşım ile elde etmişlerdir. Çalışmada LS-DYNA yazılımı kullanılarak tribün binası, temel kayası ve rezervuar da dikkate alınarak, üç boyutlu olarak modellenmiştir. Sismik etki olarak, ivme kayıtları yerine gerilme kayıtları kullanılmıştır. Zaman tanım alanında analizler için modele ilk olarak yatay en büyük yer ivme (PGA) değeri 0.85 g olan kayıtlar etki ettirilmiştir. Daha sonra iki yüksek seviye (0.95 ve 1.10 g) ve beş düşük seviye (0.75, 0.675, 0.60, 0.52 ve 0.3872 g) depremler etki ettirilerek lognormal kümülatif dağılım fonksiyonları uydurulmuştur. Benzer çalışma, analiz sayısı 10'a düşürülerek Ghanaat vd. [105] tarafından yer hareketleri 0.05'ten 1.10 g'ye kadar ölçeklenmiş ve kırılmalık eğrisi Weibull dağılımı kullanılarak yapılmıştır.

Mirzabozorg vd. [106] bir beton kemer barajın sismik kırılmalık eğrilerini üç farklı performans seviyesi (kullanışlılık, kontrollü hasar ve göçme öncesi) için elde etmişlerdir. Çalışmada oluşturulan sonlu elemanlar modelinde sadece gövdedeki inşaat derzleri ve gövde çevresindeki derzlerin lineer olmayan davranışı dikkate alınmıştır. Modele, 9 adet üç bileşenli yer hareketi çeşitli seviyelere ölçeklenerek etki ettirilmiştir. Şiddet ölçüsü olarak (ŞÖ), spektral ivme (Sa), en büyük yer ivmesi (PGA) ve en büyük hız (PGV) değerleri seçilmiştir. Mühendislik talep parametresi, ilk olarak Ghanaat [107] tarafından önerilen, gövdenin memba ve mansap yüzeylerinde oluşan aşırı gerilme alanının yüzdesi seçilmiştir. Bu alan, betonun çekme dayanımının aşıldığı alan olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, 5.'inci dereceden polinom eğrileri (spline) uydurularak kırılmalık eğrileri elde edilmiştir.

Hariri-Ardebili vd. [108] bir beton kemer barajın sismik kırılmalık eğrilerini, çoklu seviye analizi (ÇSA) yöntemi ile elde etmişlerdir. Bu yöntemde, 9 adet yer hareketi, üç farklı sismik yoğunluk seviyesine ölçeklenerek 27 adet zaman tanım alanında lineer olmayan analizler yapılmıştır. Burada yer hareketleri, belirli bir şiddet ölçüsü (ŞÖ) yerine hedef sismik tepki spektrumuna ölçeklenmiştir. Dolayısıyla, farklı ŞÖ 'ne karşılık gelen hasarlar (çatlaklar) ve talep parametreleri (derzlerin açılması ve göreceli kayması) elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca 27 adet lineer analiz yapılmış ve lineer olmayan modellerle karşılaştırılarak aralarındaki ilişki kırılmalık eğrisi açısından incelenmiştir.

Hariri-Ardebili ve Saouma [92] Pine Flat beton ağırlık barajının sismik kırılmalık

eğrilerini, bulut analiz yöntemi ile elde etmişlerdir. Bu yöntemde 100 adet yer hareketi, bir deprem senaryosuna göre Matlab tabanlı yazılım [109] kullanılarak seçilmiş ve modele uygulanmıştır. Ayrıca, çalışmada 70 adet farklı ŞÖ kullanılarak optimum olanları belirlenmiştir. Barajın modellenmesi ve analizlerinde Merlin [110] sonlu elemanlar kodu kullanılmıştır. Aynı modelin artımsal dinamik analiz (ADA) yöntemi ile sismik kırılma eğrilerini Hariri-Ardebili ve Saouma [111] elde etmiştir. Barajın dolu ve boş olması durumu ve deprem kaydının düşey bileşeninin etkisi dikkate alınarak 21 adet deprem kaydı 14 farklı sismik yoğunluk seviyesinde analizler yapılmıştır.

Hariri-Ardebili ve Saouma [112] iki boyutlu bir barajın sismik kırılma eğrilerini dinamik dayanıklılık analiz yöntemi ile elde etmişlerdir. Bu yöntemde, genliği zamanla artan sentetik olarak üretilen tek bir yer hareketi yapıya uygulanmaktadır.

Bernier vd. [113] bir beton ağırlık barajının, üç boyutlu baraj-rezervuar-temel etkileşim modelini LS-DYNA yazılımında oluşturarak ve analizler yaparak sismik kırılma eğrilerini elde etmiştir. Modelde beton ve temel kayası için lineer elastik elemanlar ve rezervuar için de yer değiştirmeye dayalı sıvı elemanlar (Lagrange yaklaşımı) kullanılmıştır. Temel kayası kütleli ve yansıtmayan sınır yüzeyli olarak modellenmiştir. Gövde ile temel kayası arasındaki yüzey ve gövdenin boyun bölgesindeki yatay derz lineer olmayan davranış ile temsil edilmiştir. Çalışmada sentetik olarak üretilen yer hareketlerinden hedef spektruma uyumlu olan 20 tanesi kullanılmıştır. Rastgele değişken olarak, lineer ötesi davranış gösteren yüzeylerin parametreleri (kohezyon, çekme dayanımı ve sürtünme açısı) ve sönüm oranı alınmıştır. Latin Hiperküp Örnekleme yöntemi ile birinci periyot spektral ivmesi $S_a(T_1)$ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9 ve 1.1 g seviyelerinde analizler yapılmıştır. Çalışmada limit durum (LD) olarak, lineer ötesi davranış gösteren yüzeylerin kayma değerleri kullanılmış ve dört farklı hasar seviyesinde incelenmiştir. Kırılma eğrileri normal, log-normal ve Weibull dağılımları ile elde edilmiş. Benzer çalışma, Bernier vd. [114] tarafından çoklu seviye analizi (ÇSA) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sismik tehlike analizi, yedi farklı seviyede $S_a(T_1)$ değeri 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 ve 0.9 g için (tekrarlama periyodu 350-20,000 yıl) yapılmıştır. Çalışmada her seviye için 20 adet yer hareketi, eşit (uniform) tehlike spektrumu yerine, değişken (veya koşullu) tehlike spektrumları kullanılarak seçilmiş ve ölçeklenmiştir. Önceki çalışmadaki LD, hasar seviyeleri ve LHÖ kullanılarak kırılma eğrileri lognormal kümülatif dağılım fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Daha sonra analizler rastgele değişkenler olmadan ve eşit tehlike spektrumları kullanılarak seçilen yer hareketleri ile artımsal dinamik analiz (ADA)

metoduyla tekrarlanmıştır. Yer hareketlerinin seçiminde kullanılan yöntemler karşılaştırıldığında, ÇSA sonuçlarının daha büyük ortalama ve sapma değerleri dolayısıyla daha düşük aşılma olasılıkları verdiği görülmüştür. Ayrıca değişken (koşullu) tehlike spektrumları kullanıldığında, modele/malzemeye bağlı rastgele değişkenlerin etkisinin azaldığı vurgulanmıştır.

Alembagheri ve Ghemian [115] kemer barajların sismik performanslarını, baraj gövdesindeki düşey derzlerin sayısının değişimine göre incelemiştir. Sonlu elemanlar modelinde üç derzli ve yedi derzli modeller dikkate alarak lineer olmayan artımsal dinamik analizler (ADA) gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada on iki adet yer hareketi, barajın 1. mod periyod değerinde spektral ivmesi ($Sa(T_1)$) 0.1 – 1.2 g arasında 0.1 g adım aralığında ölçeklenmiştir. Elde edilen ölçekleme katsayısı yer hareketlerinin diğer bileşenlerine de uygulanarak üç bileşenli analizler yapılmıştır. Ayrıca hasar indeksi olarak da üç farklı parametre belirlenmiştir: 1. Derzlerin açılması ve kayması 2. Kretin radyal yerdeğişimesi 3. Hasar ile emilen enerji miktarı. Her bir model için yapılan 144 analiz sonucunda hasar ölçüsü-şiddet ölçüsü değerleri kullanılarak ADA eğrileri elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada, baraj gövdesindeki derzlerin sayısının artışı, çekme gerilmelerinin ve derzlerdeki açılmanın düşmesine sebep olduğu görülmüştür.

Wang vd. [116] bir beton kemer barajın sismik kırılma eğrilerini ADA yöntemi ile elde etmişlerdir. Baraj-rezervuar-temel etkileşim sisteminde rezervuarın etkisi eklenmiş kütle yaklaşımı ile temsil edilmiştir. Ayrıca, gövdede bulunan büzülme derzlerinin açılıp kapanması ve betonun lineer olmayan davranışı da sonlu elemanlar modelinde dikkate alınmıştır. Betonun çekme dayanımı, betonun elastisite modülü, sönüm oranı ve temel kayasının elastisite modülü rastgele değişkenler olarak kabul edilmiş ve LHÖ yöntemi ile beş adet örnek set üretilmiştir. Analizler için 10 adet üç bileşenli yer hareketi seçilmiştir. Yer hareketlerinin en büyük yer ivmesi (PGA) değeri kullanılarak her bir kayıt 0.1 g adım aralığı ile 0.1 – 1.0 g arasında ölçeklenmiştir. Ancak, yer hareketlerinin ölçeklenmesi ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmemiştir. Her bir PGA değerinde 50 adet analiz ve toplamda da 500 adet zaman tanım alanında lineer olmayan analiz yapılmıştır. Analizler sonucunda, hasar dağılımı, dinamik yerdeğiştirme ve derz açılma miktarları göz önüne alınarak, oluşturulan 3 farklı limit durum (LD) için kırılma eğrileri elde edilmiştir. Eğriler bir polinom fonksiyon (spline) ve lognormal dağılıma göre uydurulmuştur. Spline eğrisinin verilerle daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Hariri-Ardebili vd [117] malzeme bakımından değişkenliğin bir beton kemer barajın sismik davranışı üzerindeki etkisini yanıt yüzeyi yöntemi ile incelemiştir. Analizlerdeki benzetim (simülasyon) sayısını en aza indirmek için Box-Behnken tasarımı ve LHÖ metodu kullanılmıştır.

Segura vd [118] bir beton ağırlık barajın sismik kırılgnlık eğrilerini, barajın gövdesi ile temel kayası arasındaki yüzeyin ve gövdenin boyun bölgesindeki yatay derzin kaymaya göre LD dikkate alınarak, çoklu seviye analizi (ÇSA) yöntemi ile elde etmişlerdir. Barajın sonlu elemanlar modeli Bernier vd. [113]'de ki çalışmaya benzerdir. Barajın bulunduğu bölge için olasılıksal sismik tehlike analizi yapılmış ve şiddet ölçüsü $S_a(T_1=0.25s)$ değeri için 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 ve 0.9 g (tekrarlama periyodu 700-30,000 yıl) seviyeleri belirlenmiştir. Daha detaylı bir deprem senaryosu (magnitüt ve mesafe) için bu yedi seviyeye sismik ayrışma uygulanmış ve her seviye için koşullu hasar spektrum eğrileri oluşturulmuştur. Her bir seviye için 30 adet yer hareketi seçilmiştir. Modelde kullanılan parametrelerin bir kısmı rastgele değişken olarak seçilmiş ve LHÖ yöntemi ile 30 adet örnek set oluşturulmuştur. Her bir seviye için seçilen 30 yer hareketi oluşturulan 30 adet örnek set ile rastgele eşleştirilerek toplamda 210 adet analiz yapılmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, performansa dayalı deprem mühendisliği yaklaşımının, beton kemer baraja uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, yapıların performanslarını belirlemek için yaygın olarak tercih edilen kırılgnlık eğrileri kullanılmıştır. Literatür araştırmasında da verildiği gibi beton kemer barajların kırılgnlık eğrilerinin elde edilmesi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu çalışmalarda da verilen detaylar sınırlı olup içeriklerinde deprem kayıtlarının seçimi, bileşen tercihi, modele uygulanma biçimi vb. konular irdelenmemiştir. Bu tez çalışmasında kemer barajın kırılgnlık eğrilerinin elde edilme süreçleri detaylı olarak ortaya konmuş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Çalışmada, Çoklu Seviye Analiz (ÇSA) yöntemi çift eğrilikli bir beton kemer baraja uygulanmış ve yer hareketlerinin seçimi, ölçeklenmesi ve sonlu elemanlar modeline uygulanması konusunda detaylı bir çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda, uygulama örneği olan beton kemer barajın sismik kırılgnlık eğrileri, üç farklı deprem seviyesi için oluşturulmuştur.

Tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, beton barajların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi, sismik hasar analizlerinin yapılması ve kırılgnlık

eğrilerinin elde edilmesi konularıyla ilgili geçmiş yıllarda yapılmış çalışmalara yer verilmiş, sonlu elemanlar yöntemiyle ilgili genel formülasyonlar ile kırılma eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan yöntemler anlatılmıştır.

İkinci bölümde, beton barajların sismik analizlerinde, betonun lineer olmayan davranışını temsil etmek amacıyla tercih edilen Drucker-Prager-Beton malzeme modelinin uygunluğu Koyna beton ağırlık barajın iki boyutlu modeli üzerinde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında beton kemer barajın üç boyutlu modelinin sismik hasar analizleri, bu malzeme modeli ile iki farklı deprem seviyesinde (işletme esaslı ve emniyet esaslı deprem seviyeleri) gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, kırılma eğrisi analizi yöntemlerinden olan Çoklu Seviye Analiz (ÇSA) yönteminin, kemer barajlara uygulanması için gerekli olan yer hareketlerinin seçimi ve ölçeklenmesi yapılmıştır. Seçilen yer hareketleri ile gerçekleştirilen lineer olmayan analizler sonucunda, kemer barajın yapısal tepkisi ile yer hareketi parametreleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca, kemer barajın kırılma eğrileri, üç farklı hasar seviyesi (hafif, orta ve ağır) için, ÇSA yöntemi ile oluşturulmuştur.

Üçüncü bölümde, tez çalışmasından elde edilen bulgular ve sonuçlar detaylı olarak sunulmuş olup ileride yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler verilmiştir.

1.4. Kemer Barajların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi

Yüksek beton kemer barajlar, narin ve karmaşık bir geometriye sahiptirler. Ayrıca, kemer barajlar deprem esnasında hem oturdukları temel kayası ile hem de rezervuardaki su ile etkileşim halinde olurlar. Dolayısıyla, kemer barajlar sıvı-yapı-temel etkileşim sistemine giren özel mühendislik yapılarıdır. Bu özel yapıların deprem analizleri, detaylı bir üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile yapılmalıdır.

Baraj gövdesinin sonlu elemanlar modeli oluşturulurken çoğunlukla 8-düğüm noktalı veya 20-düğüm noktalı katı elemanlar kullanılmaktadır. Temel kayası modellenirken, baraj gövde geometrisi ile uyumlu ve yapı-temel etkileşimini sağlayabilecek boyutta olmalıdır. Eleman tipi olarak 8 veya 20-düğüm noktalı katı elemanlar kullanılmaktadır. Barajların deprem hesabı yapılırken, temeller genel olarak üç farklı yaklaşım ile modellenebilmektedir. Bunlar rijit, kütleli ve kütsüz temel modelleridir.

Rijit temel modelinde, yapının temeli tamamen tutulu olarak modellenir ve temel kayası modellenmez. Bu nedenle, temel kayasının kütle ve rijitliği hesaba katılmaz. Kütleli modelde ise temel kayasının kütlesi ve rijitliği dikkate alınmaktadır. Bu modelde, deprem

dalgalarının temel kayası sınırlarından geri yansımaması için, temel sınırlarının viskoz, geçirgen veya yansıtmayan elemanlar ile modellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu temel modeli, sistemde ekstra sönüm oluşturmaktadır.

Literatürde en çok tercih edilen temel modeli Clough [119] tarafından önerilen kütsüz temel modelidir. Kütsüz temel modeli sistem üzerinde sadece rijitliğe katkı sağlamakta, sönüm ve atalet etkileri ihmal edilmektedir. Bu modelde deprem ivme kayıtları temel sınırına uygulanmakta ancak deprem dalgası kütsüz temelde herhangi bir enerji kaybına uğramadan doğrudan baraj gövdesine ulaşmaktadır [120]. Dolayısıyla, yüzeyde kaydedilen deprem kayıtları doğrudan kullanılabilir. [120].

Bir baraj gövdesinin deprem esnasında davranışını etkileyen en büyük faktör, arkasında bulunan rezervuardır. Çünkü su, hidrostatik fazlası hidrodinamik basınçlar oluşturmakta ve baraj gövdesinde ilave yükler meydana getirmektedir. Bu nedenle, sıvı-yapı etkileşimi yani baraj-rezervuar etkileşimi, sonlu elemanlar modelinde detaylı ve doğru modellenmelidir. Literatürde baraj-rezervuar etkileşimi genel olarak üç farklı yaklaşım ile temsil edilmektedir [120]:

- Wetergaard Yaklaşımı [99],
- Lagrange Yaklaşımı [121],
- Euler Yaklaşımı [122],

Wetergaard yaklaşımında, barajda oluşan hidrodinamik basınç, barajla birlikte titreşen ek bir kütle olarak dikkate alındığından, literatürde eklenmiş kütle yaklaşımı olarak da bilinmektedir. Bu yaklaşımda, rezervuarın memba doğrultusunda sonsuza uzadığı, suyun lineer sıkışabilir olduğu ve yüzey dalgalarının oluşmadığı (etkilerinin ihmal edildiği) kabul edilmektedir. Ayrıca, iki boyutlu modelde barajın rijit, sonsuz uzun ve düşey memba yüzeyli olduğu varsayımı kolayca uygulanabilmektedir. Fakat, bu yaklaşım, kemer baraj gibi eğriliğe sahip yüzeylerde, deprem doğrultusu ile baraj memba yüzeyi normali arasındaki açı dikkate alınarak kullanılmalıdır.

Lagrange yaklaşımında, hem baraj hem de su modelinin düğüm noktalarındaki serbestlikler yerdeğıştirmeler cinsinden ifade edilmektedir. Bu nedenle, baraj ve rezervuar arasındaki etkileşimi temsil etmek için özel ara yüzey denklemlerine gerek yoktur. Çünkü, arayüzeydeki düğüm noktalarında uygunluk ve denge denklemleri doğrudan sağlanmaktadır. Ayrıca, bu yaklaşımda, oluşturulan denklemler hem simetrik hem de daha küçük bant genişliklerine sahiptir.

Euler yaklaşımında, baraj modelinin düğüm noktalarındaki bilinmeyenler yerdeğiştirmeler cinsinden, su modelinin düğüm noktalarındaki bilinmeyenler basınçlar cinsinden ifade edilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan rezervuar-baraj-temel etkileşim sistemlerinin sonlu elemanlar modellerinde, baraj-rezervuar etkileşimi Euler yaklaşımı ile modellenmiştir.

1.5. Euler Yaklaşımına Dayalı Sıvı-Yapı Etkileşiminin Sonlu Elemanlar Formülasyonu

Euler yaklaşımında suyu temsil eden elemanın düğüm noktalarındaki bilinmeyenler basınçlar cinsinden ifade edilmektedir. Bir başka değişle, kullanılan elemanlar basınca bağlı elemanlardır. ANSYS ve ABAQUS gibi günümüz ticari amaçlı sonlu elemanlar programlarında, basınca bağlı kullanılan elemanlar, akustik eleman veya akustik sıvı olarak adlandırılırlar. Bu akustik elemanlar, lineer sıkışabilir, viskoz olmayan ve elemanların dönmesi kısıtlanmış olduğundan Euler yaklaşımında kullanılabilirler.

Sıvının bu akustik hareketini tanımlamak için dalga hareketi denklemleri kullanılmaktadır. Bir akustik sıvı elemanın üç boyutlu dalga hareketi,

$$\frac{\partial^2 P(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P(x, y, z, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; P hidrodinamik basıncı (hidrostatik fazlası), t zamanı, x, y, z kartezyen koordinatları göstermektedir. c_0 sudaki ses hızı (veya sudaki basınç dalgalarının yayılma hızı) olup,

$$c_0 = \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; E_s , sıvının hacimsel elastisite modülü, ρ_s ise sıvının kütle yoğunluğunu göstermektedir.

Deprem etkisi altında sıvı sistemde oluşan hidrodinamik basınçlar (1) denkleminin uygun sınır şartları altında çözülmesiyle elde edilir. Bu sınır şartları genel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

i. Sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgalarının oluştuğu kabul edilirse bu yüzeyler için sınır şartı,

$$\frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 P(x, y, z, t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

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

$$P = 0 \quad (4)$$

Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan rezervuar-baraj-temel etkileşim sisteminin sonlu eleman modelinde, rezervuarın serbest yüzeyinde yüzey dalgalarının oluşmadığı kabul edilmiştir.

ii. Baraj gövdesinin yüzeyi geçirimsiz olduğundan dolayı rezervuar-baraj sınır şartında su akışı (geçışı) olamayacaktır. Bu nedenle buradaki sınır şartı,

$$\frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial n} = -\rho_s a_n(x, y, z, t) \quad (5)$$

şeklinde olmaktadır. Burada; n rezervuar-baraj ara yüzeyinin normali olup yönü baraj gövdesinin yüzeyinden dışarı doğrudur, a_n ise bu normal doğrultudaki ivmeyi göstermektedir.

iii. Rezervuar-temel ara yüzeyinde eğer enerji sönümü yoksa buradaki sınır şartı (5) denklemindeki gibi olacaktır. Eğer enerji sönümü varsa bu yüzeyler için sınır şartı,

$$\frac{\partial P(0, t)}{\partial n} = -\rho_s a_n(t) + \frac{1}{c_0} \frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)} \frac{\partial^2 P(0, t)}{\partial t^2} \quad (6)$$

şeklinde olacaktır. Burada; α rezervuarın tabanının ve yan yüzeylerinin dalga yansımaya katsayısıdır.

iv. Rezervuar sonunda, yer hareketi dalgalarının tamamının sönümlendiği viskoz sınır

şartı aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$\frac{\partial P(0,t)}{\partial n} = -\frac{1}{c_0} \frac{\partial^2 P(0,t)}{\partial t^2} \quad (7)$$

Sıvı ortamın hareketini temsil eden (1) denklemi, (4)-(7) denklemleriyle verilen sınır şartları altında çözülmesiyle hidrodinamik basınçlar elde edilir. Söz konusu sıvı denklemleri için sonlu eleman yaklaşımı kullanılırsa, sıvı sistemine ait sonlu eleman hareket denklemleri matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[M_s]\{\ddot{P}\} + [C_s]\{\dot{P}\} + [K_s]\{P\} = -\rho_s [R]^T \{\ddot{U}_s\} + \{F_{sg}\} \quad (8)$$

Burada $[M_s]$ yüzey dalgalarının etkisinin ihmal edildiği sıvı kütle matrisini, $[C_s]$ rezervuar tabanı dalga sönümlenme etkisinden dolayı ortaya çıkan sönümü içeren sıvı sönüm matrisini, $[K_s]$ ise sıvı rijitlik matrisini göstermektedir. $[R]$ sıvı-yapı ara yüzeyi ile ilgili bir matris olup, yapı ortamında oluşan ivmelerden sıvı yük vektörünü ve sıvı ortamında oluşan basınçlardan yapı düğüm noktası ilave kuvvetlerini belirlemede kullanılır. Bu denklemdeki $\{\ddot{U}_{sy}\}$ sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı ivmelerini, $\{F_{sg}\}$ sıvı tabanındaki yer ivmelerinden dolayı ortaya çıkan sıvı yük vektörünü, $\{P\}$ hidrodinamik basınç vektörünü, $\{\dot{P}\}$ ve $\{P\}$ ise bu vektörün zamana göre bir ve iki kez kısmi türevlerini göstermektedir.

Sıvı-yapı etkileşimi söz konusu olduğu durumlarda yapı ortamının dinamik hareketini temsil eden sonlu eleman denklemleri,

$$[M_y]\{\ddot{U}_y\} + [C_y]\{\dot{U}_y\} + [K_y]\{U_y\} = \{F_y\} + \{F_{sy}\} \quad (9)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır. Burada $[M_y]$, $[C_y]$ ve $[K_y]$ sırasıyla yapı ortamına (baraj + temel) ait kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\{\ddot{U}_y\}$, $\{\dot{U}_y\}$ ve $\{U_y\}$ yapı ortamına ait ivme, hız ve yer değiştirme vektörlerini temsil etmektedir. $\{F_y\}$ yapının dış yük vektörünü; $\{F_{sy}\}$ ise sıvı ortamında oluşan hidrodinamik basınçlardan ötürü yapıya gelen ek dış yük vektörünü belirtmektedir. $\{F_{sy}\}$ vektörü,

$$\{F_{sy}\} = [R]^T \{P\} \quad (10)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece sıvı-yapı sistemine ait ortak hareket denklemleri (8) ve (9) denklemlerinin,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [M_y] & [0] \\ \rho_s [R] & [M_s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{U}_y\} \\ \{\ddot{P}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_y] & [0] \\ [0] & [C_s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{U}_y\} \\ \{\dot{P}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_y] & -[R]^T \\ [0] & [K_s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_y\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} \{F_y\} \\ \{F_{sg}\} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

şeklinde birleştirilmesiyle elde edilmektedir.

Bu tez çalışmasında sıvı-yapı etkileşim sisteminin hareket denklemleri Newmark yaklaşımına [123] dayanan bir zaman integrasyon yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

1.6. Sönümsüz Serbest Titreşim Formülasyonu

Bir kemer baraj-rezervuar-temel sistemine veya herhangi bir yapı sistemine ait doğal frekanslar ve mod şekilleri, o sisteme ait sönümsüz serbest titreşim hareket denkleminin çözümünden elde edilmektedir. Bu durumda denklem (11)'de sönüm ve dış kuvvetin olmadığı kabul edilirse, sistemin zamana bağlı sönümsüz serbest titreşim hareket denklemleri,

$$\begin{bmatrix} [K_y] & -[R]^T \\ [0] & [K_s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_y\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} - \{\omega_n^2\} \begin{bmatrix} [M_y] & [0] \\ \rho_s [R] & [M_s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_y\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. $\{\omega_n\}$, sıvı-yapı etkileşim sisteminin doğal frekans vektörünü göstermektedir. Burada, rezervuar-baraj etkileşim yüzeyinde, baraj normal doğrultusunda sıvı ve yapı yerdeğiştirmeleri eşitken, teğet doğrultuda etkileşim yoktur. Denklem (12)'de simetrik olmayan kütle ve rijitlik matrisleri oluşmaktadır. Bu denklem Lanczos yaklaşımı veya başka bir asimetric çözüm yöntemiyle çözümlerse, rezervuar-baraj-temel etkileşim sisteminin doğal açısal frekansları elde edilir.

1.7. Newmark Yöntemi ile Zaman-Tanım Alanında Analiz

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

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \dot{U}_t + [(1-\gamma)\ddot{U}_t + \gamma\ddot{U}_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (13)$$

$$U_{t+\Delta t} = U_t + \dot{U}_t(\Delta t) + [(0.5-\beta)\ddot{U}_t + \beta\ddot{U}_{t+\Delta t}](\Delta t)^2 \quad (14)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir [123, 124]. Burada U_t , \dot{U}_t , \ddot{U}_t sırasıyla t anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini, U_{t+1} , \dot{U}_{t+1} , \ddot{U}_{t+1} sırasıyla $t + 1$ anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. Bu denklemde β ve γ integrasyon parametreleri olup Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlamaktadır. Ayrıca, bu parametreler, kullanılan yöntemin stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirlemektedir. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ seçilmesi Newmark yönteminin doğruluğu için yeterli olmaktadır [124].

Denklem (11) sadeleştirilip genel bir hareket denklemi halinde tekrar yazılırsa,

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = f \quad (15)$$

ifadesi elde edilir. Burada M , C ve K rezervuar-baraj-temel etkileşim sisteminin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini \ddot{U} , \dot{U} ve U ise aynı sistemin rölatif ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini temsil etmektedir. f ise etkileşim sistemine etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür. Verilen bu (15) denkleminin t ve $t + 1$ anındaki dengesi dikkate alındığında,

$$M\ddot{U}_t + C\dot{U}_t + KU_t = f_t \quad (16)$$

$$M\ddot{U}_{t+1} + C\dot{U}_{t+1} + KU_{t+1} = f_{t+1} \quad (17)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Eğer (17) denkleminin (16) denklemini çıkartılırsa artımsal hareket denklemi,

$$M\Delta\ddot{U}_t + C\Delta\dot{U}_t + K\Delta U_t = \Delta f_t \quad (18)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada, Δ değişim operatörünü göstermek üzere,

$$\left. \begin{aligned} \Delta\ddot{U}_t &= \ddot{U}_{t+1} - \ddot{U}_t \\ \Delta\dot{U}_t &= \dot{U}_{t+1} - \dot{U}_t \\ \Delta U_t &= U_{t+1} - U_t \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (13) ve (14) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta\dot{U}_t = (\Delta t)\ddot{U}_t + \gamma(\Delta t)\Delta\ddot{U}_t \quad (20)$$

$$\Delta U_t = (\Delta t)\dot{U}_t + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_t + \beta(\Delta t)^2\Delta\ddot{U}_t \quad (21)$$

ifadeleri elde edilmektedir. (21) denkleminde $\Delta\ddot{U}_t$ çekilecek olursa;

$$\Delta\ddot{U}_t = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta U_t - \frac{1}{\beta(\Delta t)}\dot{U}_t - \frac{1}{2\beta}\ddot{U}_t \quad (22)$$

şeklinde elde edilmektedir. (22) denklemini (20) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta\dot{U}_t = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}\Delta U_t - \frac{\gamma}{\beta}\dot{U}_t + \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{U}_t \quad (23)$$

şeklinde elde edilmektedir. (22) ve (23) denklemleri artımsal hareket denklemi (18)'de yerine konur ve düzenlenirse;

$$\left. \begin{aligned} \left(K + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M \right) \Delta U_t &= \Delta R_t + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} M + \frac{\gamma}{\beta} C \right) \dot{U}_t \\ &+ \left[\frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) C \right] \ddot{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

ifadesi elde edilmektedir. Dinamik hareket denkleminin, her Δt zaman aralığı içindeki statik denge konumunu sağlayarak çözümü elde edilmektedir. Burada adım adım çözümde ilk önce ΔU_t (24) denkleminde bulunmaktadır. Daha sonra, (22) ve (23) denklemleri yardımıyla $\Delta \dot{U}_t$ ve $\Delta \ddot{U}_t$ elde edilmektedir. Bir sonraki adıma ait değerler, (25) denkleminde elde edilmektedir. İşlemler bu şekilde çözüm aralığı boyunca devam etmektedir.

$$\left. \begin{aligned} U_{t+1} &= U_t + \Delta U_t \\ \dot{U}_{t+1} &= \dot{U}_t + \Delta \dot{U}_t \\ \ddot{U}_{t+1} &= \ddot{U}_t + \Delta \ddot{U}_t \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

1.8. Malzeme Bakımından Lineer Olamayan Davranış Formülasyonu

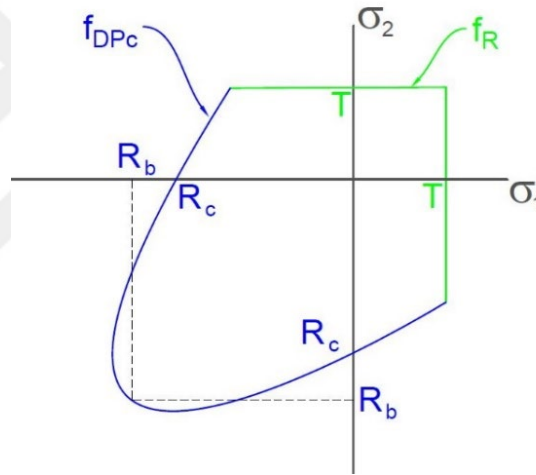
Kemer barajlar saf beton malzemesinden inşa edilirler. Beton gibi kırılğan malzemelerin davranışını tanımlayan birçok malzeme modeli mevcuttur. Bunlardan en yaygın olanları Mohr-Colulomb [125], Drucker-Prager [126], Chen and Chen [127], Ottosen [128], Hsieh-Ting-Chen [129] ve Willam and Warnke [130]'dir.

Beton barajlarda deprem yer hareketi gibi dinamik bir etki sonucunda baraj gövdesinde betonun çekme ve basınç mukavemetini aşan gerilmeler oluşabilir. Bunun sonucu olarak, baraj gövdesinde hasarlar ortaya çıkar ve bu hasarlardan dolayı gerilmelerde yeniden bir dağılım olur [32]. Beton malzeme, çekme gerilmesi altında çatlayarak ve basınç gerilmesi altında plastikleşerek lineer olmayan bir şekil değiştirme davranışı ortaya koyar. Drucker-Prager yaklaşımı bu etkilerin göz önüne alınabildiği bir elasto-plastik malzeme modelidir.

Bu tez çalışmasında, kemer barajın gövdesini oluşturan betonun lineer olmayan davranışı, hem daha iyi yakınsama sağladığı hem de büyük ve kütle betonlarında daha iyi sonuçlar verdiği için iki yüzeyli Drucker-Prager Beton malzeme modeli ile tanımlanmıştır.

1.8.1. Drucker-Prager Beton Malzeme Modeli

Beton, basınç ve çekme gerilmeleri altında farklı davranış göstermektedir. Beton çok fazla basınç gerilmesi taşıyabilirken, çekme altında hemen çatlayarak kırılmaktadır. Betonun bu iki farklı kırılma davranışını matematiksel olarak tanımlamak için iki farklı kırılma yüzeyi tanımlanabilir. Basınç yüklemesi altında Drucker-Prager Beton modelinin kırılma fonksiyonu kullanılırken, çekme ve çekme-basınç yüklemeleri altında Rankine kırılma fonksiyonu kullanılmaktadır. Davranışı temsil edebilmek amacıyla Drucker-Prager Beton malzeme modeli Rankine kırılma modeli ile birleştirilerek yeni bir kırılma yüzeyi elde edilmiştir. Bu her iki fonksiyonun birleşiminden elde edilen kırılma yüzeyi, Şekil 1’de iki boyutlu asal gerilmeler düzleminde gösterilmiştir.



Şekil 1. Drucker-Prager ve Rankine kırılma yüzeyleri [131].

Rankine kırılma fonksiyonunda, f_R , en büyük asal gerilmenin, çekme gerilmesi sınır değerini aşması durumunda hasar(kırılma) oluşmaktadır ve fonksiyon [131]

$$f_R = \sigma_m + \frac{2}{3} \sigma_e \sin\left(\theta + \frac{2}{3} \pi\right) - T_s \Omega_t \quad (26)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada T_s eksenel çekme gerilme dayanımıdır.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (27)$$

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} \quad (28)$$

$$\sin(3\theta) = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\sqrt{J_2^3}} \quad (29)$$

gerilme tensörünün invariantsları aşağıdaki gibidir.

$$J_2 = \frac{1}{6} \left((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 \right) + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2 \quad (30)$$

$$J_3 = \det(\sigma - I\sigma_m) \quad (31)$$

Basınç gerilmesi altında Drucker-Prager kırılma fonksiyonu,

$$f_{DPc} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_c \sigma_m - \sigma_{Yc} \Omega_c \quad (32)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada β_c ve σ_{Yc} malzemenin iki eksenli basınç dayanımı (R_b) ve tek eksenli basınç dayanımı (R_c) ile tanımlanan katsayılarıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilirler;

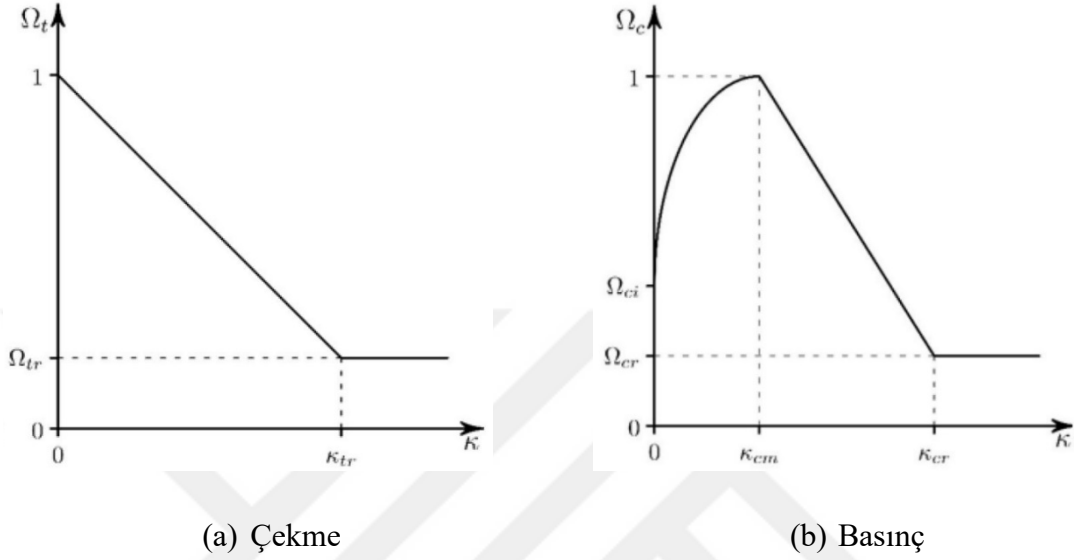
$$\beta_c = \frac{\sqrt{3}(R_b - R_c)}{2R_b - R_c} \quad (33)$$

$$\sigma_{Yc} = \frac{R_b R_c}{\sqrt{3}(2R_b - R_c)} \quad (34)$$

Denklem (26) ve (32)'de verilen Ω_t ve Ω_c çekmedeki ve basınçtaki davranış fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonların grafik olarak gösterimi Şekil 2'de ve sembollerin tanımları Tablo 1'de verilmiştir.

Burada Ω_t lineer bir yumuşama fonksiyonudur. Kırılmanın ilk başladığı anda bu

fonksiyon $\Omega_t = 1$ 'dir. Efektif plastik birim şekil değiştirme artarak κ_{tr} değerine ulaştığında bu değer bir Ω_{tr} değerine kadar düşer ve efektif plastik birim şekil değiştirme arttıkça sabit kalmaktadır.



Şekil 2. Çekme ve basınçtaki davranış fonksiyon grafikleri [131]

Tablo 1. Betonun lineer olmayan davranış fonksiyonlarındaki sembollerin tanımları

Sembol	Tanımı
κ_{cm}	Bir eksenli basınç dayanımındaki plastik birim şekil değiştirme
κ_{cr}	Basınçtaki en büyük efektif plastik birim şekil değiştirme
Ω_{ci}	Lineer olmayan artışın başlangıcındaki göreceli gerilme
Ω_{cr}	Kalıcı göreceli basınç gerilmesi
κ_{tr}	Çekmedeki plastik birim şekil değiştirme limiti
Ω_{tr}	Kalıcı göreceli çekme gerilmesi

Basınçtaki akma fonksiyonu Ω_c ise denklem (35)'te verildiği gibi lineer olmayan bir davranış fonksiyonu ve lineer bir yumuşama fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Ω_c ve Ω_t fonksiyonlarında kullanılan sembollerin tanımları Tablo 1'de verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} \Omega_c &= \Omega_{ci} + (1 - \Omega_{ci}) \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa_{cm}} - \frac{\kappa^2}{\kappa_{cm}^2}} \quad , \quad 0 < \kappa \leq \kappa_{cm} \\ \Omega_c &= 1 - \frac{1 - \Omega_{cr}}{\kappa_{cr} - \kappa_{cm}} (\kappa - \kappa_{cm}) \quad , \quad \kappa_{cm} < \kappa \leq \kappa_{cr} \\ \Omega_c &= \Omega_{cr} \quad , \quad \kappa > \kappa_{cr} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

1.9. Kemer Barajlarda Oluşabilecek Hasarlar

Beton barajların sismik tasarımı ve performans değerlendirmesi, lineer analizler sonucunda elde edilen gerilmelerin kontrol edilmesi ve mühendislerin yorumlaması üzerine yapılmıştır [132]. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve kullanımının inşaat mühendisliği alanında yaygınlaşmasıyla, barajlarda deprem etkisi ile oluşabilecek hasar davranışları analitik olarak daha detaylı incelenmeye başlanmıştır [107, 91].

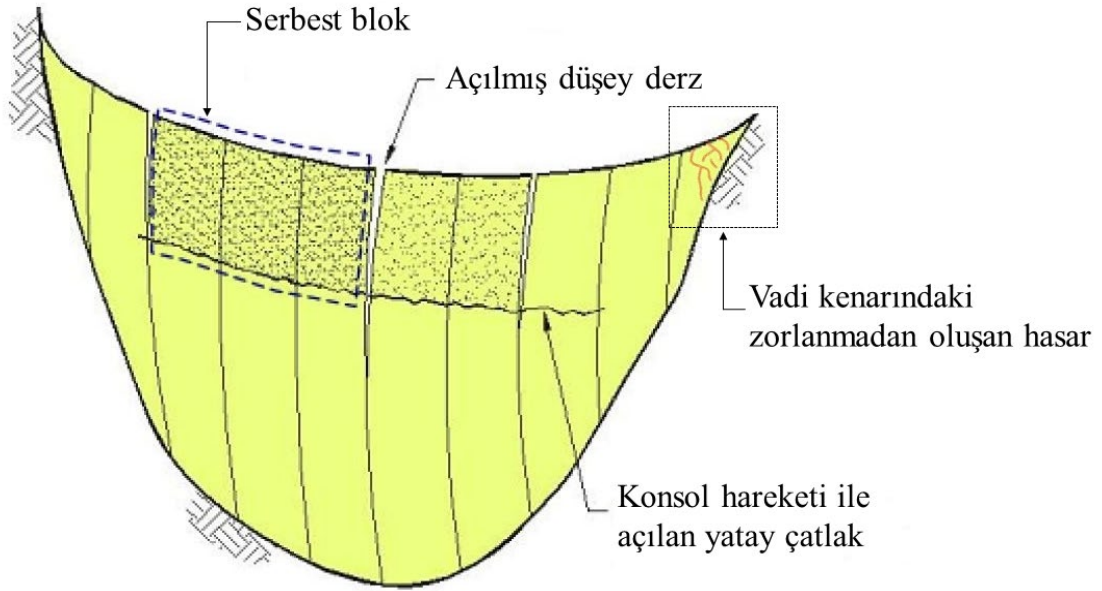
Kemer barajlar, Şekil 3'te görüldüğü gibi, düşey büzülme derzleri ile ayrılmış bağımsız konsol bloklar olarak inşa edilir. Derzler arasındaki kesme direncini arttırmak için genellikle anahtar-kilit (shear key) yüzeyler inşa edilir. Bu derzler kapatıldığında, yani konsolların göreceli olarak kayması zorlaştırıldığında, baraj monolitik (yekpare) bir sistem olarak hareket eder. Bu derzler çok az çekme gerilmesi taşıyabildiklerinden, şiddetli sismik sarsıntıda açılıp kapanabilirler. Bu açılıp kapanmalar baraj gövdesindeki kemer çekme gerilmelerini sönmülerken, konsol gerilmelerinde artışa sebep olur. Artan konsol gerilmeleri de betonun çekme dayanımını aşarak betonda yatay çatlaklara ve sonunda da kısmen serbest bloklara neden olabilir.

Kemer barajların yamaçlarda dayandığı kayaların, sismik etki altında, hareket ederek baraj yamaçlarında hasara yol açması gözlemlenen diğer bir hasar türüdür. Buna en iyi örnek 1971 San Fernando ve 1994 Northridge depremlerinde hasar alan Pacoima beton kemer barajıdır [133].

Sonuç olarak kemer barajlarda, deprem etkisi ile oluşabilecek önemli hasarlar, Şekil 4'te gösterildiği gibi, i) Büzülme derzlerinde oluşacak çatlaklar, ii) konsol hareketi sebebi ile çatlaklar, iii) kemer etkisinin yitirilmesi ile serbest blok kopması, iv) vadi kenarlarındaki ayaklarda zorlanma sebebi ile ezilme ve deformasyon olarak sıralanabilir [107, 134].



Şekil 3. Beton kemer baraj inşası



Şekil 4. Kemer barajlarda beklenen deprem hasarları [107]

1.10. Kırılgnlık Eğrisi Kavramı

Deprem yer hareketi parametresi ile yapısal tepki arasındaki ilişki, yapıların deprem performansını belirlemede önemli bir bileşendir. Kırılgnlık eğrileri, yer sarsıntı şiddetinin bir fonksiyonu olarak belirli bir hasar seviyesinin aşılma olasılığını tanımlamaktadır [135].

Yapıların kırılgnlık eğrilerinin elde edilmesine ilk olarak, nükleer enerji santrallerinin deprem güvenliğini belirlemek için 1980 yılında yapılan çalışma [136] ile başlamıştır. Bu çalışmada, bir nükleer enerji santrali bileşeninin kırılma frekansı ile depremin en büyük yer ivmesi (PGA) arasında olasılıksal bir ilişki kurularak kırılgnlık fonksiyonu tanımlanmıştır.

Daha sonra deprem mühendisliğindeki gelişmeler ile önemli binalar, köprüler ve barajlar gibi diğer yapı türleri için de kırılma eğrileri elde edilmesi yaygınlaşmıştır [137].

İnşaat mühendisliğinde performansa dayalı sismik değerlendirme yöntemi, mevcut veya yeni yapılacak olan yapıların, farklı depremler etkisi altında alacağı hasarın önceden tanımlanan seviyelere göre performanslarının belirlenmesi olarak tanımlanabilir.

Dayanımına göre tasarımda yapı elemanlarının bireysel olarak göçme olasılıklarının karşılanması istenirken, performansa dayalı tasarımda yapının sistem olarak performansının (göçme riski, onarım maliyeti ve deprem sonrası işlev kaybı gibi) belirlenmesi istenmektedir [138]. Dolayısıyla, kırılma eğrilerinin elde edilmesindeki amaç, oluşacak hasara karşılık gelen can, mal ve süre gibi kayıpları tahmin etmektir. Bu tahminler felaket planlarında, acil durum müdahaleleri yapacak yetkili makamların karar vermesinde veya sigorta şirketleri tarafından bir doğal afet (deprem) senaryosu sonrasında oluşabilecek hasarın hesaplanmasında kullanılabilir.

Kırılma eğrileri, genel olarak uzman görüşüne göre, deneysel olarak ve analitik olarak üç farklı şekilde elde edilebilir [139]. Bunlara ek olarak, bu yöntemlerin ikisinin veya üçünün de bir arada kullanarak, hibrit bir yaklaşımla da kırılma eğrisi elde edilebilir.

Bu tez çalışmasında analitik yöntem kullanıldığı için sadece bu yöntem detaylı olarak anlatılmıştır. Analitik yöntemle kırılma eğrilerini oluşturmak için genel olarak şu adımlar izlenir;

- i) Yapının analitik modeli oluşturulur
- ii) Yapının bulunduğu bölgenin depremselliği incelenerek deprem seviyeleri ve şiddet ölçüleri belirlenir
- iii) Yer hareketleri seçilir ve eğer gerekliyse ölçeklenir
- iv) Yapısal analizler ile mühendislik talep parametresi (MTP) / hasar indeks (HI) elde edilir
- v) Limit durumlara (LD) göre kırılma eğrileri oluşturulur

1.10.1. Analitik Yöntem ile Kırılma Eğrilerinin Oluşturulması

Kırılma eğrisi, bir yapının istenmeyen bir Limit Durumuna (LD) dayanma kapasitesinin kümülatif dağılım fonksiyonu olarak da tanımlanır [140] ve genellikle lognormal kümülatif dağılım fonksiyonları ile ifade edilir.

Lognormal dağılım kısaca, logaritması normal dağılım gösteren herhangi bir rassal

değişkenin olasılık dağılımı olarak tanımlanır. $Y = \ln(x)$ normal dağılım özelliği gösterdiğinde, X lognormal rastgele bir değişkendir. Lognormal rastgele değişkenler sadece pozitif değerler için tanımlıdır ($x \geq 0$). Lognormal dağılımın, Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF);

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma_{\ln(x)}} \varphi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln(x)}}\right) \quad (36)$$

şeklindedir. Burada $\mu_{\ln x}$ ve $\sigma_{\ln x}$, sırasıyla, $\ln(x)$ 'in ortalamasını ve standart sapmasını göstermektedir ve değerleri;

$$\mu_{\ln x} = \ln(\mu_x) - \frac{1}{2}\sigma_{\ln(x)}^2$$

$$\sigma_{\ln(x)} = \sqrt{\ln(V_x^2 + 1)} \quad (37)$$

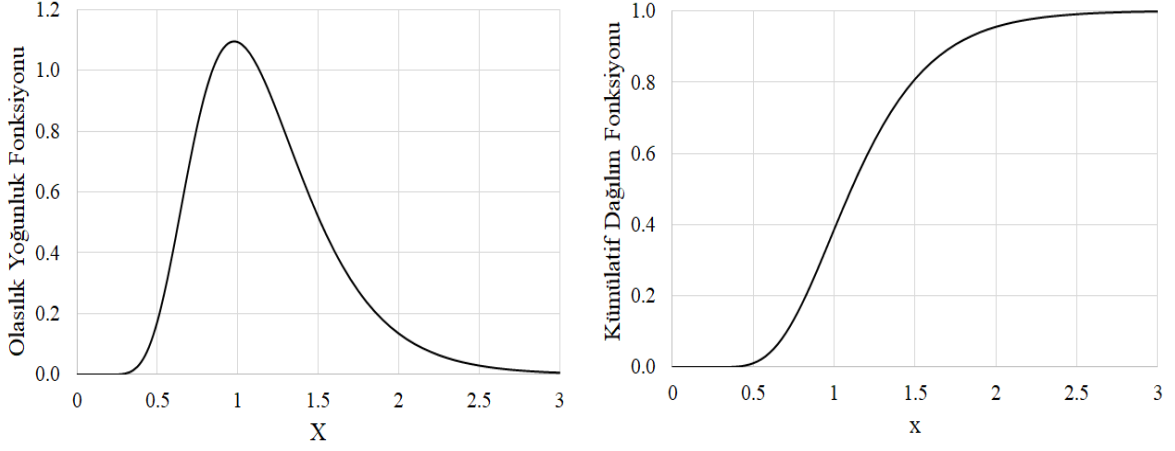
ifadeleri ile elde edilir. Lognormal dağılımın, Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (KDF);

$$F_X = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right) \quad (38)$$

olarak tanımlanır. Şekil 5'te lognormal dağılıma ait bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF) ve buna karşılık gelen kümülatif dağılım fonksiyonu (KDF) verilmektedir.

Lognormal KDF, şimdiye kadar deprem hasar kırılma eğrilerini iyi temsil etmiş basit bir modeldir [141-144]. Kırılma eğrisi modellenmesinde, lognormal kümülatif dağılımın tercih edilmesinin bir çok sebebi vardır. Bütün KDF'lerde, y-ekseni sıfır ile bir arasında sınırlıdır, bu da aşılma olasılığının (ya da herhangi bir hasar durumunun) benzer şekilde 0 ile 1 arasında sınırlandırılmasını sağlar [135]. Fonksiyon x-ekseninde sıfır alt sınırındadır, bu da negatif olmayan şiddet ölçüsü ve sıfır şiddet ölçüsünde sıfır hasar beklentisini karşılar. Ayrıca, lognormal olarak dağılmış rastgele bir değişkenin, bir katsayı ile (örneğin güvenlik faktörü ile) çarpılması veya bölünmesi durumunda, ortaya çıkan

kırılmalık eğrisi hala lognormal dağılıma uygundur [145].



Şekil 5. Lognormal dağılım için OYF ve KDF

Lognormal kümülatif dağılım fonksiyonunun bu özellikleri, kırılmalık eğrisi uydurmada tercih sebebi olmuştur. Bir kırılmalık eğrisi fonksiyonu [146],

$$P(LD | \dot{\mathcal{S}}\ddot{O} = x) = \Phi\left(\frac{\ln(x/\theta_d)}{\beta_d}\right) \quad (39)$$

olarak ifade edilir. Burada $P(LD | \dot{\mathcal{S}}\ddot{O} = x)$, şiddet ölçüsü $\dot{\mathcal{S}}\ddot{O} = x$ olan yer hareketinin limit durumu (LD) aşma olasılığını ifade eder. Burada $\Phi(\cdot)$ standart normal kümülatif dağılım fonksiyonunu, θ_d kırılmalık fonksiyonunun medyanını (%50 aşılma olasılığına denk gelen $\dot{\mathcal{S}}\ddot{O}$) ve β_d ise $\ln(\dot{\mathcal{S}}\ddot{O})$ 'nün standart sapmasını göstermektedir. Belirli bir yapının kırılmalık eğrisi için, yapısal analiz sonuçlarından θ_d ve β_d 'nin tahmin edilerek denklem (39)'un kalibre edilmesi gerekmektedir [146]. Kırılmalık eğrisi uydurma durumunda, bu parametrelere ait tahminler $\hat{\theta}_d$ ve $\hat{\beta}_d$ 'dir. Aynı şiddet ölçüsüne sahip yer hareketleri yapıda farklı tepkiler oluşturduğundan, bu parametreler deprem kaydına bağlı belirsizlik içermektedirler. Parametre tahmini, rastgele bir bileşeni olan verileri kullanarak, model parametre değerlerini tahmin etmeye çalışan bir istatistik alanıdır. Parametreleri bir veri grubundan tahmin etmek için üç yaygın istatistiksel yaklaşım vardır [135]. Bunlar, momentler yöntemi, ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ve maksimum olabilirlik yöntemidir.

1.10.2. Tehlike Analizi

Depremlerin ne zaman, nerede ve ne büyüklükte olacağı önceden belirlenemediğinden, yeni yapılacak barajların tasarımı sırasında veya mevcut barajların deprem güvenlik analizlerinde sismik tehlike analizleri yapılmaktadır. Baraj yapıları için sismik tehlike hesaplarının detayları USACE [147]'de ve DSİ [148]'de bulunmaktadır.

Sismik tehlike analizlerinin amacı, yapı alanındaki zemin titreşimlerinin özelliklerini temsil eden yer hareketi parametrelerinin (ivme, spektral ivme ve hız gibi) en büyük değerlerinin [149] farklı deprem düzeyleri için belirlenmesidir. Bu parametrelerin hesaplanmasında deterministik ve olasılıksal yöntemler kullanılmaktadır.

Deprem düzeyleri, depremin belirli bir sürede meydana gelme olasılığı olarak da tanımlanır ve depremin tekrarlanma periyodu, T_R , (yıllık aşılma olasılığının tersi) Poisson olasılık modeli ile hesaplanır [150]. Tekrarlanma periyodu denklem 40'da verilmektedir.

$$T_R = -\frac{t_L}{\ln(1-P_E)} \quad (40)$$

burada P_E bir depremin, bir yapının servis ömrü (t_L) boyunca, olma olasılığıdır.

Şiddet ölçüsü (ŞÖ), deprem yer hareketinin karakteristik özelliklerini gösteren bir metriktir. Deprem mühendisliğinde birçok şiddet ölçüsü vardır ve bunlar bir yer hareketinin farklı özelliklerini temsil etmektedir. En yaygın olarak kullanılan şiddet ölçüleri, maksimum yer ivmesi (PGA) ve spektral ivme (S_a)'dir. Şiddet ölçüsünün, bir beton ağırlık barajının sismik davranışına etkisi detaylı olarak Hariri-Ardebili [151] tarafından incelenmiştir.

1.10.3. Yapı Analizi

Kırılma eğrileri, lineer veya lineer olmayan analitik modelin, yapısal analiz sonuçları kullanılarak elde edilirler. Ancak, gerçekçi bir kırılma eğrisinin oluşturulabilmesi için modelin lineer ötesi davranış göstermesi tercih edilmektedir. Yapı analizinde, modellemeye (malzeme ve boyutlandırma) ve/veya sismik etkiye (deprem yer hareketi değişkenliği) bağlı belirsizlikler de dikkate alınabilir.

Kırılma eğrisi elde etmek için yapısal analizde kullanılacak deprem ivme kayıtlarının seçimi, ölçeklenmesi veya üretilmesi genel olarak dört farklı yaklaşım ile

yapılmaktadır [152]. Bunlar bulut analizi, dinamik dayanıklılık analizi, artımsal dinamik analiz ve çoklu seviye analizidir. Bu analizler sonucunda elde edilen yapı tepkisine karşılık gelen şiddet ölçüsü verilerinden, kırılma eğrisi parametreleri tahmin edilmektedir. Yapı tepkisi burada, mühendislik talep parametresi (MTP) veya hasar indeksi (Hİ) olarak adlandırılmaktadır.

Mühendislik Talep Parametresi (MTP) bina türü yapılar için genellikle kat ötelemesi, taban kesme kuvveti vb. iken baraj türü yapılar için kret deplasmanı, gerilme, elastik birim şekil değiştirme gibi parametrelerdir. Hasar İndeksi (Hİ) ise beton barajlar için, çatlak uzunluğu, yüzey çatlak alanı ve hasarlı beton hacmi olabilmektedir [153].

1.10.4. Hasar Analizi

Kırılma eğrileri, hasar analizi sonucunda elde edildiğinden literatürde bu eğriler hasar eğrileri olarak da adlandırılmaktadır.

Bir yapının performans düzeyini belirlemek için hasarın sınır değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Burada Limit Durum (LD), farklı hasar durumları arasındaki sınır değer olarak tanımlanabilir.

Hasar veya performans seviyelerinin sayısı, genel olarak kullanılan deprem seviyesine bağlı olsa da, yapının özelliğine göre farklı hasar seviyeleri de belirlenebilmektedir. Bu hasar seviyeleri genel olarak; hasarsız, küçük, hafif, orta, göçme öncesi, ağır hasar, göçme ve yıkılma gibi isimler ile tanımlanır. Baraj türü yapıların analizlerinde genel olarak iki deprem seviyesi, İşletme Esaslı Deprem (İED) ve Emniyet Esaslı Deprem (EED) [147, 148], tercih edilmektedir. Bu nedenle, barajlar için üç farklı performans seviyesi kullanılabilir: 1. Hafif hasar 2. Orta hasar 3. Ağır hasar.

1.11. Kırılma Fonksiyonu Parametrelerinin Tahmini

Yapısal analiz sonuçları kullanılarak, kırılma eğrisinin medyanının $\hat{\theta}_d$ ve kullanılan şiddet ölçüsünün standart sapmasının $\hat{\beta}_d$ tahmin edilmesi gerekmektedir. Deprem yer hareketlerinin yapı modeline etki ettirilme yaklaşımına göre bu parametrelerin tahmin yöntemi de değişmektedir. Bu yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

1.11.1. Bulut Analizi

Bulut analizde, bir grup deprem ivme kaydı ölçeklenerek veya ölçeklenmeden (kaydedildiği gibi) yapıya etki ettirilerek analizler yapılır. Bu kayıtlar genellikle bir deprem senaryosuna göre (magnitüd ve mesafe) seçilir [154] ve bu nedenle farklı şiddet ölçülerine sahip olurlar. Seçilen yer hareketlerinin ivme tepki spektrumları, hedef ivme spektrumuna benzer olmalıdır. Analizler sonucunda, şiddet ölçüsüne karşılık gelen yapı tepkisi verileri elde edilir. Bu veriler genellikle aritmetik veya logaritmik ölçekte çizilirler. Logaritmik ölçekte, veriler genellikle lineer davranış gösterirken, aritmetik ölçekte üslü fonksiyon davranışı gösterir. Bu davranış da, şiddet ölçüsüne karşılık gelen yapı tepkisinin medyanını tahmin eden bir fonksiyonu ifade eder [154].

$$\hat{\theta}_d(\mathcal{S}\ddot{O}) = a.(\mathcal{S}\ddot{O})^b \quad (41)$$

$$\ln(\hat{\theta}_d) = b.\ln(\mathcal{S}\ddot{O}) + \ln(a) \quad (42)$$

burada $\ln(a)$ ve b lineer regresyon katsayıları ve $\hat{\theta}_d$ ise şiddet ölçüsüne karşılık gelen yapı tepkisinin (hasar indeksi – $\hat{H}\ddot{I}$) medyanıdır.

Bulut analiz sonuçları daha sonra kırılgenlik fonksiyonunun elde edilmesinde kullanılır [155, 92].

$$P(LD | \mathcal{S}\ddot{O} = x) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(\hat{H}\ddot{I}) - \ln(\hat{\theta}_d)}{\hat{\beta}_d}\right) \quad (43)$$

burada $\Phi(\cdot)$ standart normal kümülatif dağılım fonksiyonunu ve $\hat{\beta}_d$ ise şiddet ölçüsüne denk gelen hasar indeksinin logaritmik standart sapmasını göstermektedir.

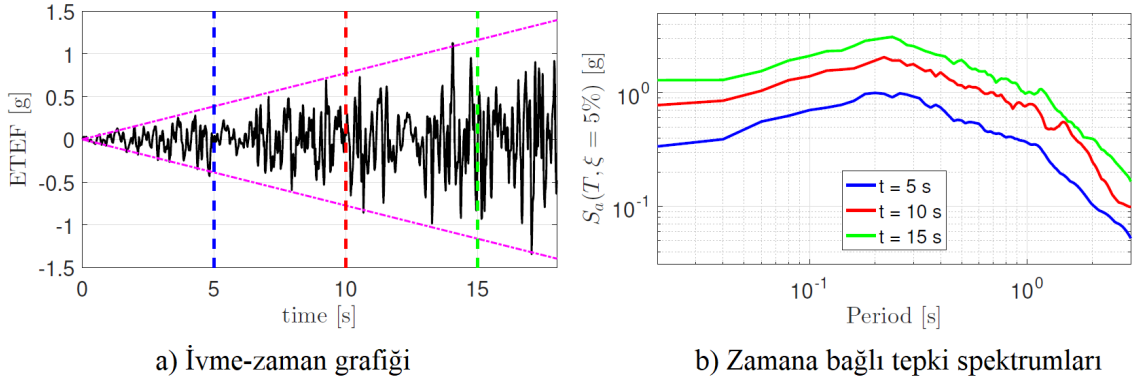
Logaritmik standart sapma

$$\hat{\beta}_d = \sqrt{\frac{\sum (\ln(H\ddot{I}_i) - \ln(a.\mathcal{S}\ddot{O}_i^b))^2}{n-2}} \quad (44)$$

ifadesi ile elde edilir. Burada HI_i ve $\dot{\Sigma}_i$, sırasıyla i 'nci yer hareketinin oluşturduğu hasar miktarı ve buna karşılık gelen şiddet ölçüsüdür.

1.11.2. Dinamik Dayanıklılık Analizi (DDA)

Dinamik dayanıklılık analizinde (DDA) genliği zamanla artan sentetik olarak üretilen tek bir yer hareketinin yapıya etki ettirilmesinden dolayı bu yöntem dinamik itme analizi olarak da adlandırılabilir. Örnek bir dinamik dayanıklılık analiz fonksiyon (DDAF) grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu yöntemde birden fazla yer hareketi üretilip yapıya etki ettirilerek yapının performansı tahmin edilebilmez. Sentetik olarak üretilen yer hareketinin genliği (dolayısıyla da şiddet ölçüsü) arttığından, artımsal dinamik analiz yöntemindeki gibi benzer bir yapı tepkisi-şiddet ölçüsü grafiği elde edilir. Bu yöntem beton barajlara da uygulanmıştır [112, 156, 157].



Şekil 6. Örnek bir dinamik dayanıklılık fonksiyonu [157]

1.11.3. Artımsal Dinamik Analiz (ADA)

Artımsal dinamik analizde (ADA), seçilen yer hareketleri, yapı göçme seviyesine (veya herhangi bir performans seviyesine) ulaşana kadar farklı seviyelerde ölçeklenerek yapıya etki ettirilir. Yapının hangi şiddet ölçüsünde göçeceği önceden belli değildir ve her bir yer hareketi farklı şiddet ölçüsünde göçmeye neden olabilir [158]. Bu nedenle, Şekil 7a'da gösterildiği gibi, kullanılan yer hareketi sayısı kadar, $\dot{\Sigma}$ 'ne karşılık gelen yapı tepki eğrileri elde edilir. Bu eğrilere ADA eğrisi de denilmektedir.

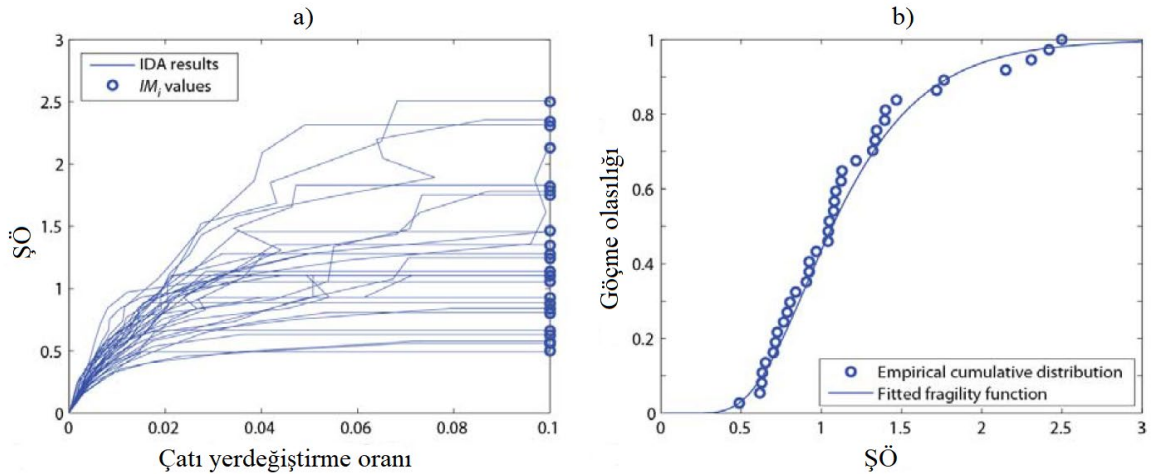
Verilen bir $\dot{\Sigma}$ seviyesinde oluşan aşılma olasılığı, o seviyeden daha düşük seviyede

LD aşan (veya göçme oluşturan) kayıtların sayısının, toplam ivme kaydı sayısına oranı ile tahmin edilir. Bu olasılık değerlerin örnek bir grafik gösterimi Şekil 7b’de verilmiştir. Bu grafik ampirik kümülatif dağılım fonksiyonu olarak adlandırılmıştır. Kırılgnlık eğrisi parametreleri, bu veriler kullanılarak tahmin edilebilir. Her bir ivme kaydının göçme oluşturduğu ŞÖ değerlerinin logaritmaları alınır ve bunların ortalama ve standart sapmaları hesaplanır [146].

$$\ln \hat{\theta}_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \dot{S}\ddot{O}_i \quad (45)$$

$$\hat{\beta}_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\ln \left(\dot{S}\ddot{O}_i / \hat{\theta}_d \right) \right)^2} \quad (46)$$

Burada n, kullanılan toplam yer hareketi sayısı ve $\dot{S}\ddot{O}_i$, i’nci yer hareketinin yapıda göçme oluşturmaya başladığı şiddet ölçüsü değeridir. Momentler tahmin yöntemi ile hesaplanan $\ln \hat{\theta}_d$ ve $\hat{\beta}_d$ sırasıyla, normal dağılım gösteren $\ln \dot{S}\ddot{O}$ ’nün, ortalama ve standart sapma değerleridir. Bu yaklaşım kullanılarak elde edilmiş bir kırılgnlık eğrisi örneği Şekil 7b’de gösterilmiştir.

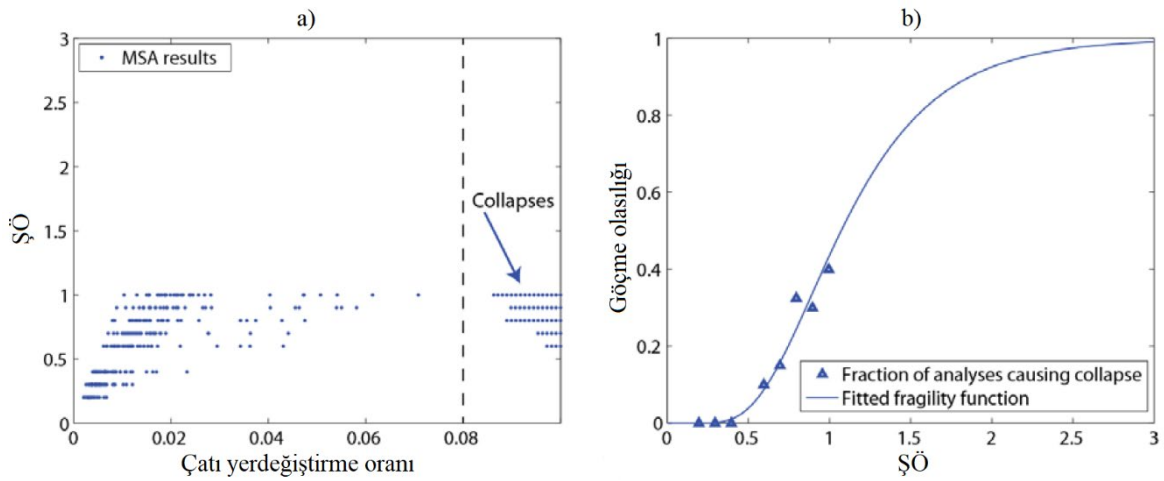


Şekil 7. a) Her bir yer hareketi için ŞÖ’ne karşılık gelen göçme eğrileri. b) Gözlemlenen göçme oranlarına karşılık gelen ŞÖ ve bu değerler için elde edilen kırılgnlık eğrisi [146].

1.11.4. Çoklu Seviye Analizi (ÇSA)

Yapısal analizler, önceden belirlenmiş farklı deprem şiddet ölçüsü (ŞÖ) seviyelerinde ve her seviyede farklı deprem ivme kayıtları kullanılarak da yapılabilir. Çoklu seviye analizi (ÇSA) yaklaşımı, genellikle koşullu ortalama spektrum ile veya bir bölgedeki depremi temsil eden yer hareketi seçiminde kullanılır. Çünkü yer hareketlerinin hedef özellikleri her bir deprem ŞÖ seviyesinde değişmekte ve bu nedenle kullanılan yer hareketleri de değişmektedir [146, 159, 160]. Bu yaklaşımda, seçilen yer hareketlerinin hepsinin yapıda göçme oluşturmaya gerek yoktur (Şekil 8a). Analizlerde, her bir deprem şiddeti seviyesinde kullanılan farklı yer hareketleri nedeniyle, artan ŞÖ ile kesin olarak artan göçme oranları gözlemlenemeyebilir [146].

Analizler sonucunda, her bir ŞÖ seviyesinde yapıda hasar oluşturan yer hareketi sayısının, o seviyedeki toplam yer hareketi sayısına oranı elde edilir. Bu verilerden uygun bir şekilde eğri uydurmak için maksimum olabilirlik yöntemi kullanılabilir [161, 162].



Şekil 8. a) Her bir yer hareketi için elde edilen yapı tepkileri b) Gözlemlenen göçme oranlarına karşılık gelen ŞÖ ve bu değerler için elde edilen kırılma eğrisi [146].

Yapısal analizler, deprem şiddeti seviyesi $\ddot{O} = x_j$ için, toplam yer ivme kaydı sayısından bir kısmı yapıda göçme oluşturur. Her bir yer hareketinin oluşturduğu göçme veya göçmeme durumunun, diğer yer hareketlerinin sonuçlarından bağımsız olduğu varsayılarak, $\ddot{O} = x_j$ olan n_j ivme kaydı sonucunda z_j göçme gözlemlenmesi olasılığı binom dağılımı ile verilmektedir;

$$P(n \text{ yer hareketinde ki } z_j \text{ göçme}) = \binom{n_j}{z_j} p_j^{z_j} (1-p_j)^{n_j-z_j} \quad (47)$$

burada, p_j , ŞÖ = x_j olan yer hareketinin yapıda göçme oluşturma olasılığıdır. Buradaki amaç p_j 'yi tahmin edebilecek kırılgnlık eğrisini belirlemektir. Maksimum olabirlik yaklaşımı, yapısal analiz sonuçlarından elde edilen göçme verilerini en yüksek olasılık ile vermektedir. Analiz sonuçları birden çok ŞÖ seviyesinden elde edildiğinde, her bir ŞÖ seviyesindeki binominal olasılığın (Formül (47)) çarpımı alınarak bütün verilerin olabirliği elde edilir

$$\text{Olabilirlik} = \prod_{j=1}^m \binom{n_j}{z_j} p_j^{z_j} (1-p_j)^{n_j-z_j} \quad (48)$$

burada, m ŞÖ seviyesinin sayısıdır. p_j için formül (39) yeniden düzenlenirse kırılgnlık eğrisi parametreleri olabilirlik fonksiyonunda açıkça gösterilebilir;

$$\text{Olabilirlik} = \prod_{j=1}^m \binom{n_j}{z_j} \Phi \left(\frac{\ln(x_j / \theta_d)}{\beta_d} \right)^{z_j} \left(1 - \Phi \left(\frac{\ln(x_j / \theta_d)}{\beta_d} \right) \right)^{n_j-z_j} \quad (49)$$

Kırılgnlık eğrisi parametreleri, olabilirlik fonksiyonunun maksimize edilmesi ile hesaplanır. Olabilirlik fonksiyonunun logaritmasını maksimize etmek hem eşdeğer hem de sayısal olarak daha kolay olduğu için fonksiyonun logaritması kullanılabilir.

$$\left\{ \hat{\theta}_d, \hat{\beta}_d \right\} = \arg_{\theta_d, \beta_d} \max \sum_{j=1}^m \left\{ \ln \binom{n_j}{z_j} + z_j \ln \left(\Phi \left(\frac{\ln(x_j / \theta_d)}{\beta_d} \right) \right) + (n_j - z_j) \ln \left(1 - \Phi \left(\frac{\ln(x_j / \theta_d)}{\beta_d} \right) \right) \right\} \quad (50)$$

Bu yöntem kullanılarak elde edilmiş örnek bir kırılgnlık eğrisi Şekil 8b'de gösterilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, beton kemer barajların kırılma eğrilerinin, performansa dayalı deprem mühendisliği yaklaşımı ile elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, kemer barajların kırılma eğrilerini elde etme süreçleri gösterilerek, bir beton kemer barajın üç boyutlu modeli üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında izlenen adımlar aşağıda sırasıyla verilmiş olup Şekil 9'da grafik özet üzerinden çalışmanın akış şeması gösterilmiştir. Aşağıdaki ilk dört adım, malzeme parametrelerinin ve kırılma eğrisi elde edilmesi için gerekli sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu göstermek amacıyla yapılmış ön çalışmalardır.

1. Betonun lineer olmayan davranışını temsil etmek amacıyla seçilen Drucker-Prager-beton malzeme model parametrelerinin doğrulanması için, Koyna beton ağırlık barajının iki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturularak barajın sismik hasar analizi yapılmıştır.
2. Uygulama örneği olarak basitleştirilmiş üç boyutlu bir kemer baraj modeli oluşturulmuştur. Bu kemer barajın statik yükler altında analizi yapılarak baraj davranışı incelenmiştir.
3. Sonlu elemanlar modelinin sönümsüz serbest titreşim analizleri yapılarak ilk 15 titreşim modu verilmiştir.
4. Oluşturulan kemer baraj modelinin, DSİ [148] barajlarda sismik parametrelerin tayini rehberinde öngörüldüğü gibi İşletme Esaslı Deprem (İED) ve Emniyet Esaslı Deprem (EED) düzeylerinde lineer olmayan analizleri yapılmıştır. Analizlerde kullanılmak üzere deprem düzeyleri için belirlenen spektrumlar AFAD [164] Türkiye Deprem Tehlikesi Haritasından alınmış ve 13 adet deprem yer hareketi belirlenen spektrumlara genlik ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiştir.
5. Kırılma eğrisi oluşturma yöntemlerinden olan Çoklu Seviye Analiz (ÇSA) yönteminin kemer barajlara uygulanması için gerekli olan yer hareketlerinin seçimi ve ölçeklendirilmesi konusunda detaylı bir çalışma yapılmıştır.
6. Kırılma eğrileri için seçilen yer hareketleri ile kemer barajın lineer olmayan dinamik analizleri yapılmış ve bu analizler sonucunda, seçilen Şiddet Ölçüleri (ŞÖ) ile Hasar İndeksinin (Hİ) uygunluğu incelenmiştir.
7. Kemer barajın sismik kırılma eğrileri, üç farklı hasar seviyesi (hafif, orta ve ağır)

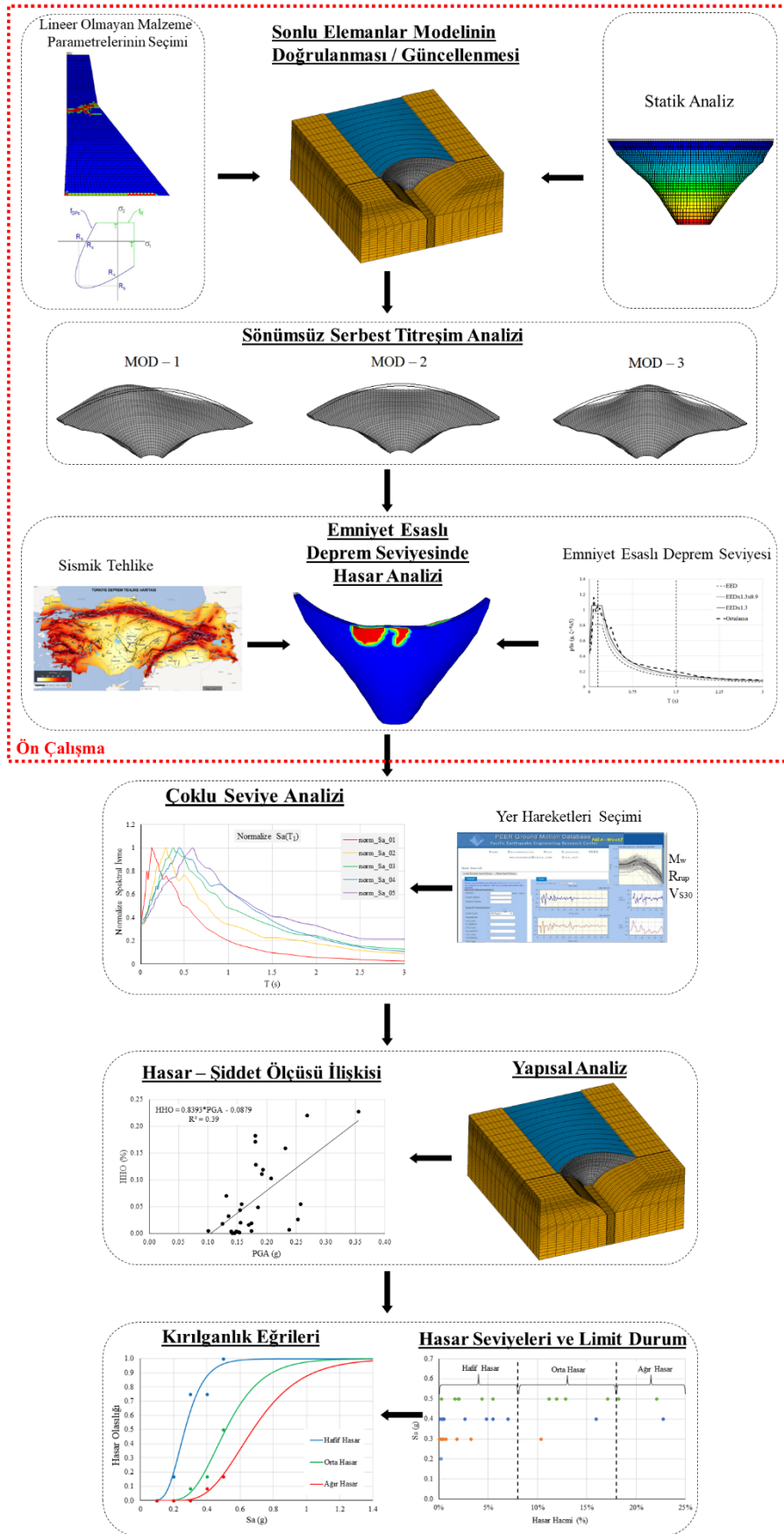
için, ÇSA yöntemi ile elde edilmiştir. İED ve EED deprem düzeyleri 1.mod spektral ivme değerleri kullanılarak, belirlenen hasar düzeylerinin aşılma olasılıkları kırılma eğrileri yardımıyla elde edilmiştir.

2.1. Beton Ağırlık Barajın Deprem Hasar Analizi

Beton barajların sismik hasar analizlerinde, beton malzemenin lineer olmayan davranışı dikkate alınmaktadır. Bu tez çalışmasında, betonun lineer olmayan davranışı Drucker-Prager-Beton malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Bu kapsamda kullanılacak olan bu malzeme modelinin, beton barajların lineer olmayan davranışını temsil etmede uygunluğunu göstermek için, ilk olarak iki boyutlu bir beton ağırlık barajının sonlu elemanlar modeli ile lineer olmayan analiz yapılmıştır. Analiz sonuçlarının, bu baraj için diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaların sonuçları ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bu amaçla Hindistan'da bulunan Koyna beton ağırlık barajı örnek olarak seçilmiştir.

Koyna beton ağırlık barajı 103 m yüksekliğinde ve 807 m uzunluğunda olup, 1954 ile 1963 yılları arasında inşa edilmiştir. Barajın görünümü Şekil 10'da verilmiştir. 11 Aralık 1967 yılında barajdan yaklaşık 13km uzakta meydana gelen Koyna depremi sırasında barajın memba ve mansap yüzeylerinde yatay çatlaklar oluşmuştur. Hasarın çoğu barajın temelden yaklaşık 66.5m yüksekliğindeki boyun bölgesinde yoğunlaşmıştır [165].

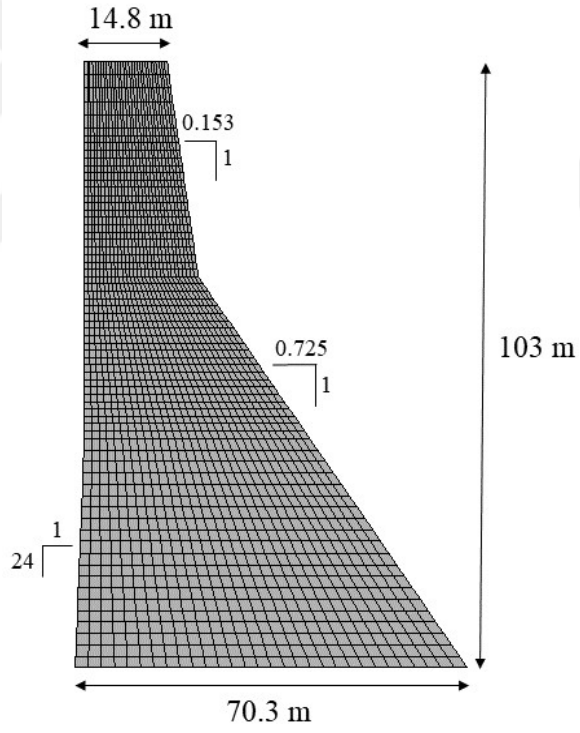
Barajın iki boyutlu sonlu elemanlar modeli ANSYS [166] programı kullanılarak oluşturulmuş ve modelin boyutları Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir. Baraj gövdesi ve temel kayası 4-düğüm noktalı ve iki serbestlik dereceli (x ve y yer değiştirme) katı elemanlar ile modellenmiştir. Baraj gövdesi 2010 adet ve temel kayası da 980 adet elemandan oluşmaktadır. Rezervuar ise 4-düğüm noktalı ve üç serbestlik dereceli (x ve y yer değiştirme ve basınç) akustik sıvı elemanlar ile temsil edilmiştir. Sıvı elemanların yer değiştirme serbestlik dereceleri sadece sıvı-yapı etkileşiminin olduğu yüzeylerde aktifken diğer elemanlarda sadece basınç serbestlik derecesi aktiftir. Bu nedenle, baraj-rezervuar etkileşim sisteminde Eulerian yaklaşımı kabul edilmiştir. Rezervuar ortamı toplam 3720 adet eleman ile modellenmiştir.



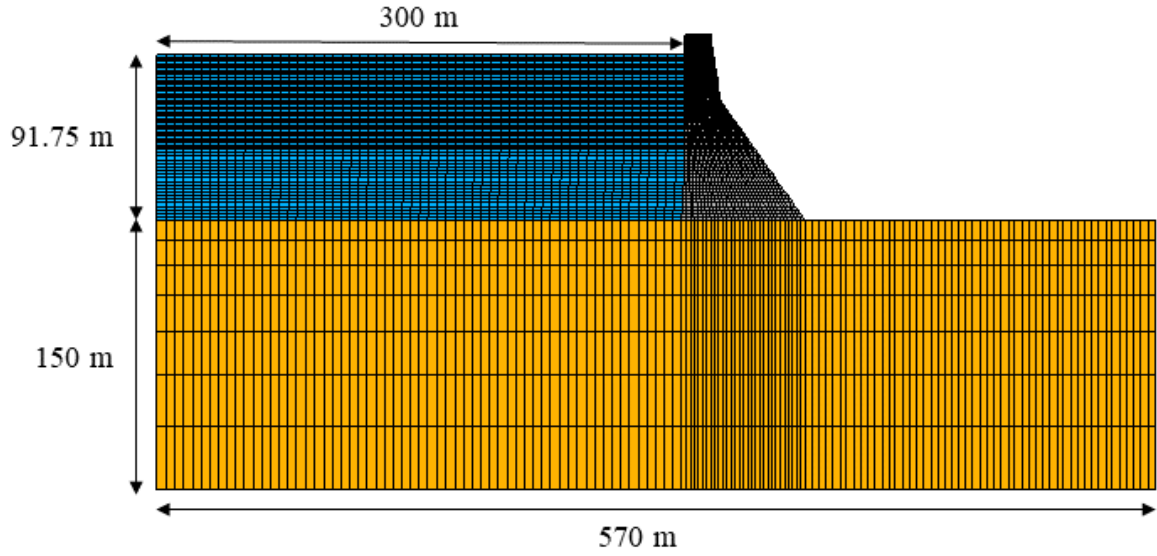
Şekil 9. Tez akış şeması



Şekil 10. Koyna beton ağırlık barajı



Şekil 11. Koyna baraj gövdesinin sonlu elemanlar modeli



Şekil 12. Baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemi sonlu elemanlar modeli

Sonlu elemanlar modeli iki boyutlu olduğundan analizlerde düzlem şekil değiştirme teorisi dikkate alınmıştır. Rezervuar yüzeyinin dalgalanma etkisi ihmal edilmiştir. Modelde temel kayasının dış yüzey sınırları her iki yönde de tutulmuştur. Temel kayası kütleli olarak kabul edilmiş ve beton malzemenin lineer olmayan davranışı Drucker-Prager-Beton modeli ile temsil edilmiştir. Modelde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2’de, betonun çekme ve basınçta lineer olmayan malzeme davranış katsayıları Tablo 3’te gösterilmiştir.

Sistemin sönümsüz serbest titreşim analizleri sonucunda elde edilen ilk on beş modun periyotları Tablo 4’te verilmiştir. Modelin ilk beş mod şekli, boş ve dolu durumlar için Şekil 13’te verilmiştir. Zaman-tanım alanında, direkt zaman integrasyonu yöntemiyle analiz yapılırken; viskoz sönüm oranı Rayleigh yöntemiyle belirlenebilir [124]. Bu çalışmada sönüm oranı %10 kabul edilmiştir [167]. Kütle-orantılı ve rijitlik-orantılı katsayılar, birinci ve on beşinci modlar kullanılarak, sırasıyla 2.7149 s^{-1} ve 0.0018 s olarak hesaplanmıştır.

Dinamik analizde, barajın sağ sahilindeki monolitın temel galerisinde bulunan ivmeölçerin, deprem sırasında kaydettiği ivme kayıtları kullanılmıştır [165]. Yatay bileşenlerden memba yönü ve düşey kayıt aynen kullanılmıştır. Kayıtların ivme-zaman grafiği Şekil 14’te gösterilmiştir. Bu iki ivme bileşeninin mutlak en büyük değerleri sırası ile 0.47 g ve 0.31 g ’dir. Kayıtların tepki spektrumları Şekil 15’te gösterilmiştir.

Tablo 2. Koyna barajı modelinin malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği ve Birimi		Değeri
Beton	Elastisite modülü (GPa)	31
	Poisson oranı	0.15
	Yoğunluk (kg/m ³)	2643
	Eksenel basınç dayanımı (MPa)	13
	Eksenel çekme dayanımı (MPa)	3.6
	İki eksenli basınç dayanımı (MPa)	24.1
	Elastisite modülü (GPa)	31
Temel Kayası	Poisson oranı	0.33
	Yoğunluk (kg/m ³)	-
	Yoğunluk (kg/m ³)	1000
Rezervuar	Basınç dalga yayılma hızı (m/s)	1440
	Taban yansıma katsayısı	1

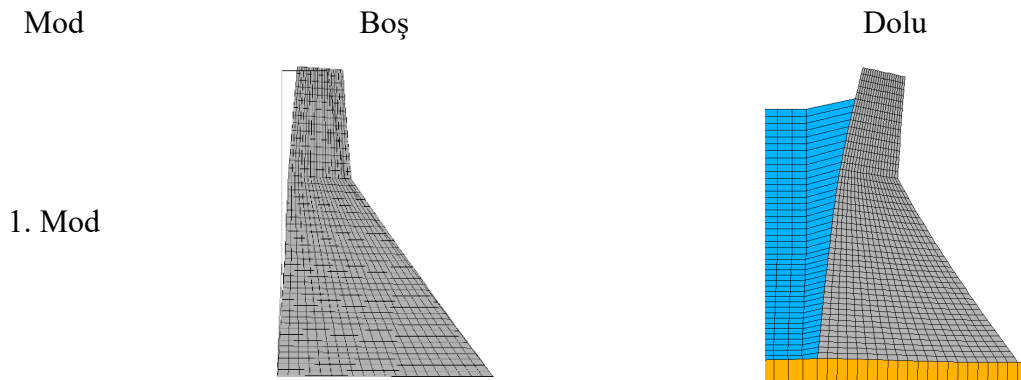
Tablo 3. Betonun lineer olmayan davranış fonksiyonu katsayıları

Sembol	Tanımı	Değeri
κ_{cm}	Bir eksenli basınç dayanımındaki plastik birim şekil değiştirme	0.004
κ_{cr}	Basıncıdaki en büyük efektif plastik birim şekil değiştirme	0.0054
Ω_{ci}	Lineer olmayan artışın başlangıcındaki göreceli gerilme	0.60
Ω_{cr}	Kalıcı göreceli basınç gerilmesi	0.10
κ_{tr}	Çekmedeki plastik birim şekil değiştirme limiti	0.0005
Ω_{tr}	Kalıcı göreceli çekme gerilmesi	0.20

Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda, barajın kret seviyesinde oluşan yatay deplasmanın zamanla değişimi Şekil 16'da ve baraj gövdesinde meydana gelen kademeli hasar oluşumu Şekil 17'de gösterilmiştir. Oluşan hasarın ve elde edilen yer değiştirme değerlerinin literatüre [168 - 176] uygun olduğu görülmüştür. Bu nedenle, kullanılan beton malzeme modelinin, beton barajların lineer olmayan davranışını temsil etmede kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Tablo 4. Koyna barajının periyotları

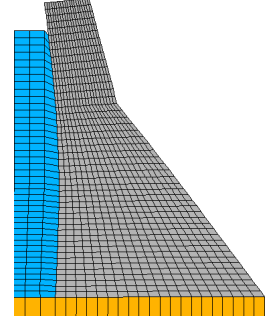
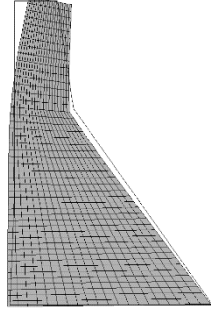
MOD	Periyot (s)	
	Boş	Dolu
1	0.353	0.399
2	0.149	0.259
3	0.133	0.203
4	0.079	0.162
5	0.052	0.141
6	0.048	0.130
7	0.034	0.109
8	0.030	0.092
9	0.029	0.089
10	0.026	0.087
11	0.025	0.083
12	0.022	0.077
13	0.020	0.074
14	0.020	0.070
15	0.018	0.064



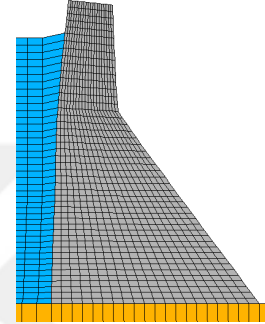
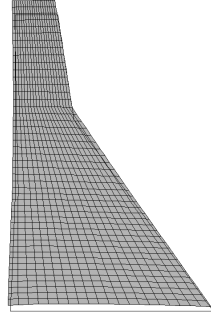
Şekil 13.Koyna barajının boş ve dolu durumları için mod şekilleri

Şekil 13'ün devamı

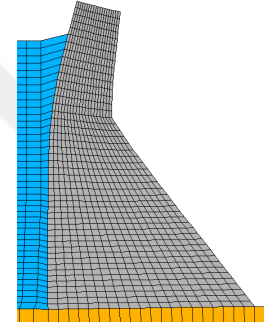
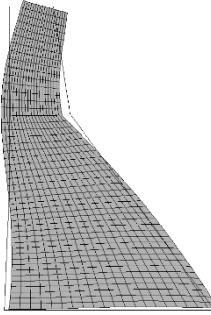
2. Mod



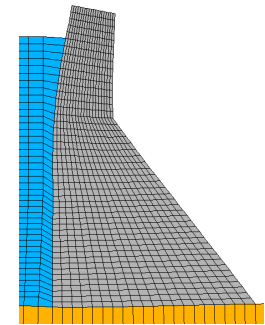
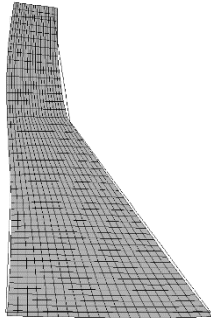
3. Mod

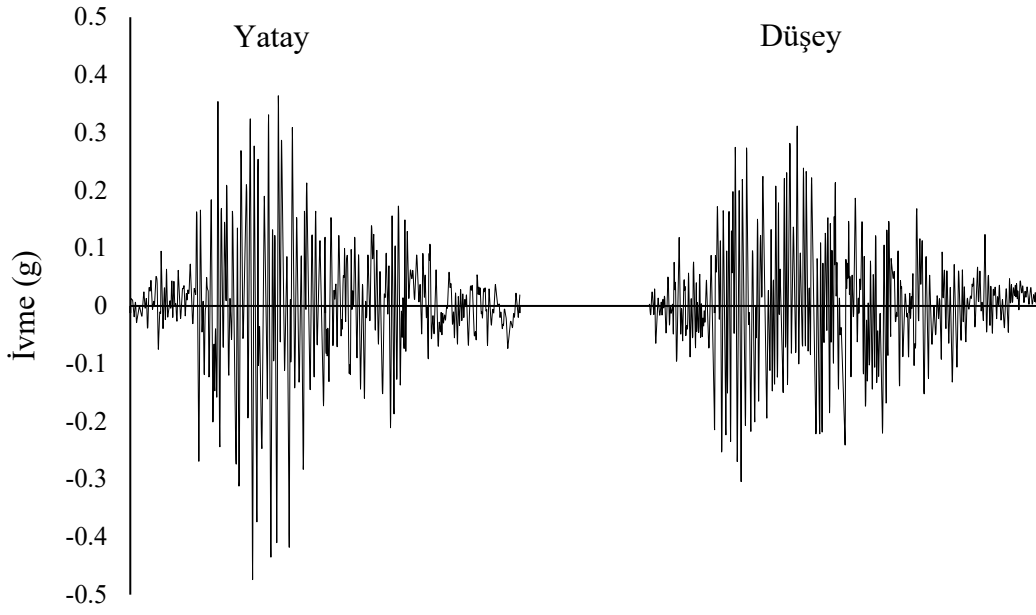


4. Mod

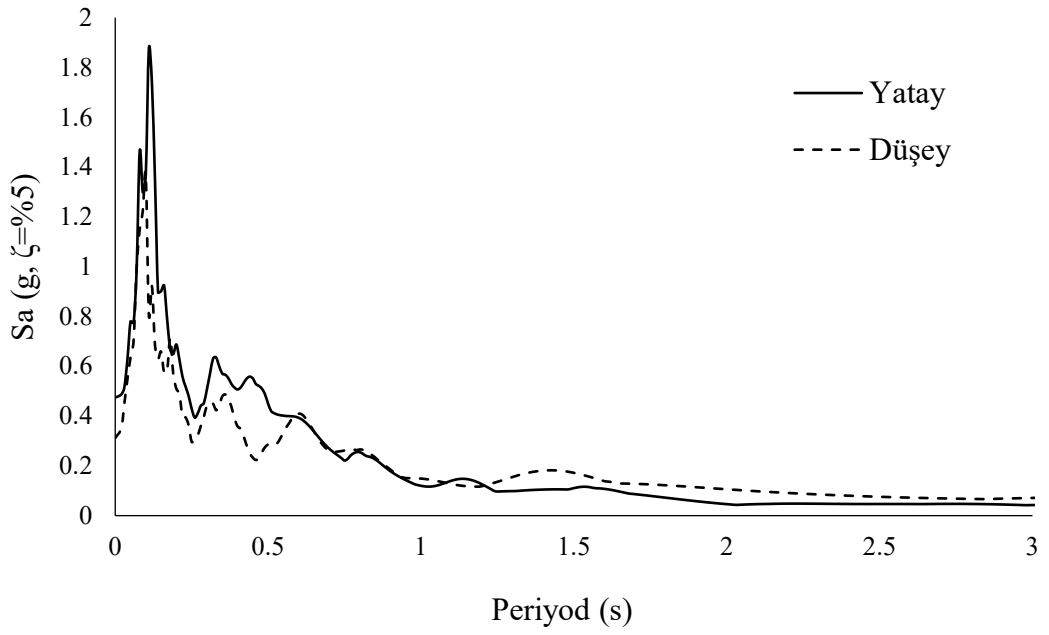


5. Mod

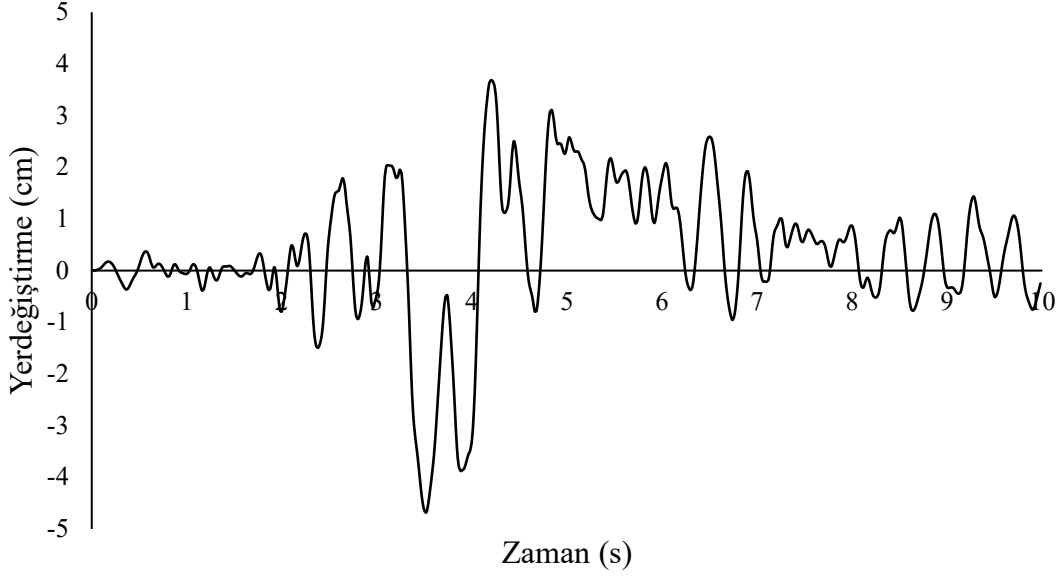




Şekil 14. Koyuna deprem ivme kaydının yatay ve düşey bileşenleri



Şekil 15. Koyuna deprem kaydının yatay ve düşey tepki spektrumları

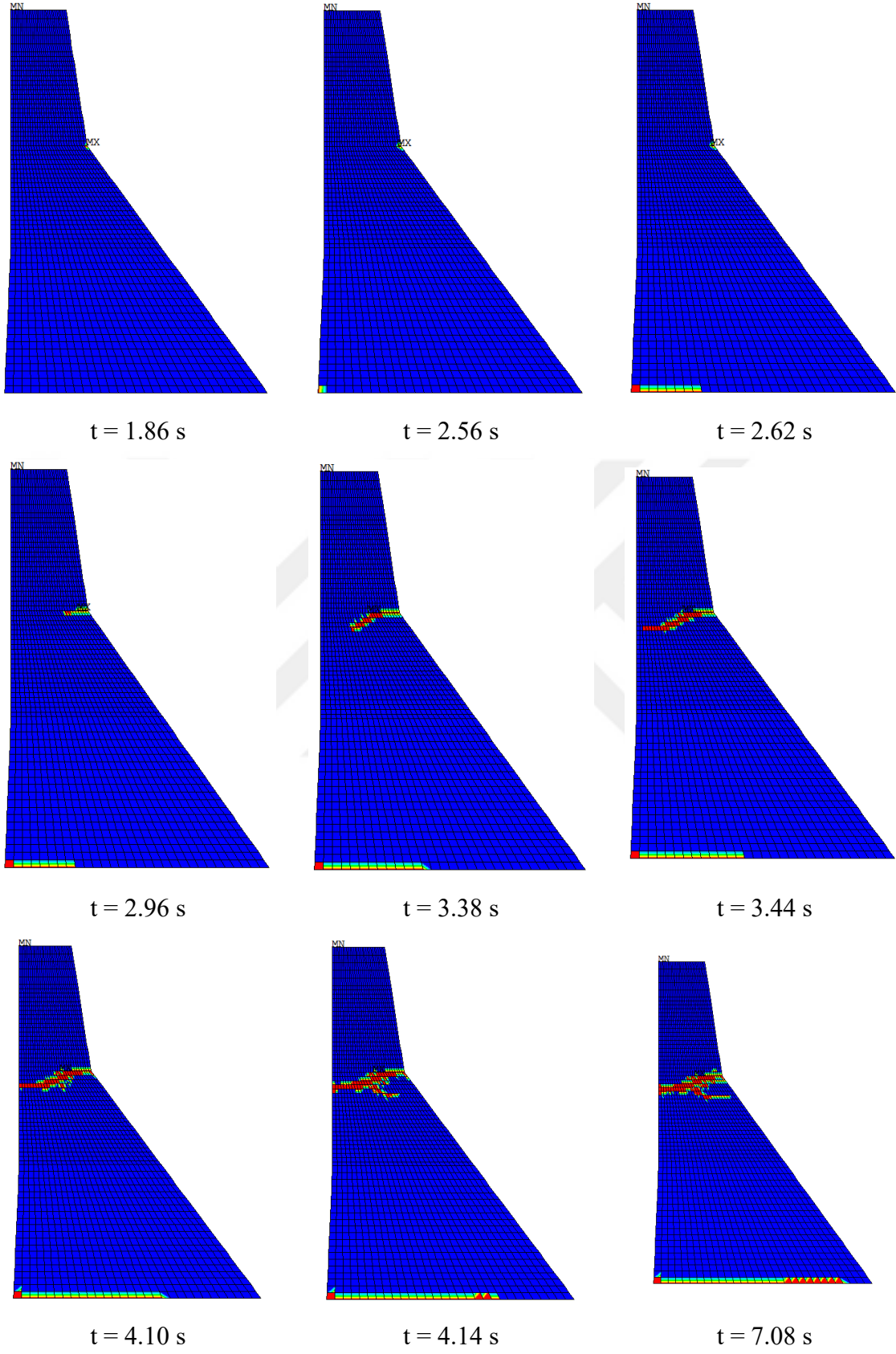


Şekil 16. Koyna baraj kretinin yatay yer değiştirme grafiği

2.2. Beton Kemer Barajın Deprem Hasar Analizi

Bu çalışmada, uygulama rneği için oluşturulan kemer baraj sonlu elemanlar modeli ile doğrusal olmayan sismik analizler yapılmış ve barajın deprem performansı incelenmiştir. Barajın kırılgnlık eğrilerinin oluşturulması için yapılacak olan analizlerden önce, sonlu elemanlar modelinin uygunluğu incelenerek n bir çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda aşağıda sıralanan hesaplar gerçekleştirilmiştir:

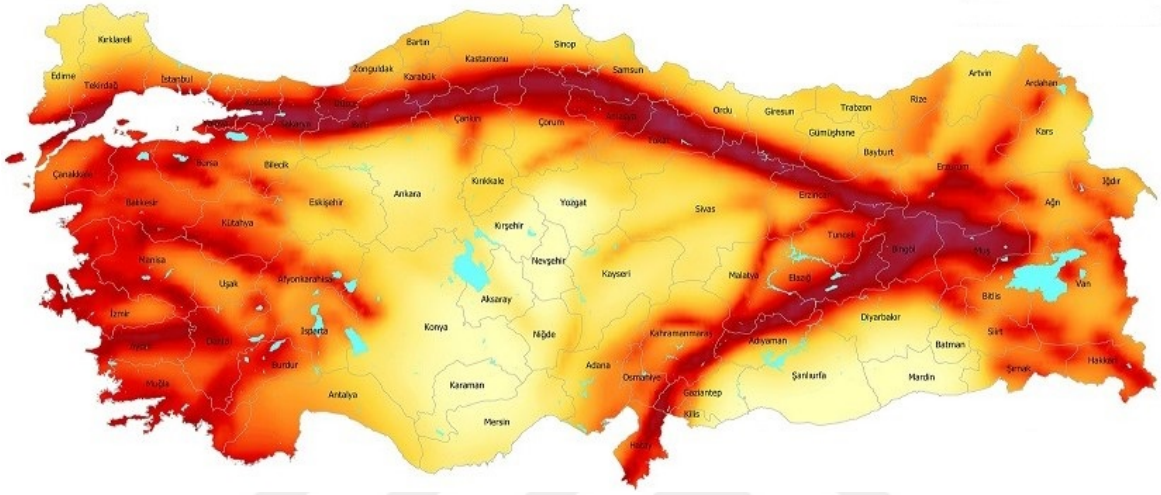
1. Barajın bulunduğu varsayılan bölgenin depremselliği incelenerek, hasar analizlerinde kullanılacak olan deprem seviyeleri belirlenmiştir.
2. Barajın sonlu elemanlar modeli, geometri, sınır şartları, eleman tipleri ve sıvı-yapı-temel etkileşimi dikkate alınarak oluşturulmuştur.
3. Barajın statik analizi yapılarak, baraj modelinin statik yükler altındaki davranışı incelenmiştir.
4. Modelin sönümsüz serbest titreşim analizleri yapılarak, barajın periyodları hesaplanmıştır.
5. Deprem seviyelerine uygun yer hareketleri seçilerek ölçeklenmiş ve baraj sonlu elemanlar modeli bu yer hareketlerine maruz bırakılarak meydana gelen hasar düzeyleri belirlenmiştir.



Şekil 17. Koyuna barajında oluşan kademeli hasar

2.2.1. Baraj Bölgesinin Depremselliği

Bu tez çalışmasında, AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası [164] kullanılarak sismik tehlike hesap parametreleri elde edilmiştir. Şekil 18’de, Türkiye Deprem Tehlike Haritası [164] verilmiştir.



Şekil 18. Türkiye Deprem Tehlike Haritası [164].

Yeni yapılacak barajların tasarımı sırasında veya mevcut barajların deprem güvenlik analizlerinde İşletme Esaslı Deprem (İED) ve Emniyet Esaslı Deprem (EED) seviyeleri kullanılır [147, 148].

İşletme Esaslı Deprem (İED), barajın servis ömrü boyunca olma olasılığı yüksek olan depremdir. İED olması halinde oluşacak sınırlı çatlama hasarı, barajın normal işleyişini engellemeyecek seviyede kalmalı ve süratli bir şekilde tamir edilebilmelidir [167]. Bu çalışmada, İED için 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (tekrarlama periyodu 475 yıl) yer hareketi düzeyi alınmıştır.

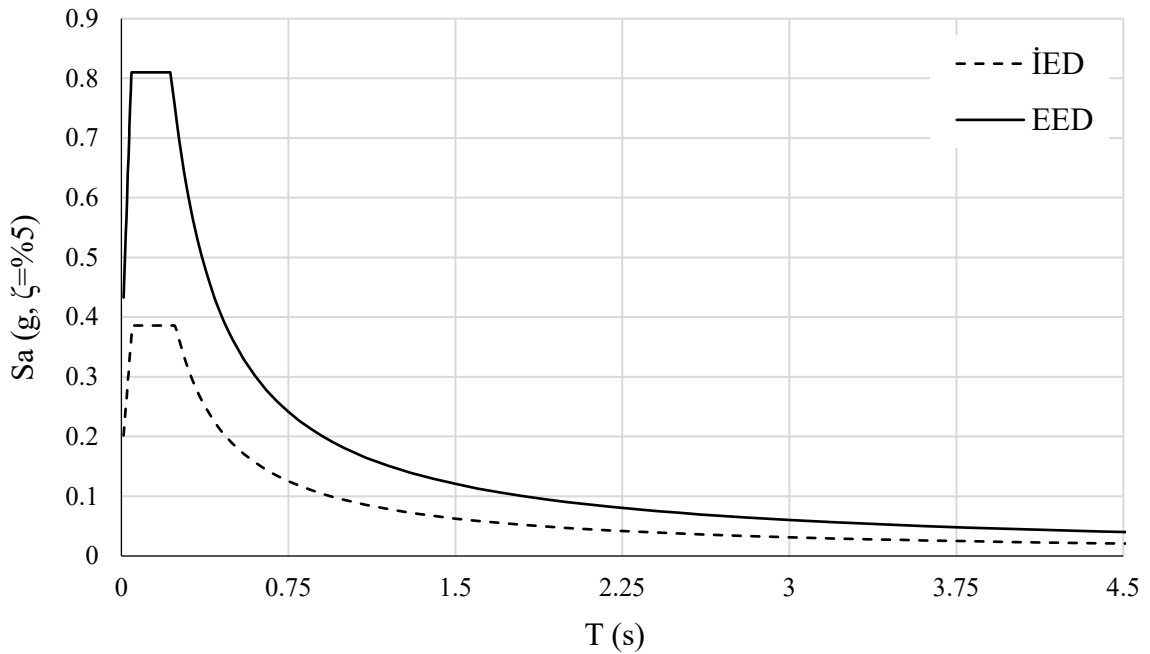
Emniyet Esaslı Deprem (EED), barajın servis ömrü boyunca meydana gelme olasılığı düşük olan depremdir. EED olması halinde oluşacak yıkım, kırılma, kopma, göçme, rezervuar boşalması gibi hasarlar baraj gövdesi ve mansap güvenliğini tehlikeye atmamalıdır [167]. Bu çalışmada, EED için 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan (tekrarlama periyodu 2475 yıl) yer hareketi düzeyi alınmıştır.

Bu deprem seviyeleri için ivme spektrumlarının belirlenmesinde Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasından [164] faydalanılmıştır. Barajın varsayılan konumu kullanılarak ZB zemin sınıfı (az ayrışmış, orta sağlam kayalar) için baraj bölgesinin

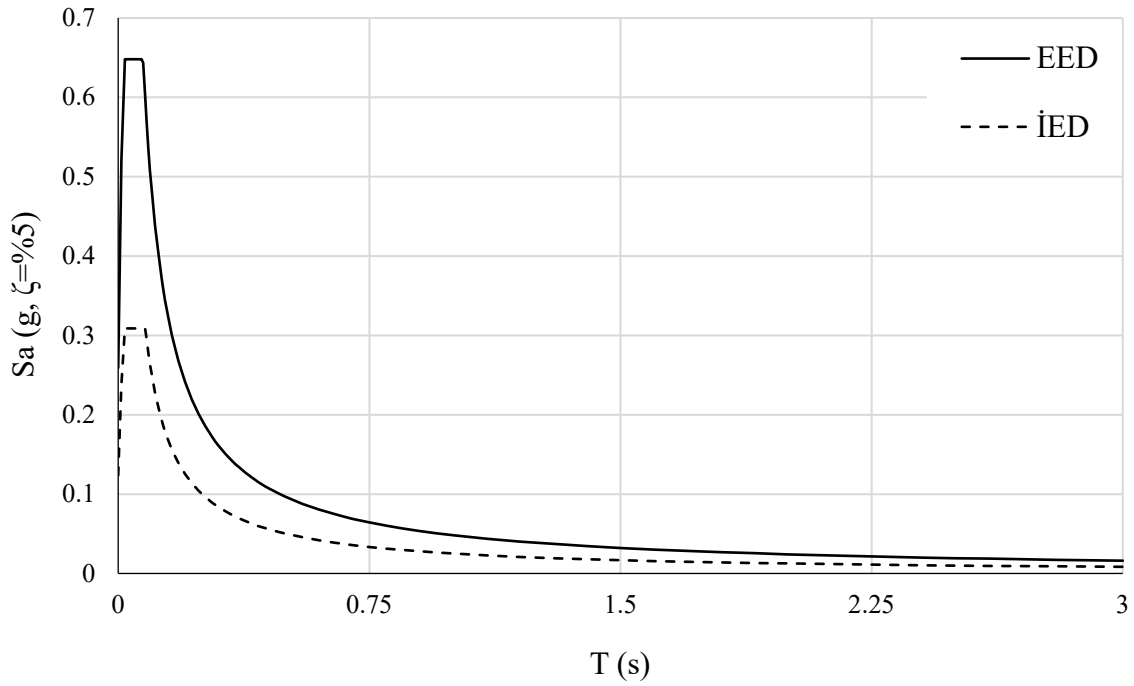
yer hareketi parametreleri elde edilmiş ve Tablo 5'te gösterilmiştir. Burada S_{DS} ve S_{D1} sırasıyla kısa periyot ve 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayılarıdır, PGA ve PGV sırası ile en büyük yer ivmesi ve en büyük yer hızıdır. Tablodaki değerler kullanılarak bu deprem seviyeleri için yatay ve düşey tasarım spektrumları elde edilerek Şekil 19 ve Şekil 20'de gösterilmiştir.

Tablo 5. Sismik tehlike hesap parametreleri [164]

	İED	EED
S_{DS}	0.386	0.810
S_{D1}	0.094	0.181
PGA (g)	0.187	0.383
PGV (cm/s)	10.535	21.219



Şekil 19. Farklı deprem seviyelerinin yatay ivme spektrumları



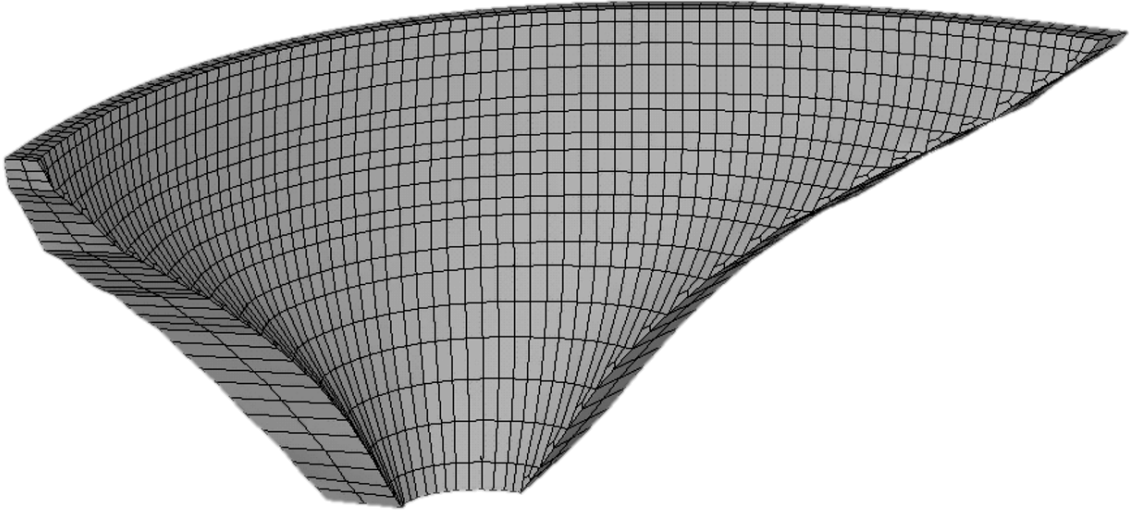
Şekil 20. Farklı deprem seviyelerinin düşey ivme spektrumları

2.2.2. Kemer Barajın Sonlu Elemanlar Modeli

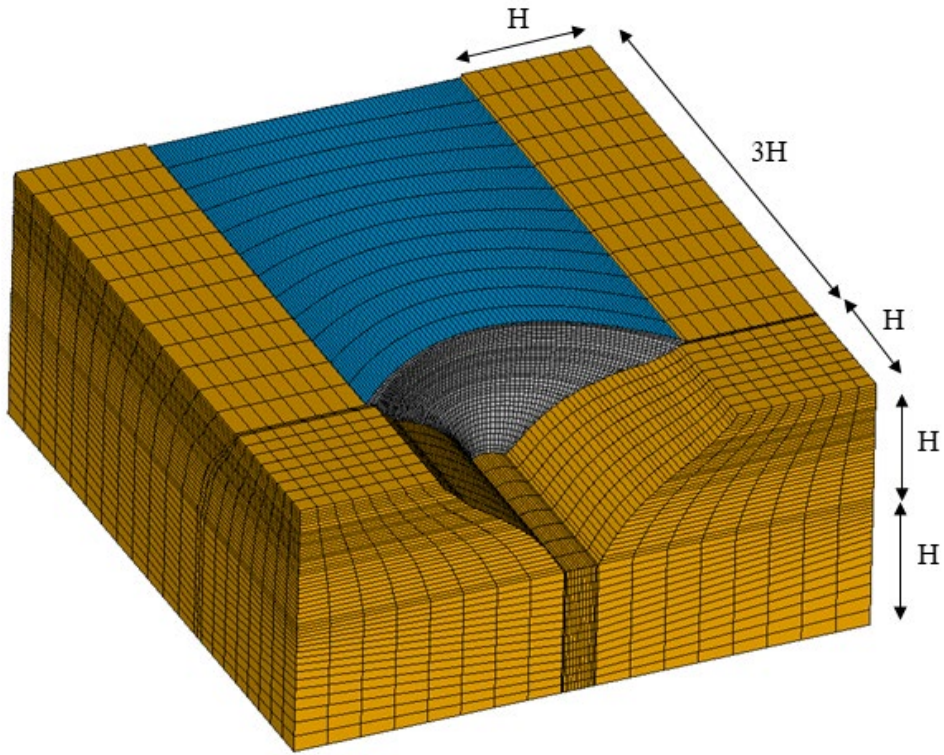
Uygulama örneği olarak tercih edilen beton kemer baraj çift eğrilikli olup 249 m yüksekliğe sahiptir. Kemer baraj simetrik olmayıp kret uzunluğu 720 m'dir. Kret genişliği 12 m ile 18 m arasında değişmekte ve temel genişliği 55 m'dir.

Örnek kemer barajın, baraj-rezervuar-temel kayası etkileşim sisteminin 3-boyutlu sonlu eleman modeli, ANSYS [166] sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Baraj gövdesinin sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 21'de verilmiştir. Gövdeyi oluşturan beton malzeme Drucker-Prager-Beton modeli ile temsil edilmiştir.

Gövdenin oturduğu temel kayası kütsüz ve lineer elastik olarak kabul edilmiştir. Baraj-temel etkileşimini sağlayabilmek için, temel kayası, memba yönünde baraj yüksekliğinin (H) üç katı kadar, diğer yönlerde (mansap, düşey, sağ ve sol sahil) ise bir baraj yüksekliği kadar uzatılarak modellenmiştir. Baraj-rezervuar etkileşimi Euler yaklaşımı ile modellenmiş ve temel-rezervuar etkileşimi ihmal edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde rezervuar seviyesi, kret seviyesinden 7m aşağıdadır. Baraj-rezervuar-temel etkileşim sisteminin üç boyutlu sonlu elemanlar modeli Şekil 22'de verilmiştir. Ayrıca rezervuarın sınır şartlarının matematiksel gösterimi Şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 21. Baraj gövdesinin sonlu elemanlar ağı modeli

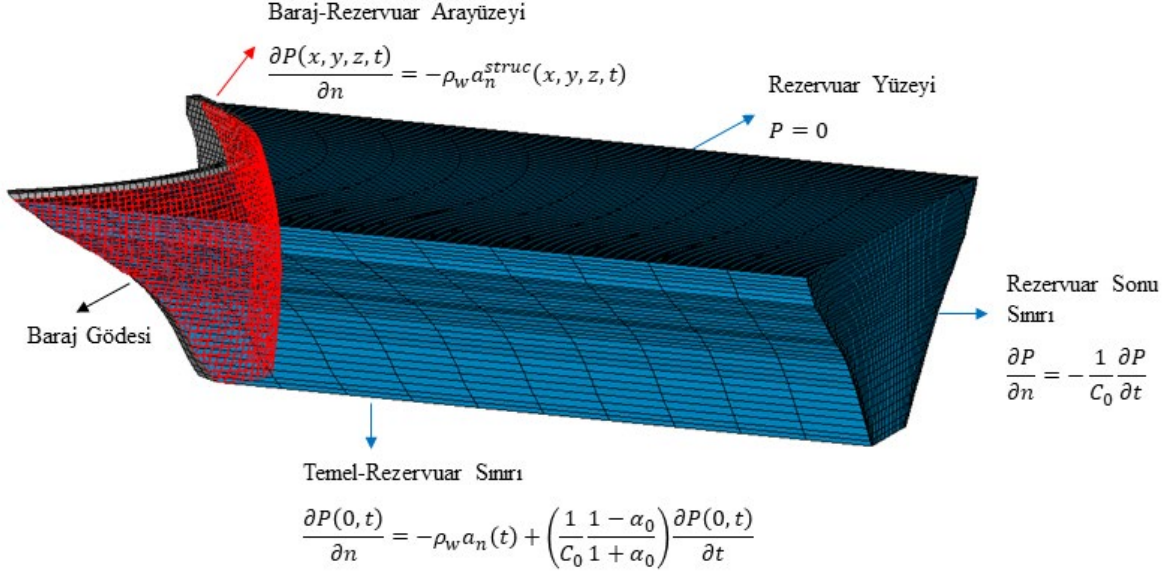


Şekil 22. Baraj-Rezervuar-temel etkileşim sistemi sonlu elemanlar modeli

Modelde dikkate alınan malzeme özellikleri Tablo 6 ve Tablo 7’de verilmiş olup betonun statik aksenal çekme dayanımı ($f_{t,st}$) denklem (51) ile elde edilmiştir. Denklem (51)’de, f_c , betonun aksenal basınç dayanımıdır. Betonun dinamik çekme dayanımı ise statik çekme dayanımının 1.5 katı olarak kabul edilmiştir [177]. Betonun dinamik elastisite

modülü, statik elastisite modülünün yaklaşık 1.15 katı olarak kabul edilmiştir [177].

$$f_{t_st} = 0.32 f_c^{2/3} \quad (51)$$



Şekil 23. Rezervuar sınır şartlarının matematiksel gösterimi

2.2.3. Kemer Barajın Statik Analizi

Barajın statik yükler altındaki davranışını incelemek için, sonlu elemanlar modelinde baraj-temel etkileşim sistemine, barajın kendi ağırlığı ve baraj yüzeyine yanal su basıncı etki ettirilerek, statik analiz yapılmıştır. Baraja etki ettirilen yanal su basınç dağılımı Şekil 24’de gösterilmiştir.

Statik analiz sonucunda barajın şekil değiştirmiş geometrisi Şekil 25’te, gövdenin yatay yer değiştirme kontur dağılımı Şekil 26’da verilmiştir. Ayrıca, baraj gövdesinde oluşan en büyük çekme ve basınç asal gerilme kontur dağılımı sırasıyla Şekil 27 ve Şekil 28’de gösterilmiştir.

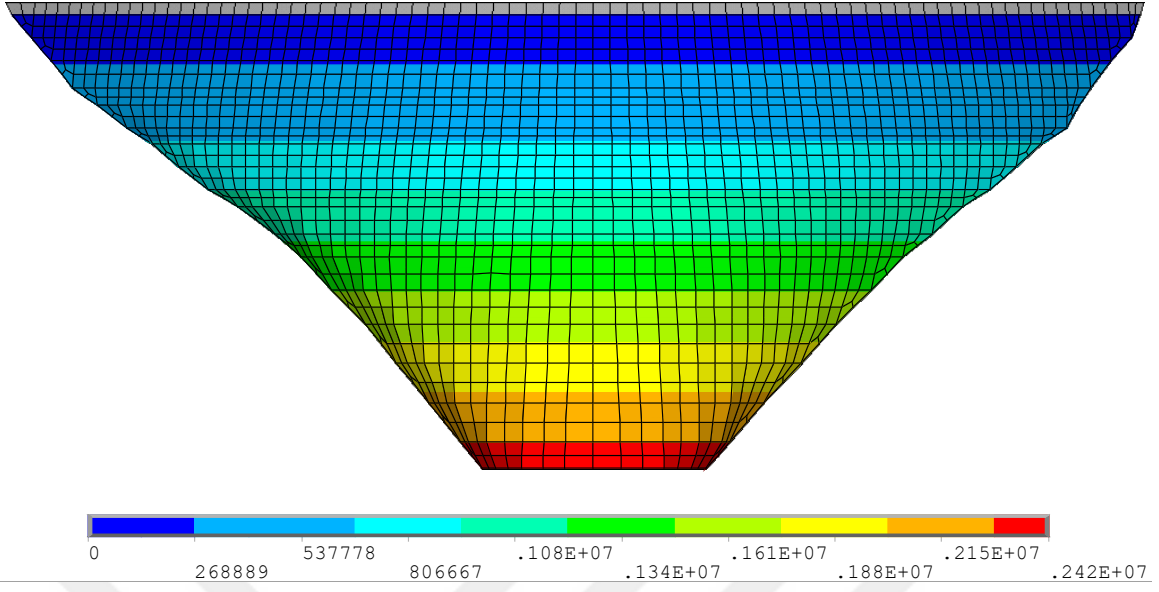
Barajın orta düşey konsolu (blok 21) için elde edilen yatay yer değiştirmeler Şekil 29’da gösterilmiştir. Ayrıca ölçüm sonuçlarından bu konsolun düşey yer değiştirmesi -16.0 mm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6. Kemer baraj modelinin malzeme özellikleri

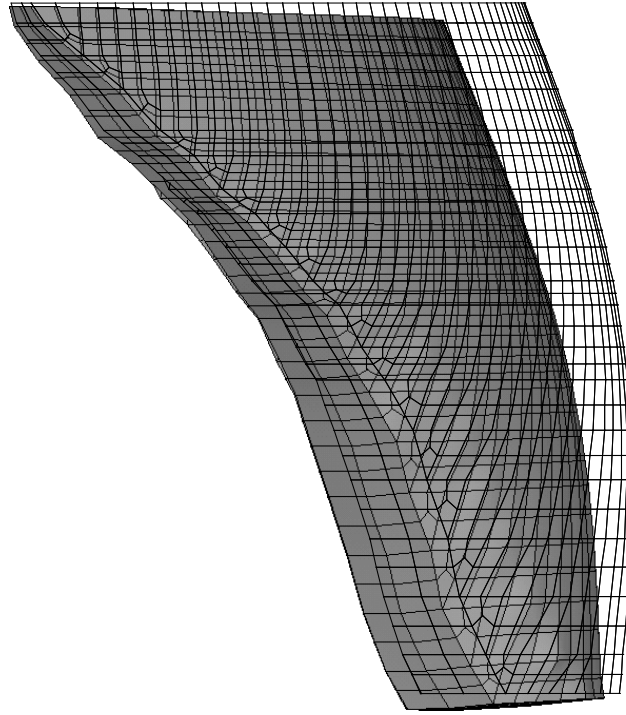
	Malzeme Özelliği ve Birimi	Değeri
Beton	Elastisite modülü (GPa) – Statik	29.0
	Elastisite modülü (GPa) – Dinamik	33.0
	Poisson oranı	0.18
	Yoğunluk (kg/m ³)	2400
	Eksenel basınç dayanımı (MPa)	45.0
	Eksenel çekme dayanımı (MPa) – Statik	4.05
	Eksenel çekme dayanımı (MPa) – Dinamik	6.075
	İki eksenli basınç dayanımı (MPa)	54.0
Temel Kayası	Elastisite modülü (GPa)	12.0
	Poisson oranı	0.2
	Yoğunluk (kg/m ³)	-
Rezervuar	Yoğunluk (kg/m ³)	1000
	Basınç dalga yayılma hızı (m/s)	1440
	Taban yansıtma katsayısı	0.75

Tablo 7. Betonun lineer olmayan davranış fonksiyonu katsayıları

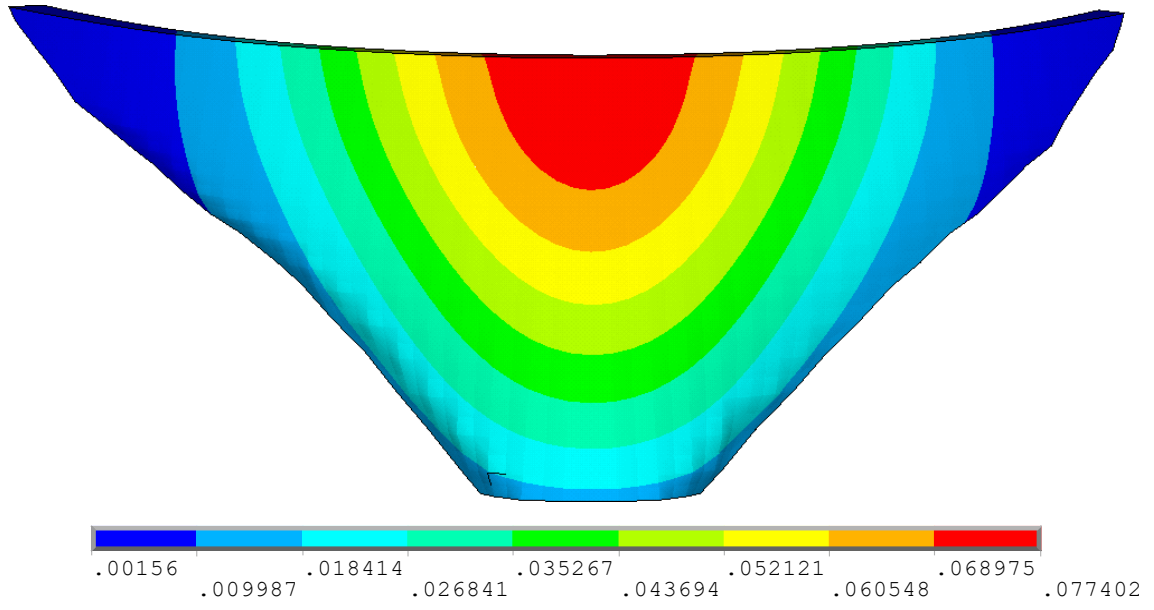
Sembol	Tanımı	Değeri
κ_{cm}	Bir eksenli basınç dayanımındaki plastik birim şekil değiştirme	0.004
κ_{cr}	Basınçtaki en büyük efektif plastik birim şekil değiştirme	0.0054
Ω_{ci}	Lineer olmayan artışın başlangıcındaki göreceli gerilme	0.60
Ω_{cr}	Kalıcı göreceli basınç gerilmesi	0.10
κ_{tr}	Çekmedeki plastik birim şekil değiştirme limiti	0.0005
Ω_{tr}	Kalıcı göreceli çekme gerilmesi	0.20



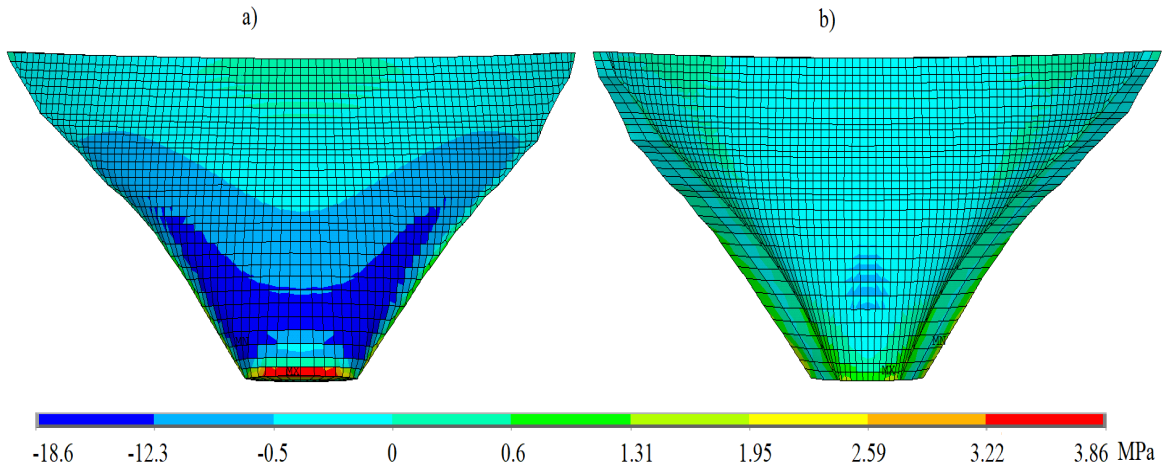
Şekil 24. Hidrostatik su basıncı yükleme durumu



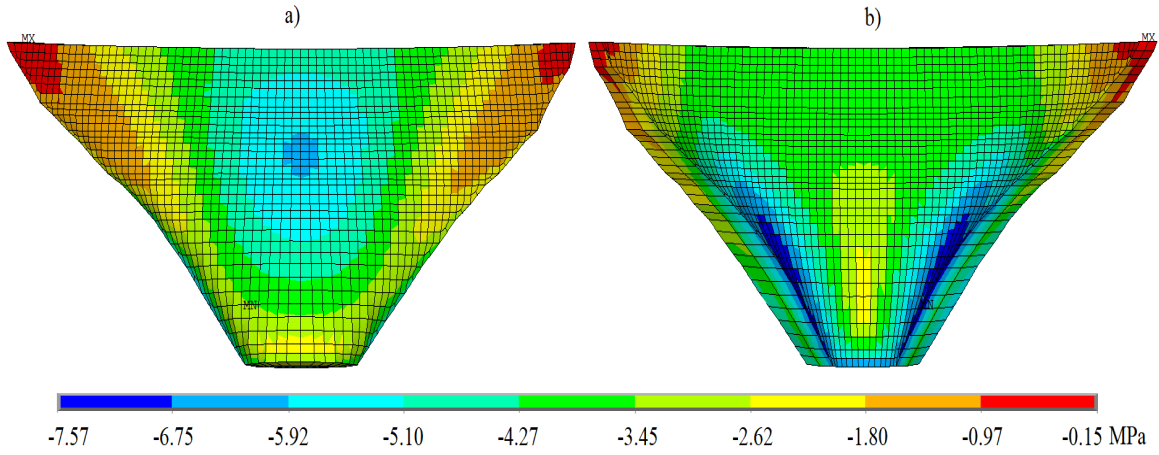
Şekil 25. Statik yükler altında barajın şekil değiştirmiş hali



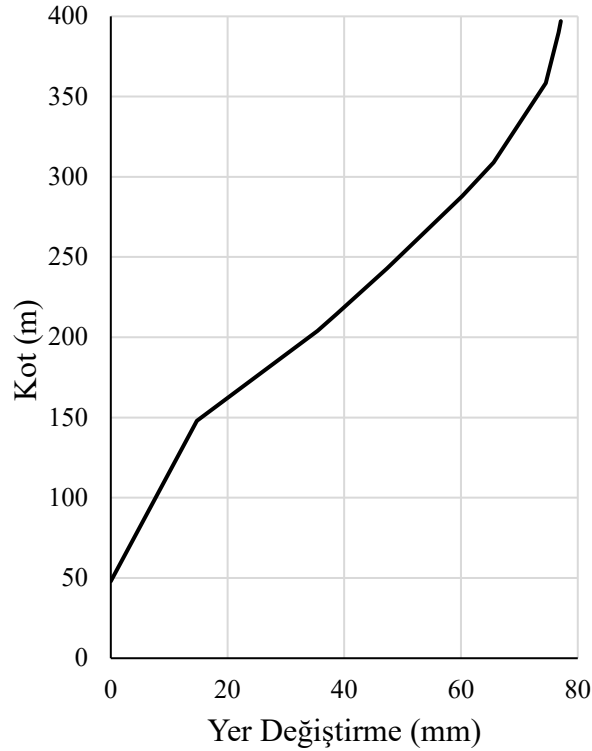
Şekil 26. Memba-mansap yönü yer değıştirme (m) kontur (memba yüzeyi) dağılımı



Şekil 27 a) Memba yüzü ve b) Mansap yüzü en büyük asal çekme gerilme dağılımı



Şekil 28 a) Memba yüzü ve b) Mansap yüzü en büyük asal basınç gerilme dağılımı



Şekil 29. Orta bloğun (21. blok) yatay yer değiştirme grafiği

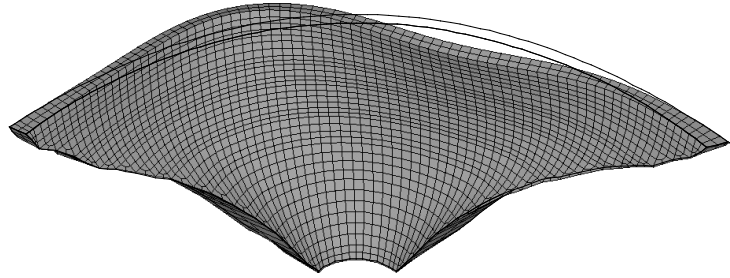
2.2.4. Kemer Barajın Sönümsüz Serbest Titreşim Analizleri

Baraj-rezervuar-temel etkileşim sisteminin dinamik analizlerinin önemli bir adımı da sistemin modal davranışlarının belirlenmesidir. Örnek baraj modelinin modal analizleri sonucunda elde edilen frekans ve periyot değerleri Tablo 8’de, mod şekilleri Şekil 30’da verilmiştir.

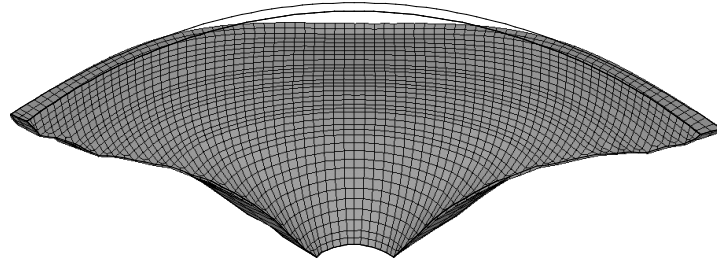
Tablo 8. Modal analiz sonuçları

Mod	Periyot (s)	Frekans (Hz)
1	0.751	1.33
2	0.669	1.49
3	0.484	2.06
4	0.370	2.70
5	0.346	2.88
6	0.314	3.19
7	0.302	3.32
8	0.287	3.48
9	0.255	3.92
10	0.249	4.02
11	0.237	4.22
12	0.232	4.32
13	0.219	4.56
14	0.215	4.66
15	0.209	4.79

MOD 1
f: 1.33 Hz



MOD 2
f: 1.49 Hz

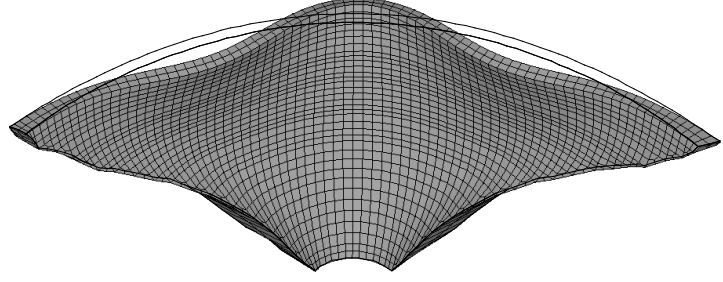


Şekil 30. Barajın mod şekilleri

Şekil 30'un devamı

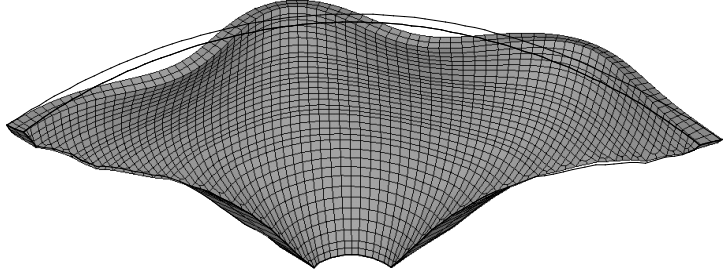
MOD 3

f: 2.06 Hz



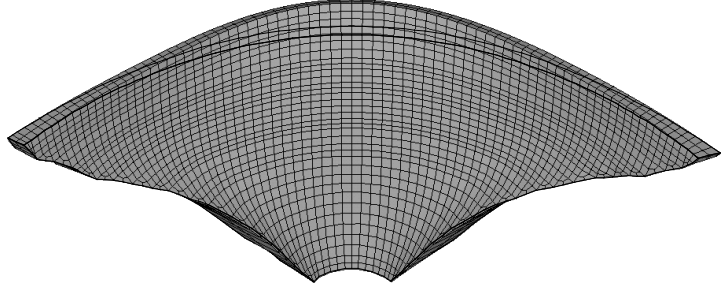
MOD 4

f: 2.70 Hz



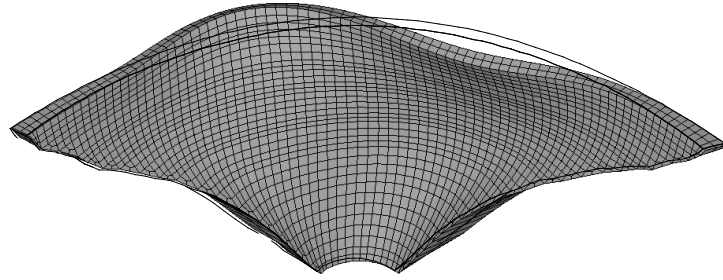
MOD 5

f: 2.88 Hz



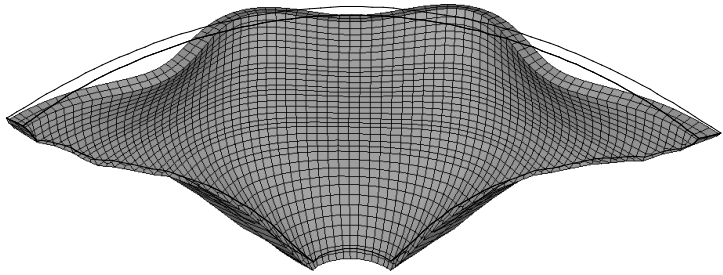
MOD 6

f: 3.19 Hz



MOD 7

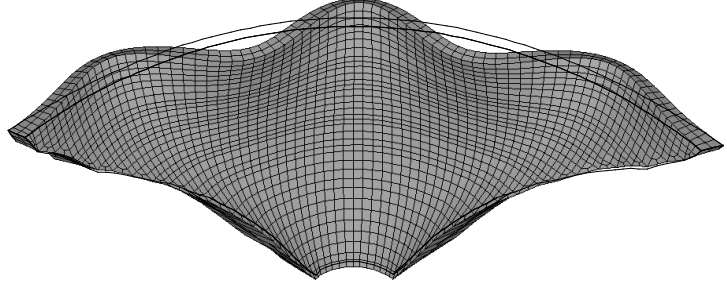
f: 3.32 Hz



Şekil 30'un devamı

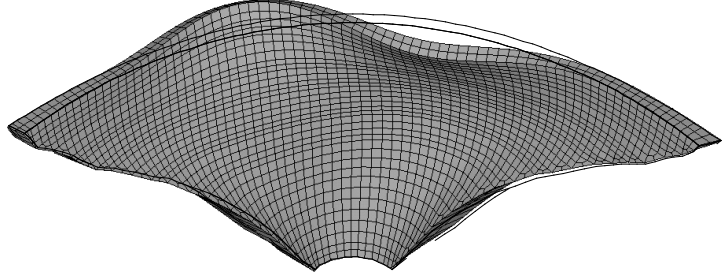
MOD 8

f: 3.48 Hz



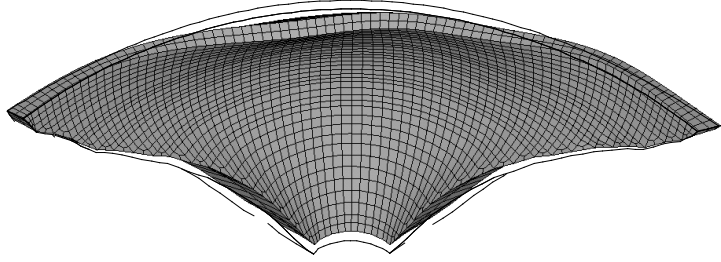
MOD 9

f: 3.92 Hz



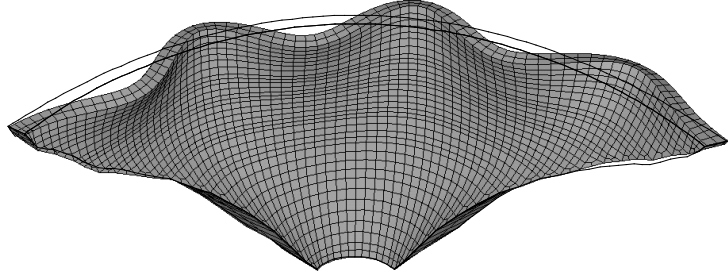
MOD 10

f: 4.02 Hz



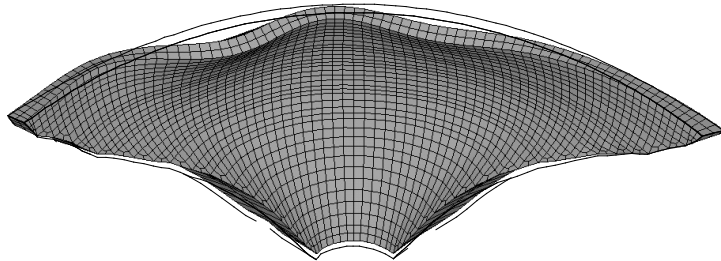
MOD 11

f: 4.22 Hz



MOD 12

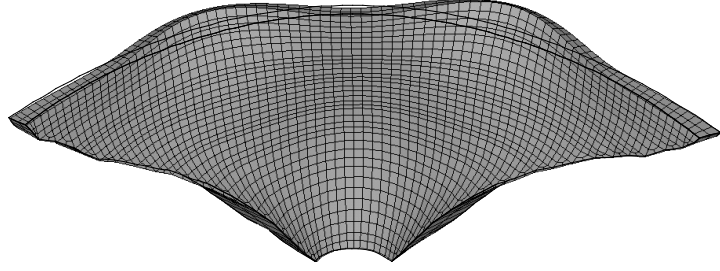
f: 4.32 Hz



Şekil 30'un devamı

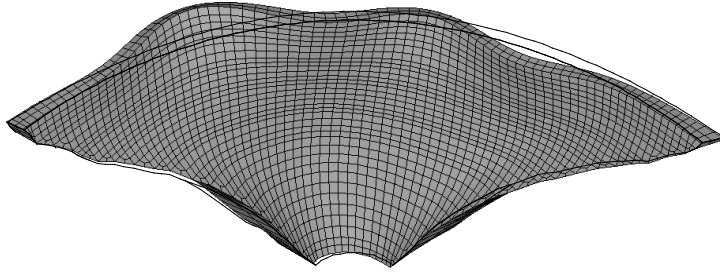
MOD 13

f: 4.56 Hz



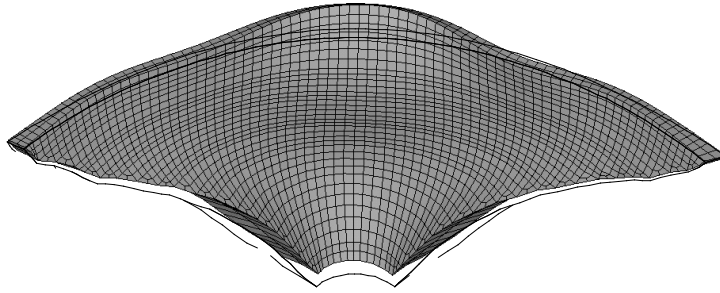
MOD 14

f: 4.66 Hz



MOD 15

f: 4.79 Hz



2.2.5. Yer Hareketlerinin Seçimi, Ölçeklenmesi ve Analiz Sonuçları

Bu bölümde beton kemer barajın lineer olmayan deprem davranışını incelemek için, zaman-tanım alanında sismik analizler gerçekleştirilmiştir. Beton barajların sismik analizlerinin yapılması ile ilgili kılavuzlarda [167, 134] tavsiye edilen yer hareketi sayısı 5 ve 7'dir. Fakat bu sayılar bazen barajın sismik davranışını yakalamak için yeterli olmayabilir. Bu nedenle sismik analizlerde, bu çalışmada olduğu gibi, daha fazla yer hareketi kullanılmasında fayda vardır.

İED ve EED deprem seviyeleri için 13 adet yer hareketi PEER yer hareketi veri tabanı [178] kullanılarak seçilmiştir. Seçilen yer hareketlerinde fay tipi doğrultu atımlı olarak seçilmiş ve moment büyüklük (M_w) $5 < M_w < 7$ aralığında seçilmiştir. Fayın kırılma düzlemine (R_{rup}) olan uzaklık 200 km'den küçük seçilmiş ve zeminin ilk 30 metre için kayma dalgası hızı (V_{s30}) $700 < V_{s30} < 1800$ m/s aralığında seçilmiştir. Seçilen deprem kayıtları

Tablo 9’da gösterilmiştir. Kayıtlar daha önce oluşturulan İED ve EED deprem seviyeleri hedef spektrumlarına ölçeklenmiş ve ölçeklendirme katsayıları denklem (52) kullanılarak hesaplanmıştır [179]. Barajlarda Sismik Parametrelerin Tayini Rehberine [148] göre, ivme kayıtlarının her iki yatay yöndeki bileşenleri aynı değer ile ölçeklendirilir ve tepki spektrumlarının bileşkesi karelerinin toplamının karekökleri (KTK) yöntemi ile hesaplanır. Bu bileşke spektrumların aritmetik ortalaması, $0.2T_1$ ile $2T_1$ periyod (T_1 barajın birinci titreşim periyodu) aralığında, %30 arttırılmış hedef spektrumdan, %10 daha düşük olmamalıdır.

$$\ln f = \frac{\sum_i w(T_i) \ln \left(\frac{Sa^{hdf}(T_i)}{Sa^{kyt}(T_i)} \right)}{\sum_i w(T_i)} \quad (52)$$

burada f ölçeklendirme katsayısını, $Sa^{hdf}(T_i)$ ve $Sa^{kyt}(T_i)$ sırasıyla hedef spektral ivme değerini ve deprem kaydının spektral ivme değerini temsil etmektedir. $w(T_i)$ dikkate alınan periyod aralığındaki her bir periyodun ağırlığını gösteren fonksiyon olup, burada bütün periyotlar için $w(T_i) = 1$ alınmıştır.

Ölçeklendirilen ivme kayıtları yatay tepki spektrumlarının bileşkeleri ve bu spektrumların aritmetik ortalamaları İED ve EED seviyeleri için sırasıyla Şekil 31 ve Şekil 32’de verilmiştir. Maksimum yön etkilerinin göz önüne alınabilmesi için ortalama spektrumlar, %30 arttırılmış ve arttırılmış spektrumların ölçeklendirme aralığında hedef spektrumun %10 altına düşmemesi esas alınarak elde edilen spektrumlar, İED ve EED seviyeleri için, sırasıyla Şekil 33 ve Şekil 34’te verilmiştir.

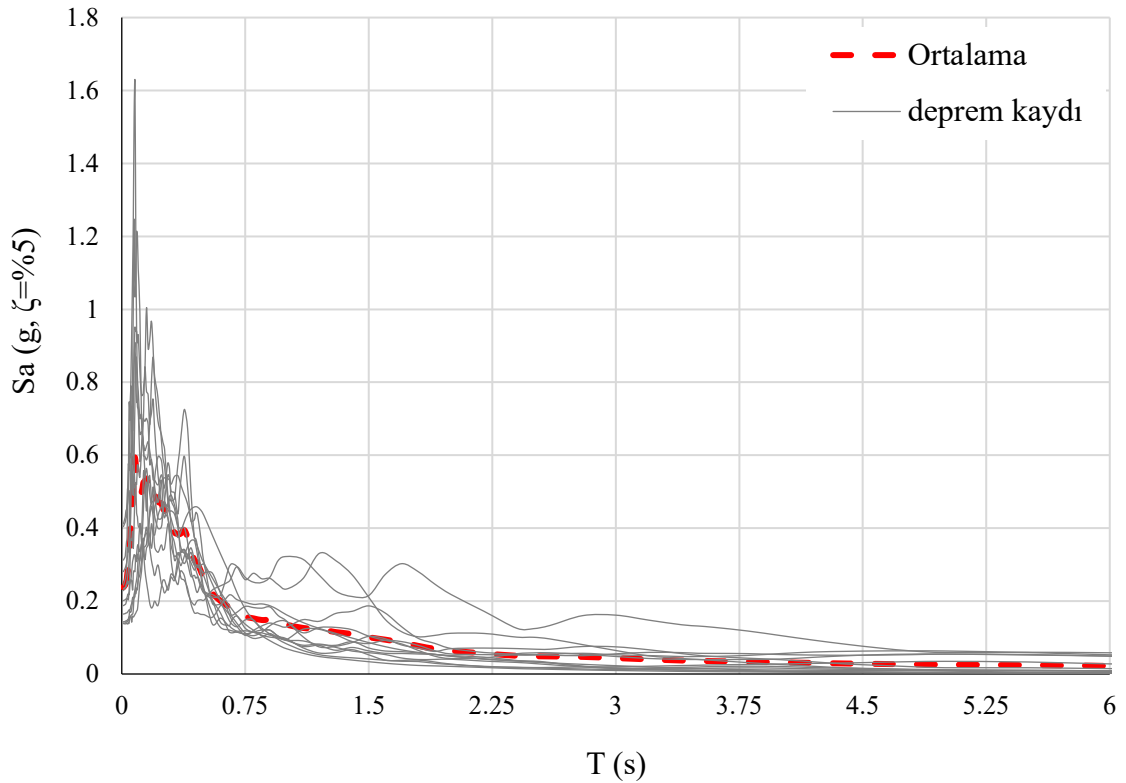
İED seviyesi analizlerinde sistemin sönüm oranı %5 ve EED seviyesi için ise %10 olarak dikkate alınmıştır [167]. Barajın ilk 15 modu dikkate alınarak Rayleigh sönüm metodu [124] ile kütle-orantılı ve rijitlik-orantılı katsayılar hesaplanmıştır. İED seviyesi için kütle-orantılı katsayı 0.6541 s^{-1} ve rijitlik-orantılı katsayı 0.0026 s olarak elde edilmiş olup EED seviyesi için ise bu değerler sırasıyla 1.3081 s^{-1} ve 0.0052 s olarak belirlenmiştir. Dikkate alınan deprem seviyelerine göre ölçeklenen ivme kayıtlarının her üç bileşeni de sonlu elemanlar modeline etki ettirilerek, her iki deprem seviyesi için toplam 26 adet lineer olmayan analiz yapılmıştır.

Analizler sonucunda İED seviyesinde baraj lineer davranış göstermiş ve baraj

gövdesinde hiçbir hasar oluşmamıştır. USACE rehberi [167], İED seviyesinde baraj gövdesinde, barajın normal işleyişini engellemeyecek sınırlı hasar oluşumuna izin vermektedir. İED seviyesi analiz sonuçlarının, USACE rehberinde [167] istenen davranış ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

EED seviyesindeki analizlerde kullanılan yer hareketi kayıtlarından sadece dört tanesi baraj gövdesinde hasar oluşturmuştur. Bunlardan RSN146 Coyote Lake, RSN225 Anza-01 ve RSN6212 Tottori_Japan deprem kayıtları barajın kret-orta bölgesinde az hasar oluştururken, RSN4083 Parkfield-02 deprem kaydının baraj gövdesinde orta hasar oluşturduğu gözlenmiştir. Hasar oluşturan bu deprem kayıtları ve baraj gövde betonunda oluşan hasarlar Şekil 35'te gösterilmiştir. USACE rehberi [167], EED seviyesinde oluşan hasarın, baraj gövdesi ve mansap güvenliğini tehlikeye atmayacak seviyede olmasına izin vermektedir. EED seviyesi analiz sonuçlarının, USACE rehberinde [167] istenen davranış ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

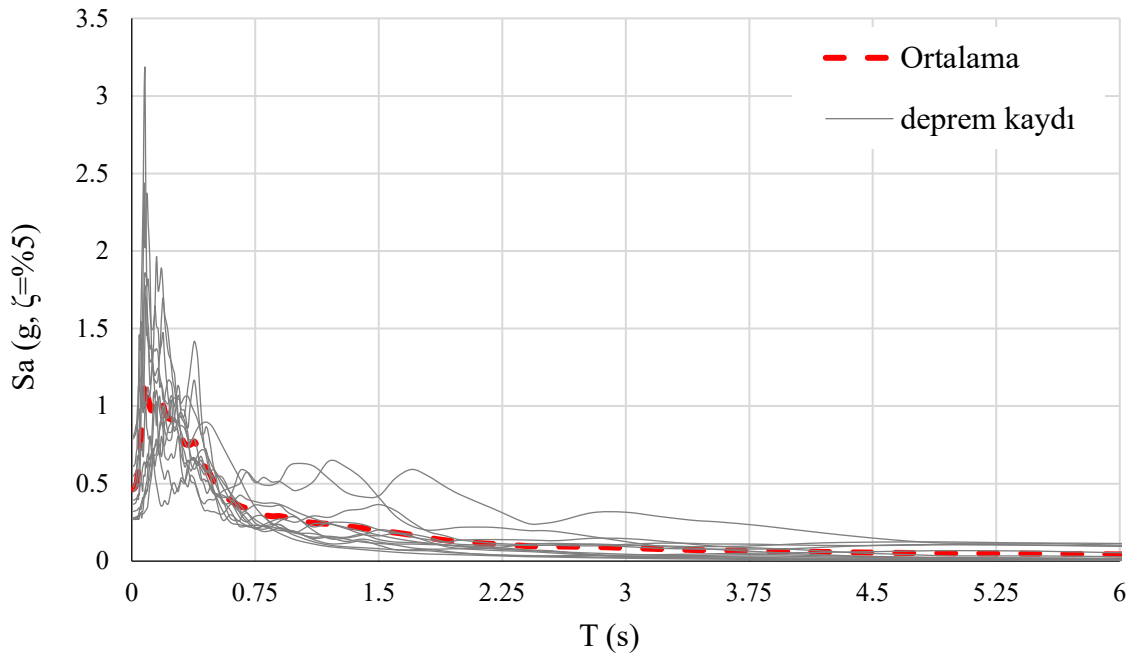
Kemer barajın sonlu elemanlar modeli ile İED ve EED seviyelerinde yapılan hasar analizi sonuçlarının, USACE rehberinde [167] istenen davranış ile uyumlu olması, baraj modelinin sismik yükler altında uygunluğunu göstermektedir.



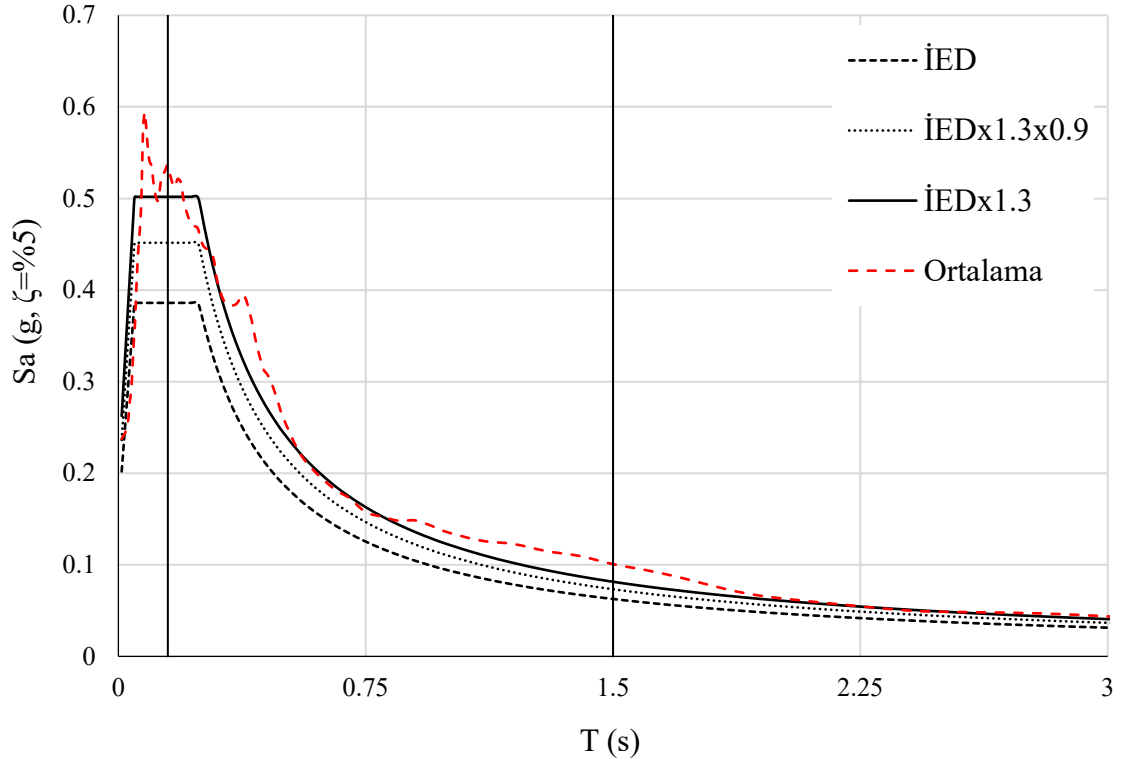
Şekil 31. Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının bileşke spektrumları ve ortalamaları (İED seviyesi)

Tablo 9. Seçilen deprem kayıtları

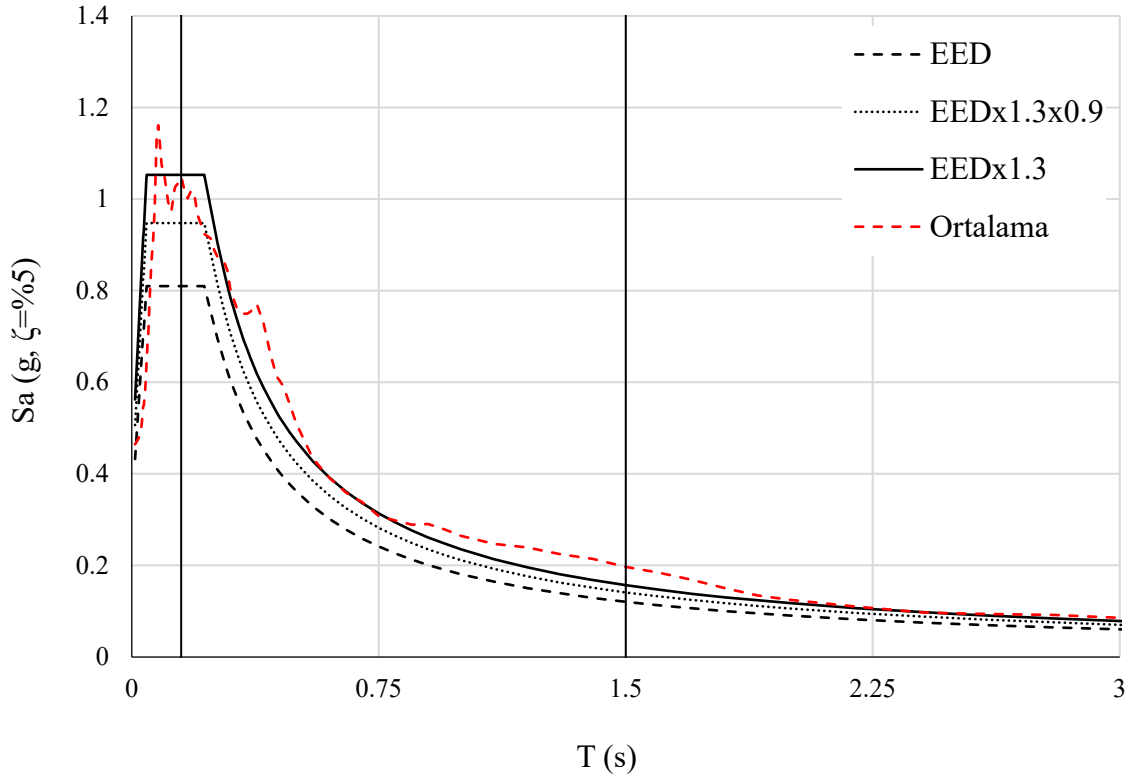
RSN	Deprem Adı	Yıl	İstasyon Adı	M _w	Rrup (km)	Vs30 (m/sn)
146	Coyote Lake	1979	Gilroy Array #1	5.74	11	1428
225	Anza (Horse Canyon)-01	1980	Anza - Pinyon Flat	5.19	17	725
454	Morgan Hill	1984	Gilroy-Gavilan Coll.	6.19	15	730
455	Morgan Hill	1984	Gilroy Array #1	6.19	15	1428
476	Morgan Hill	1984	UCSC Lick Observ.	6.19	45	714
1108	Kobe_Japan	1995	Kobe University	6.9	1	1043
2753	Chi-Chi_Taiwan-04	1999	CHY102	6.2	39	804
2919	Chi-Chi_Taiwan-04	1999	TTN025	6.2	69	705
2027	Chi-Chi_Taiwan-04	1999	TTN040	6.2	51	728
4083	Parkfield-02_CA	2004	Parkfield-Turkey Flat#1	6.0	5	907
6212	Tottori_Japan	2000	HRSH08	6.61	144	781
6231	Tottori_Japan	2000	HYG027	6.61	152	902
6372	Tottori_Japan	2000	SMN013	6.61	152	762



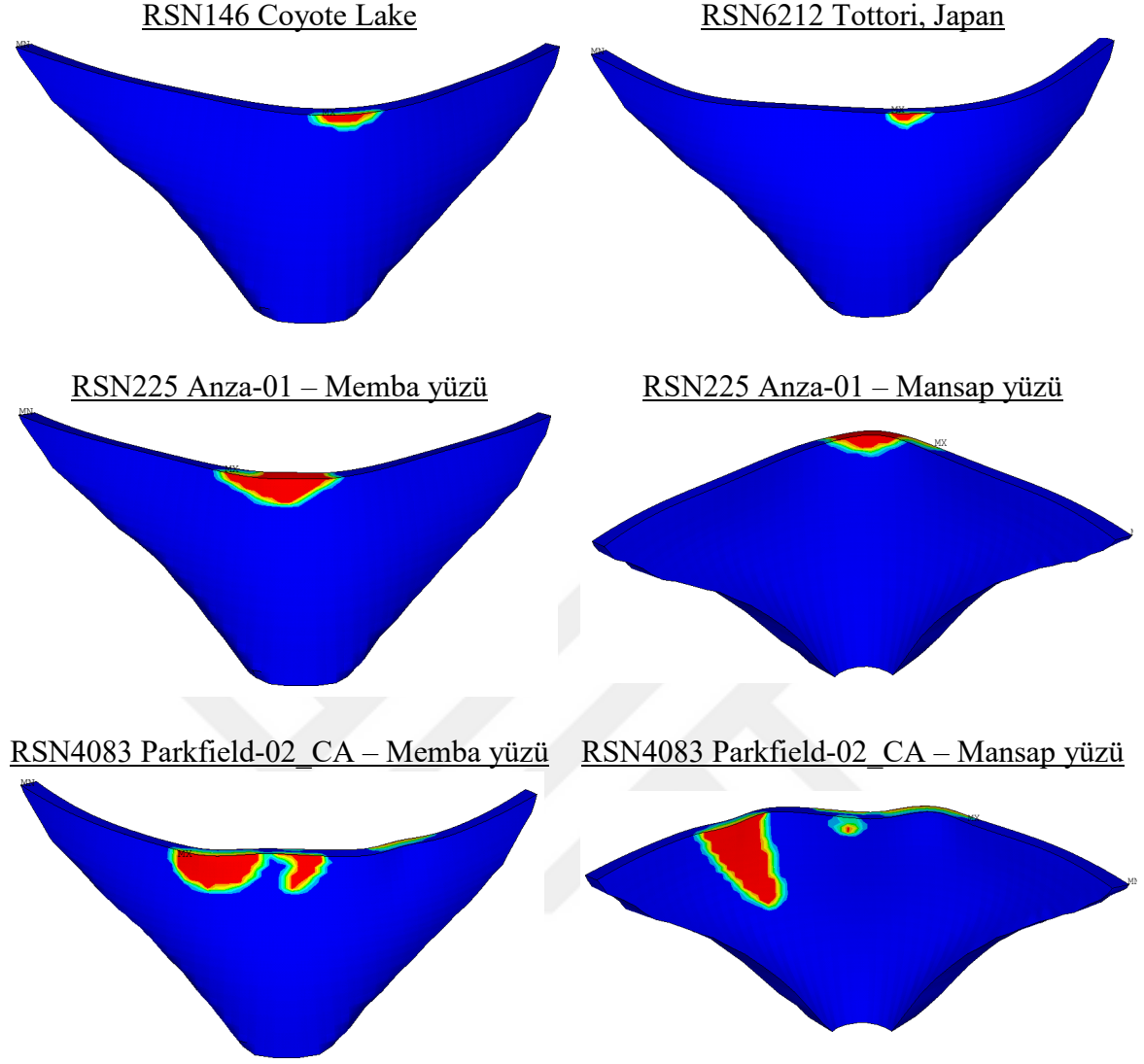
Şekil 32. Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının bileşke spektrumları ve ortalamaları (EED seviyesi)



Şekil 33. Hedef spektrum ve ortalama ivme spektrumunun karşılaştırılması (İED seviyesi)



Şekil 34. Hedef spektrum ve ortalama ivme spektrumunun karşılaştırılması (EED seviyesi)



Şekil 35. Baraj gövdesinde oluşan deprem hasarları

2.3. Beton Kemer Baraj İçin Sismik Kırılma Eğrisinin ÇSA Yöntemi ile Oluşturulması

Sismik kırılma eğrileri, yapıların belirli bir sismik şiddet etkisi (veya ŞÖ) altında maruz kalabilecekleri hasar seviyesini, olasılık olarak elde edilmesini sağlarlar. Beton ağırlık barajları genellikle, modelin daha basit olması ve az sayıda eleman bulunması amacıyla, iki boyutlu sonlu elemanlar modeli ile temsil edilebilmektedir. Bu durum kompleks ve zaman alıcı lineer olmayan analizlerden daha hızlı sonuç alınmasını sağlamaktadır. İki boyutlu modellerde, deprem yer hareketleri baraja sadece yatay yönde (memba-mansap) veya yatay ve düşey yön aynı anda etki ettirilerek analizler yapılır. Bu nedenle, analitik kırılma fonksiyonu parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemler bu tip barajlar için

kolayca uygulanabilmektedir. Ancak beton kemer barajlar hem yatayda hem de düşeyde eğriliğe sahip olduklarından sonlu elemanlar modeli üç boyutlu olarak oluşturulmalıdır.

ADA yöntemi ile kırılma eğrileri oluşturulurken, seçilen yer hareketleri, yapının hasar Limit Durumuna (LD) ulaşana kadar ölçeklenerek analizler yapılmalıdır. Bu durumda, yer hareketi ile kaç analizin yapılacağı önceden belirlenmemektedir. Fakat ÇSA yönteminde, deprem seviyeleri ve yer hareketi sayıları önceden belirlendiğinden, bu yöntem ile kırılma eğrileri oluşturulurken, yapılacak analiz sayısı belirlidir. Bu nedenle, ÇSA yöntemi kemer barajların sismik kırılma eğrileri oluşturulurken, ADA yöntemine göre avantaj sağlamaktadır.

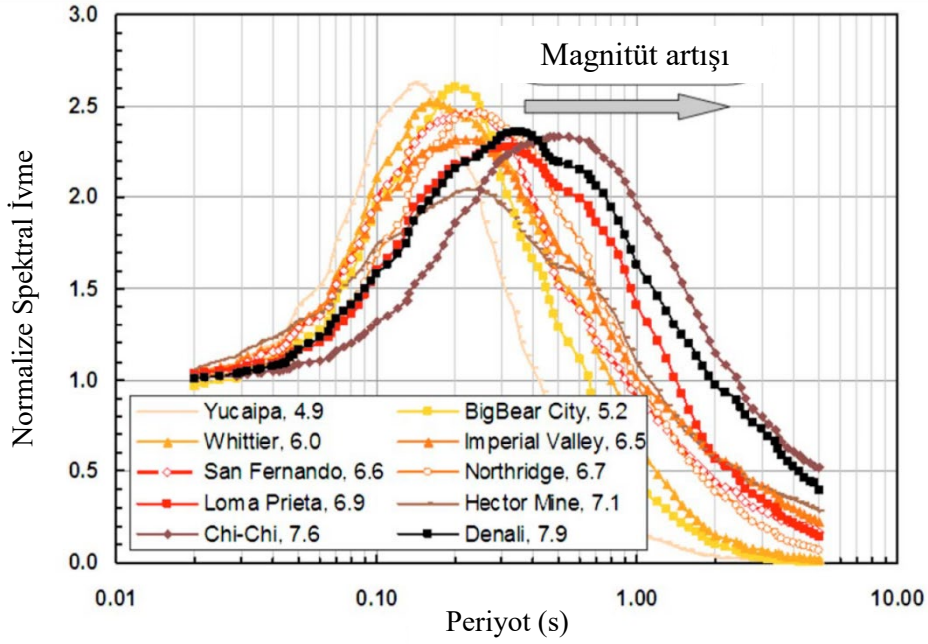
2.3.1. Kırılma Eğrileri İçin Yer Hareketlerinin Seçimi ve Ölçeklenmesi

Analitik kırılma eğrilerini elde etmek için ilk olarak yapının bulunduğu alanın depremsellik açısından incelenmesi gerekmektedir. Yapının önemine ve dolayısıyla servis ömrüne bağlı olarak en büyük deprem şiddeti (aşılma olasılığı ve tekrarlama periyodu) belirlenir [164]. En yaygın olarak kullanılan deprem yer hareketi şiddet ölçüleri (ŞÖ), en büyük yer ivmesi (PGA), en büyük yer hızı (PGV), spektral ivme (S_a) ve spektral hız (S_v)'dir.

Deprem yer hareketi ivme spektrumu, ivme kayıtlarının spektral özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılır. İvme spektrumu basitlik ve hesaplamalarındaki kolaylık nedeniyle, deprem mühendisliğinde, yapıların tasarım ve performans değerlendirmesinde kullanılan standart bir araç haline gelmiştir.

Şekil 36'de gösterildiği gibi depremin büyüklüğü (M_w) arttıkça, yer hareketi kaydının spektral şeklinin tepe noktası da daha yüksek periyodlara kaymaktadır [180]. Bu durum da deprem seviyesini temsil eden yer hareketlerinin özelliklerinin her seviyede değiştiğini göstermektedir. Bu nedenle ÇSA yönteminde farklı deprem seviyeleri için farklı deprem kayıtları göz önüne alınarak seçilmelidir [146]. Bu yaklaşım ile yer hareketlerinin spektral şekil etkileri kırılma eğrilerinde dikkate alınmaktadır [181, 182].

Beton kemer barajların sismik analizleri çoğunlukla deprem kayıtlarının üç bileşeninin etki ettirilmesi ile yapılır. Bunlar, nehir akış yönü (mamba-mansap), akışa dik yön ve düşey yöndür. Bu çalışmada, akış yönü en etkin bileşen olduğundan, baraj-rezervuar-temel etkileşim sisteminin ilk titreşim periyoduna ($T_1=0.75s$) karşılık gelen spektral ivme değeri ($S_a(T_1, \%5)$), şiddet ölçüsü (ŞÖ) olarak belirlenmiştir.



Şekil 36. Magnitüdü 4.9-7.9 arasında olan depremlerin ortalama spektral şekillerinin karşılaştırılması [180].

ÇSA yönteminde deprem kayıtları seçilmeden önce, belirlenen ŞÖ'ye göre deprem seviyesi sayısı belirlenmelidir. Bu çalışmada $S_a=0.1g$ 'den $0.1g$ artışlarla $0.5g$ 'ye kadar toplam beş seviye seçilmiştir. Deprem kayıtları bu beş seviye için belirli bir deprem senaryosuna göre PEER yer hareketi veri tabanından [178] seçilmiştir. Senaryoya göre bütün deprem seviyelerinde fay kırılma düzlemine olan uzaklık (R_{rup}), $15 < R_{rup} < 160km$ arasında belirlenmiştir.

PEER veri tabanında, $760 < V_{S30} < 1500m/s$ aralığında, yeterli yer hareketi bulunmaması nedeniyle V_{S30} aralığı $500 < V_{S30} < 1500m/s$ olarak genişletilmiştir. Depremin büyüklüğü (M_w) ise, Şekil 36'da verilen ilişkiye uygun olarak, Tablo 10'da gösterildiği gibi her seviyede artan aralıklarla belirlenmiştir. Her bir seviye için 12 adet deprem kaydı seçilmiş ve Tablo 11-15'te verilmiştir.

Her seviye için seçilen deprem ivme kayıtlarının yatay bileşenlerinin tepki spektrumları oluşturulmuştur. Bu tepki spektrumlarının bileşkeleri, karelerinin toplamının karekökleri (KTK) yöntemi ile elde edilmiştir. Bileşke spektrumların $T_1 = 0.75s$ 'deki spektral ivme (S_a) değerleri seçilen seviyenin S_a değerine ölçeklenmiştir. Örneğin, birinci seviye için seçilen deprem kayıtlarının bileşke tepki spektrumlarının $T_1 = 0.75s$ 'deki S_a değerleri $0.1g$ 'ye ölçeklenmiştir. Ölçeklenen bileşke spektrumlar ve aritmetik ortalamaları Şekil 37 - Şekil 41'de gösterilmiştir. Bütün seviyelerin ortalama spektrumlarının

karşılaştırılması Şekil 42’de ve bu ortalamaların normalize edilmiş gösterimi Şekil 43’te verilmiştir. Bu iki şekilde görüldüğü gibi M_w arttıkça, maksimum spektral ivme değerinin periyodu yüksek değerlere doğru kaymaktadır. Bu durum Graizer ve Kalkan [180] çalışması ile paralellik göstermektedir.

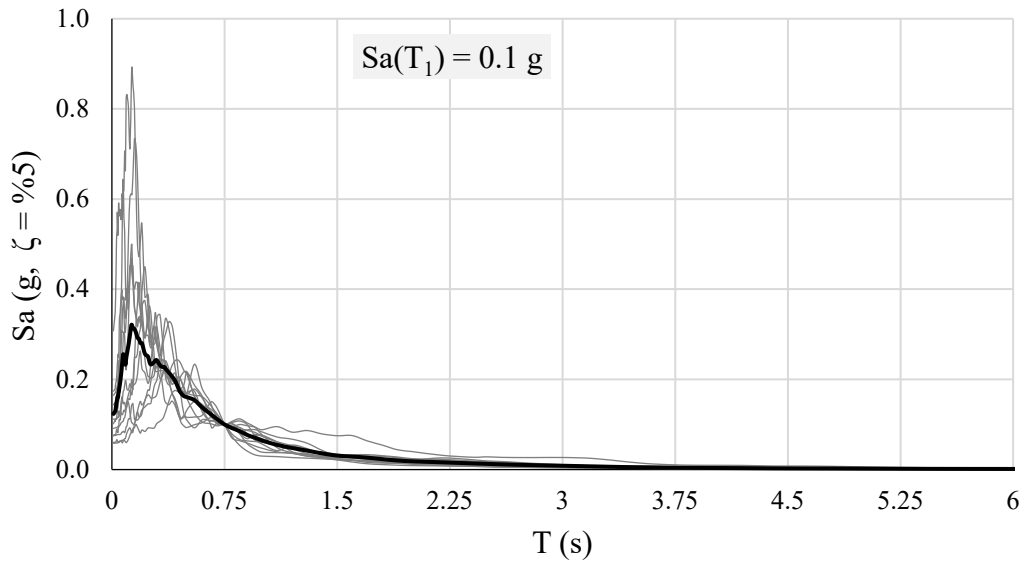
Tablo 10. Deprem seviyesi ile M_w ilişkisi

$S_a(T_1)$ (g)	M_w
0.1	5.8 – 6.1
0.2	6.1 – 6.2
0.3	6.3 – 6.6
0.4	6.6 – 7.1
0.5	7.1 – 8.0

Bu yöntemde diğer önemli bir husus da seçilen kayıtların üç boyutlu baraj-rezervuar-temel etkileşim sistemine nasıl etki ettirileceğidir. Yer hareketinin yatay bileşenlerinden $S_a(T_1=0.75s)$ değeri büyük olan kayıt tek periyotta spektral ivme ölçeklendirme yaklaşımı ile ölçeklendirilmiş ve akış yönüne uygulanmıştır. Aynı ölçeklendirme katsayısı diğer yatay ve düşey yön ivme kayıtlarına da uygulanarak model üç bileşenli yer hareketlerine maruz bırakılmıştır.

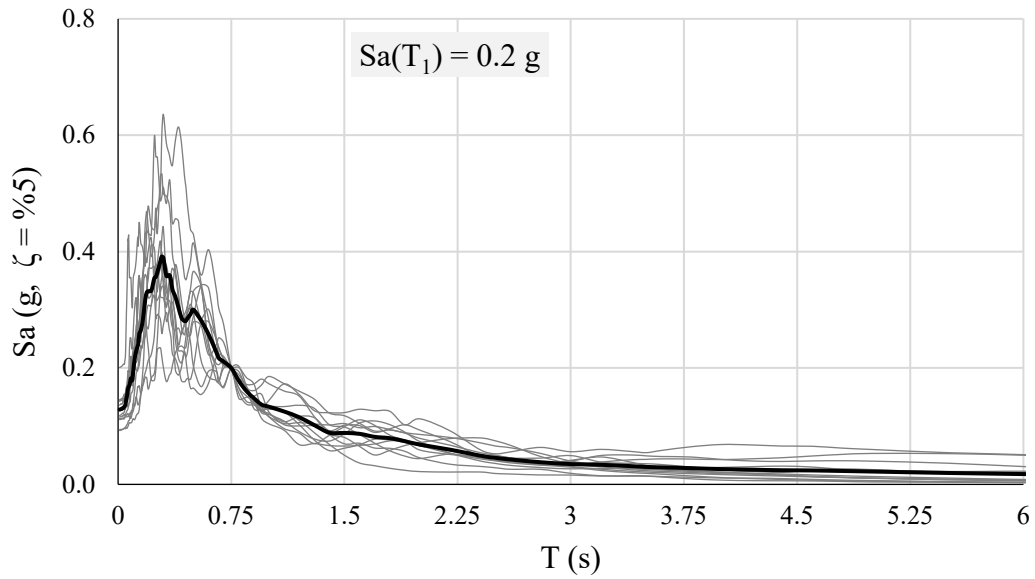
Tablo 11. $Sa(T_1) = 0.1$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri

Deprem Dizin No	Deprem	M_w	Fay Mekanizması	R_{rup} (km)	V_{S30} (m/s)
216	Livermore-01	5.8	Doğrulu atımlı	54	650
511	N. Palm Springs	6.06	Oblik atımlı ters	38	680
536	N. Palm Springs	6.06	Oblik atımlı ters	39	679
643	Whittier Narrows-01	5.99	Oblik atımlı ters	28	1223
680	Whittier Narrows-01	5.99	Oblik atımlı ters	18	969
2172	Chi-Chi_Taiwan-02	5.9	Eğim atımlı ters	70	665
2185	Chi-Chi_Taiwan-02	5.9	Eğim atımlı ters	100	603
2198	Chi-Chi_Taiwan-02	5.9	Eğim atımlı ters	70	665
2207	Chi-Chi_Taiwan-02	5.9	Eğim atımlı ters	80	804
2451	Chi-Chi_Taiwan-02	5.9	Eğim atımlı ters	75	665
4284	Basso Tirreno_Italy	6.0	Doğrulu atımlı	20	621
8168	Parkfield-02_CA	6.0	Doğrulu atımlı	78	1100

Şekil 37. $Sa(T_1) = 0.1$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri

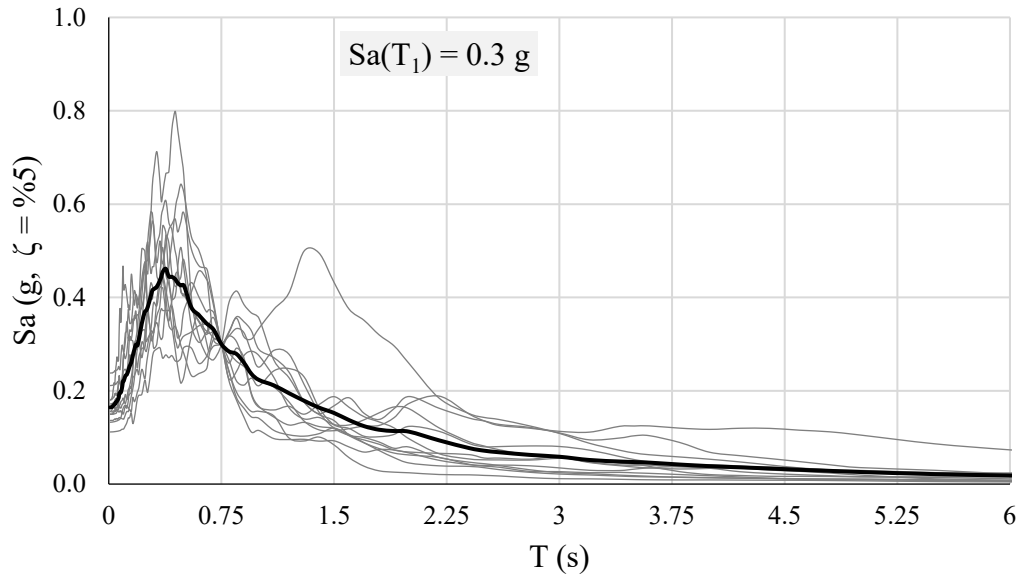
Tablo 12. $Sa(T_1) = 0.2$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri

Deprem Dizin No	Deprem	M_w	Fay Mekanizması	R_{rup} (km)	V_{s30} (m/s)
296	Irpina_Italy_02	6.2	Normal	20	650
2483	Chi-Chi_Taiwan-03	6.2	Ters	79	603
2759	Chi-Chi_Taiwan-04	6.2	Doğrultu atımlı	66	789
2777	Chi-Chi_Taiwan-04	6.2	Doğrultu atımlı	85	614
2786	Chi-Chi_Taiwan-04	6.2	Doğrultu atımlı	48	643
2924	Chi-Chi_Taiwan-04	6.2	Doğrultu atımlı	61	734
2966	Chi-Chi_Taiwan-05	6.2	Ters	95	603
3025	Chi-Chi_Taiwan-05	6.2	Ters	41	643
3053	Chi-Chi_Taiwan-05	6.2	Ters	117	783
3133	Chi-Chi_Taiwan-05	6.2	Ters	155	631
3134	Chi-Chi_Taiwan-05	6.2	Ters	151	663
3135	Chi-Chi_Taiwan-03	6.2	Ters	132	808

Şekil 38. $Sa(T_1) = 0.2$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri

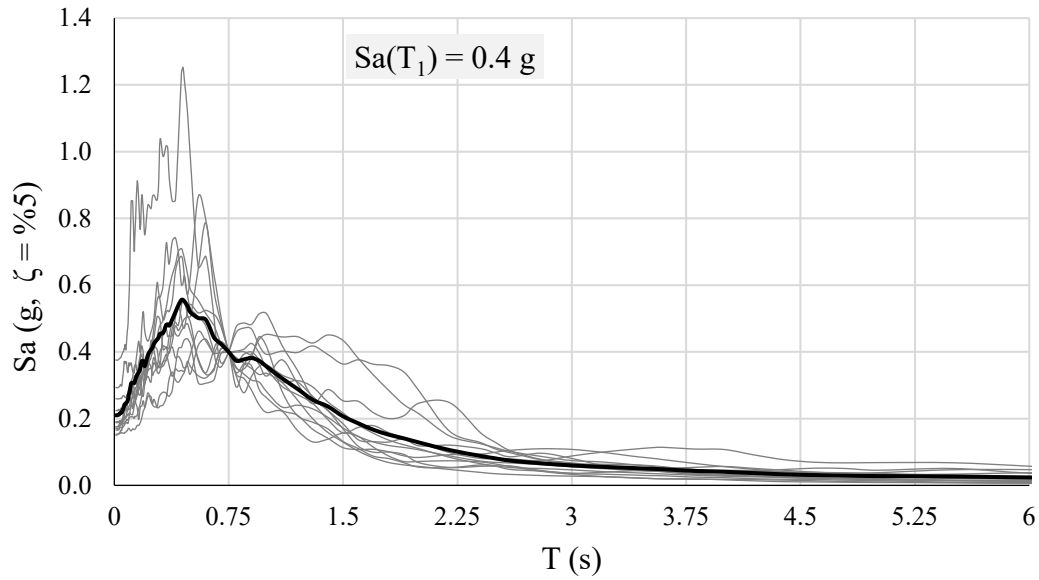
Tablo 13. $Sa(T_1) = 0.3$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri

Deprem Dizin No	Deprem	M_w	Fay Mekanizması	R_{rup} (km)	V_{S30} (m/s)
369	Coalinga-01	6.36	Ters	27	648
427	Taiwan SMART1(25)	6.5	Ters	92	672
3292	Chi-Chi_Taiwan-06	6.3	Ters	83	603
3355	Chi-Chi_Taiwan-06	6.3	Ters	60	618
3430	Chi-Chi_Taiwan-06	6.3	Ters	119	888
3440	Chi-Chi_Taiwan-06	6.3	Ters	104	607
3479	Chi-Chi_Taiwan-06	6.3	Ters	83	1000
3516	Chi-Chi_Taiwan-06	6.3	Ters	90	667
4468	L'Aquila_Italy	6.3	Normal	90	630
4470	L'Aquila_Italy	6.3	Normal	109	638
4485	L'Aquila_Italy	6.3	Normal	36	650
8167	San Simeon_CA	6.52	Ters	38	1100

Şekil 39. $Sa(T_1) = 0.3$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri

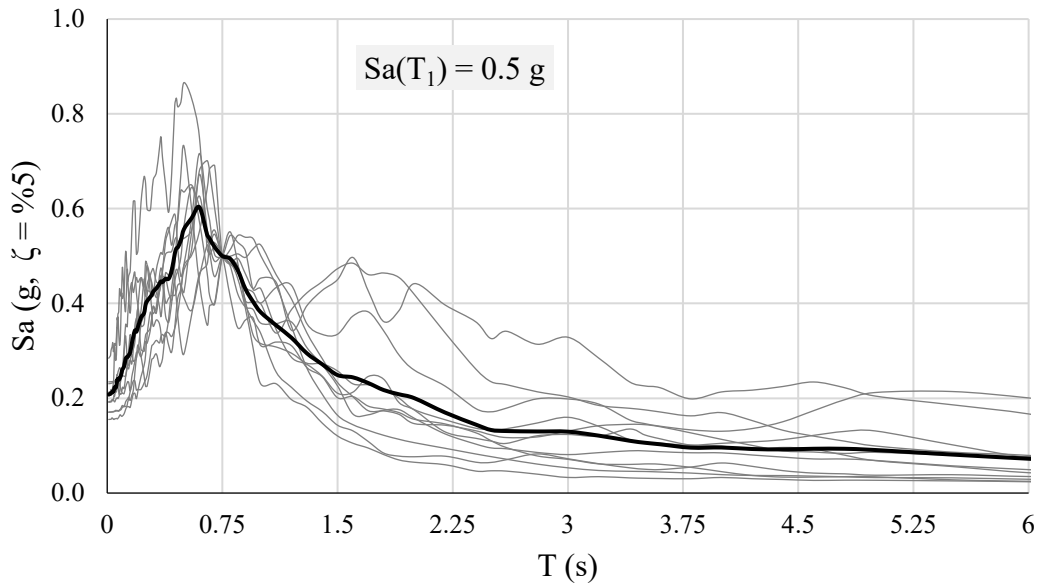
Tablo 14. $Sa(T_1) = 0.4$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri

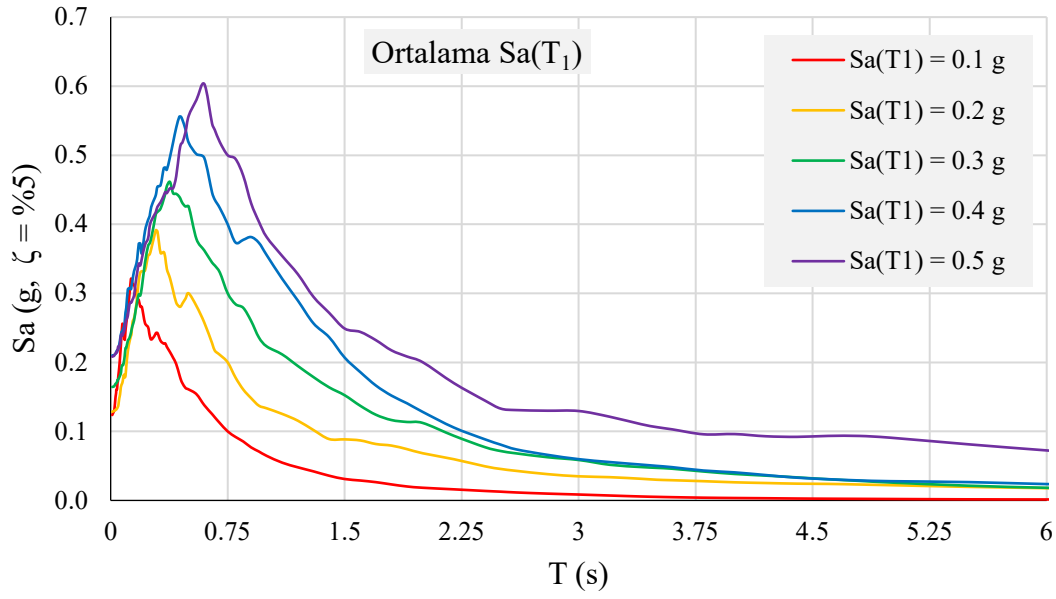
Deprem Dizin No	Deprem	M_w	Fay Mekanizması	R_{rup} (km)	V_{s30} (m/s)
748	Loma Prieta	6.93	Oblik atımlı ters	44	628
771	Loma Prieta	6.93	Oblik atımlı ters	80	584
789	Loma Prieta	6.93	Oblik atımlı ters	83	1316
796	Loma Prieta	6.93	Oblik atımlı ters	77	594
989	Northridge-01	6.69	Ters	20	740
1096	Northridge-01	6.69	Ters	65	663
4893	Chuetsu-oki_Japan	6.8	Ters	64	562
5072	Chuetsu-oki_Japan	6.8	Ters	107	589
5204	Chuetsu-oki_Japan	6.8	Ters	127	525
5313	Chuetsu-oki_Japan	6.8	Ters	145	913
5681	Iwante_Japan	6.9	Ters	34	593
6922	Darfield_New Zealand	7.0	Doğrulu atımlı	95	511

Şekil 40. $Sa(T_1) = 0.4$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri

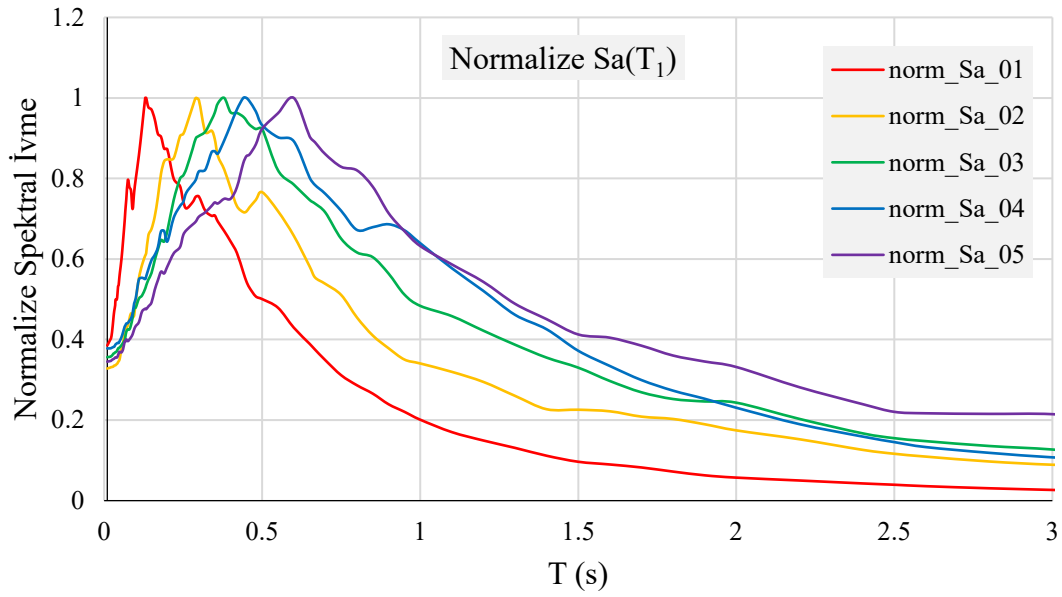
Tablo 15. $Sa(T_1) = 0.5$ g seviyesi için seçilen deprem kayıtları ve özellikleri

Deprem Dizin No	Deprem	M_w	Fay Mekanizması	R_{rup} (km)	V_{s30} (m/s)
1159	Kocaeli_Turkey	7.51	Doğrulu atımlı	142	585
1234	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	28	665
1268	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	51	578
1321	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	77	573
1322	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	68	672
1341	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	116	677
1352	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	114	914
1434	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	108	573
1439	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	121	631
1518	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	58	1000
1572	Chi-Chi_Taiwan	7.62	Oblik atımlı ters	74	573
5842	El Mayor-Cucapah_Mexico	7.2	Doğrulu atımlı	58	585

Şekil 41. $Sa(T_1) = 0.5$ g seviyesi için seçilen yer hareketlerinin spektral ivme grafikleri



Şekil 42. Ortalama spektral ivme grafikleri



Şekil 43. Normalize edilmiş ortalama spektral ivme grafikleri

2.3.2. Yer Hareketi Parametreleri ile Hasar İlişki

Yapıların dinamik yükler altında davranışını doğru ve hızlı tahmin etmek, inşaat mühendisliğinin önemli amaçlarından birisidir. Beton baraj yapılarının karmaşıklığı nedeniyle, çok sayıda hesaplama ile yapısal performansın, zamanında elde edilmesi zordur.

Yapıların sismik performansı değerlendirilirken lineer ve lineer olmayan analizler sonucunda mühendislik talep parametreleri (MTP) veya hasar indeksleri (Hİ) incelenir. Baraj türü yapılar için bunlar genellikle tepe deplasmanı, baraj gövdesinde oluşan gerilme, birim şekil değiştirme ve hasardır (veya çatlak).

Yapılarda meydana gelen deplasman ve görece kat ötelenmesi gibi MTP parametreleri ile yer hareketlerinin PGA, PGV gibi ŞÖ değerleri arasındaki ilişki genellikle lineer regresyon yapılarak incelenir [92]. Lineer regresyon modeli, bağımlı bir değişken (MTP) ile bağımsız bir değişkenin (ŞÖ) arasındaki ilişkiyi tanımlar ve bu durum denklem (53)'de gösterilmiştir.

$$MTP = \hat{a} \cdot \text{ŞÖ} + \hat{b} \quad (53)$$

Burada \hat{a} ve \hat{b} regresyon katsayılarıdır. Regresyon modelinin performans ölçütü olarak R^2 değeri kullanılmaktadır. Bu değer yüksek olması tahmin ilişkisinin iyi olduğunu gösterir ve denklem (54) ile hesaplanır.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{R}_i - \bar{R})^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (54)$$

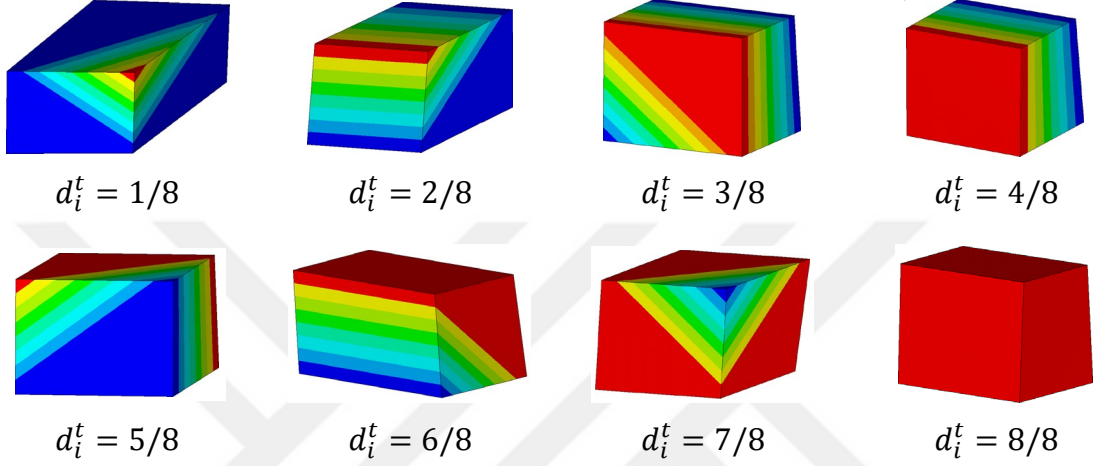
Burada R_i , \hat{R}_i ve \bar{R} sırasıyla orijinal, regresyon ve ortalama tepki değerleridir.

Bu çalışmada, 5 deprem şiddet seviyesi için seçilen toplam 60 yer hareketi baraj sonlu elemanlar modeline etki ettirilerek lineer olmayan analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda MTP olarak en büyük kret deplasmanı (δ^{kret}) ve hasar indeksi (Hİ) olarak da baraj gövdesinde oluşan Hasar Hacmi Oranı (HHO) kullanılmaktadır. HHO denklem (55)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [108, 183, 184].

$$HHO(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} d_i^t V_i}{\sum_{i=1}^{i=N} V_i} \times 100 \quad (55)$$

Burada i , N , d_i^t , ve V_i sırasıyla, sonlu elemanlar modelindeki i 'inci elemanı, toplam eleman

sayısını, elemanda oluşan hasar katsayısını ve i 'inci elemanın hacmini temsil etmektedir. Yani burada baraj gövdesinde oluşan toplam hasar hacmi, baraj gövdesinin toplam hacmine bölünerek bir oran elde edilmektedir. Elemanda oluşan hasar katsayısı, d_i^t , elemanın hasar gören düğüm noktası bölü sekiz olarak hesaplanmaktadır. Bir sonlu elemanda oluşan hasar katsayısının elemanlar üzerinde örnek gösterimi Şekil 44'te verilmiştir.



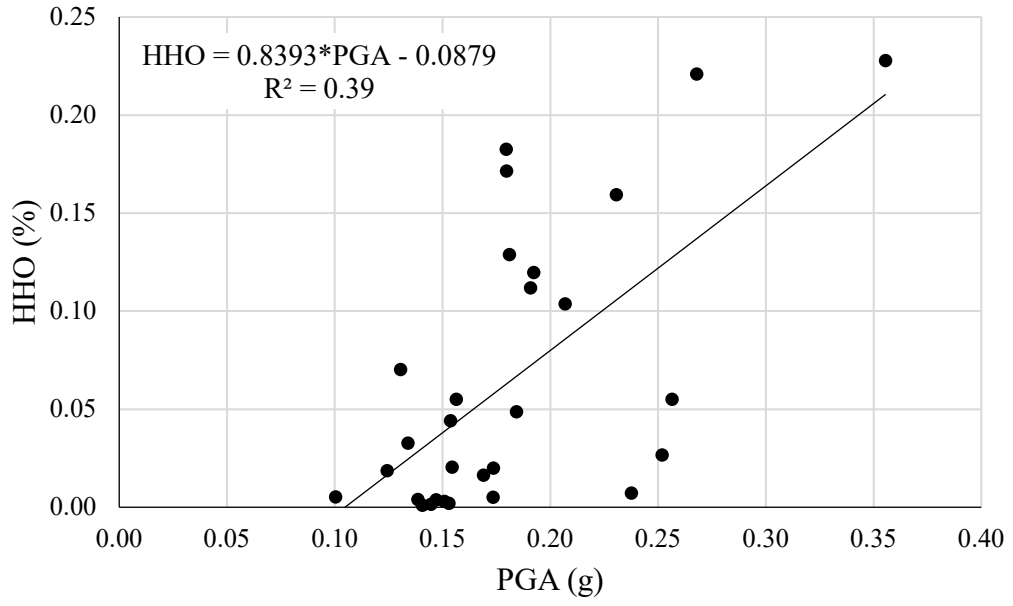
Şekil 44. Sonlu elemanda oluşan hasar katsayıları

Yer hareketi parametresi (ŞÖ) olarak, en büyük yer hareketi ivmesi PGA, en büyük yer hareketi hızı PGV ve ivme spektrum şiddeti ASI alınmıştır. Bu parametrelerin, MTP ve Hİ ile olan ilişkileri ve R^2 değerleri Şekil 45-50'de gösterilmiştir. Ayrıca HHO – δ^{kret} ilişkisi de Şekil 51'te verilmiştir. Bu şekillerde, 60 adet yer hareketinden sadece baraj gövdesinde hasar oluşturan yer hareketleri dikkate alınmıştır. Hasar oluşturmeyen analiz sonuçlarının, en büyük kret deplasman değerleri dikkate alınmamıştır.

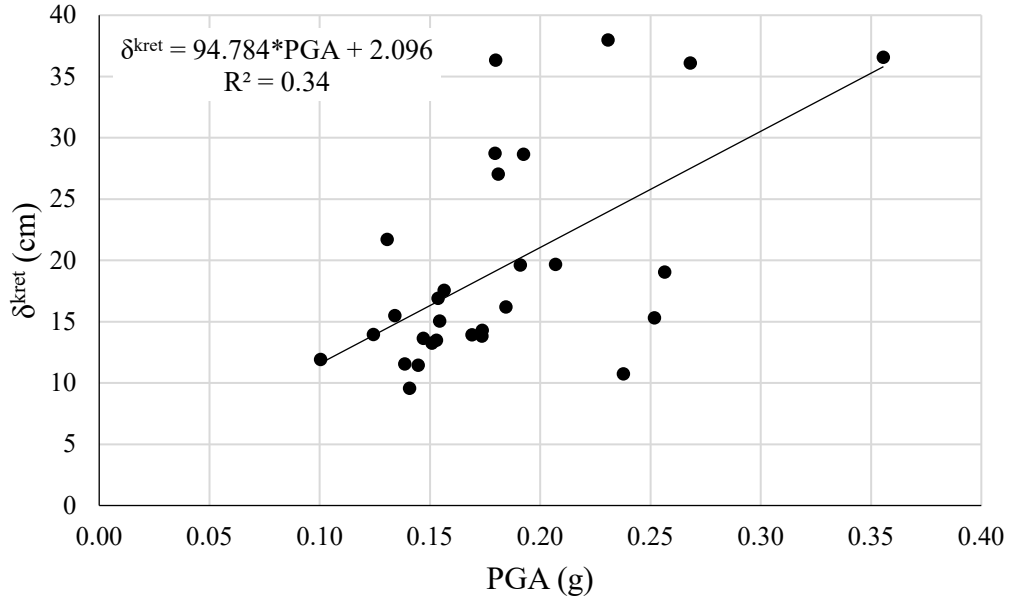
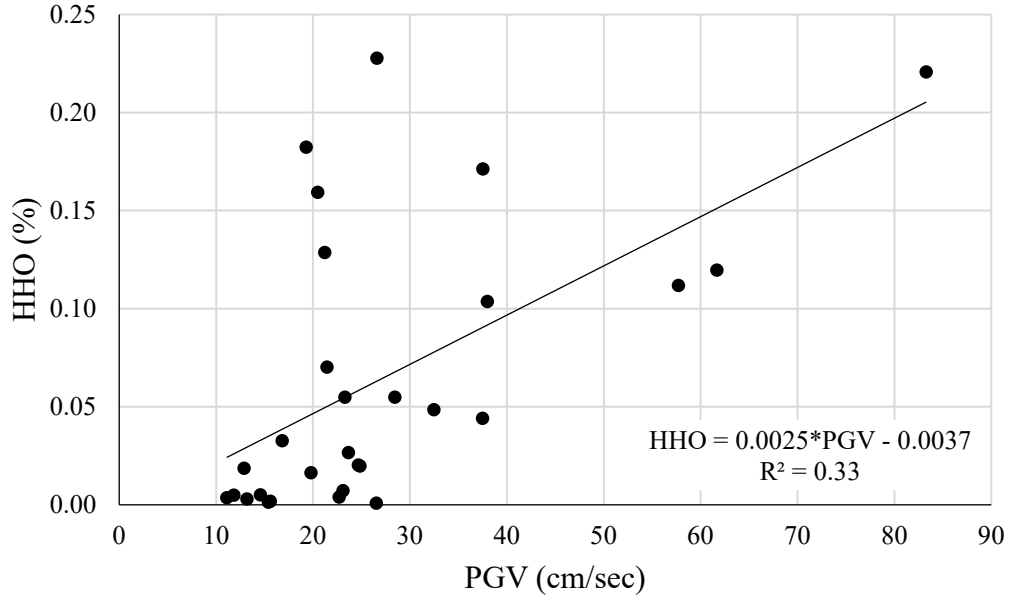
Bu şekiller incelendiğinde en yüksek korelasyon, $R^2 = 0.39$ olarak, PGA ile kret deplasmanı arasında elde edilmiştir. Ancak elde edilen $R^2 = 0.39$ değeri mühendislik açısından küçük bir değerdir. Hariri-Ardebili vd. [91] bir beton kemer baraj üzerinde aynı ilişki için R^2 değerini 0.63 olarak belirlemiştir. Ancak Hariri-Ardebili vd. [91] çalışmasında, bu tez çalışmasından farklı olarak, lineer analiz sonuçlarını kullanmıştır. Liang vd. [93] çalışmasında DDA yöntemini kullanılmış ve bu yöntemde kullanılan DDA fonksiyonları yapay olarak üretildiğinden $R^2=0.81$ gibi görece yüksek bir korelasyon değeri elde edilmiştir. Ayrıca bu tez çalışması kapsamında dikkate alınan yer hareketi parametrelerinden ASI ve PGV'nin, kemer barajların sismik davranışı ile doğrudan bir korelasyonlarının olmadığı gösterilmiştir.

Şekil 51’de HHO – δ^{kret} ilişkisi gösterilmiştir. Bu ilişkide elde edilen $R^2 = 0.91$ değeri, kullanılan malzeme modelinin ve baraj davranışının uyumlu olduğunu göstermektedir. Çünkü baraj gövdesinde hasar arttıkça, barajın rijitliği azalır ve buna bağlı olarak yatay deplasman artar.

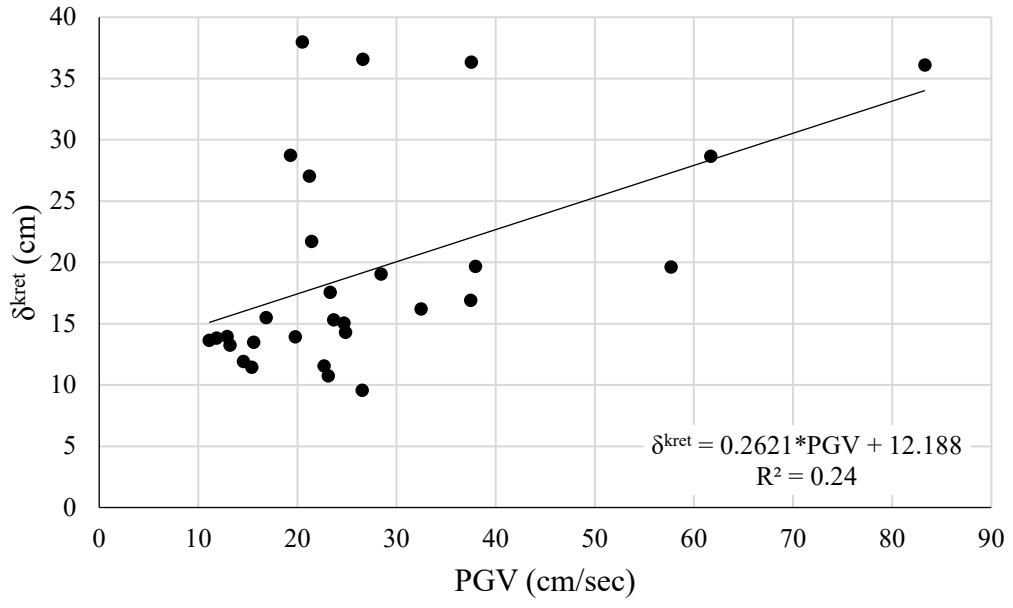
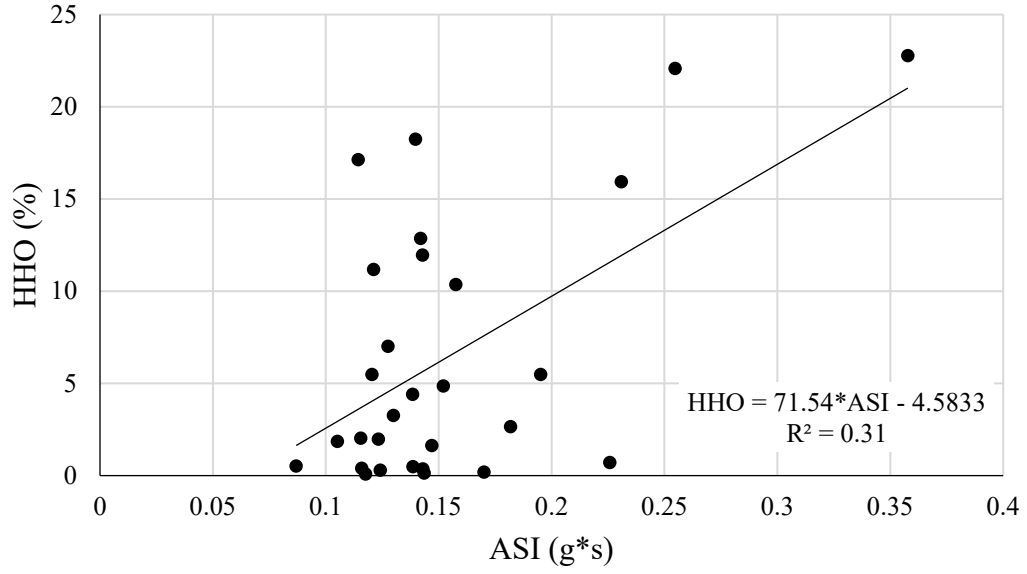
Bu çalışmada, yer hareketi ŞÖ parametreleri ile kemer barajın MTP ve Hİ tepkileri arasındaki ilişkinin, kemer barajın karmaşık lineer olmayan davranışı nedeniyle, tek başına kullanılabilecek yeterli düzeyde olmadığı gösterilmiştir.



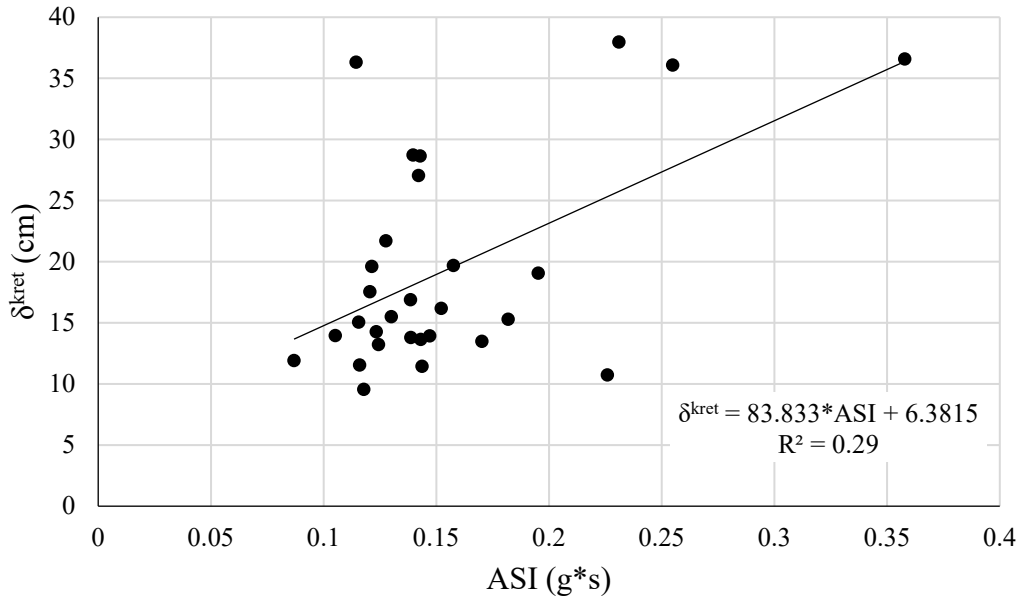
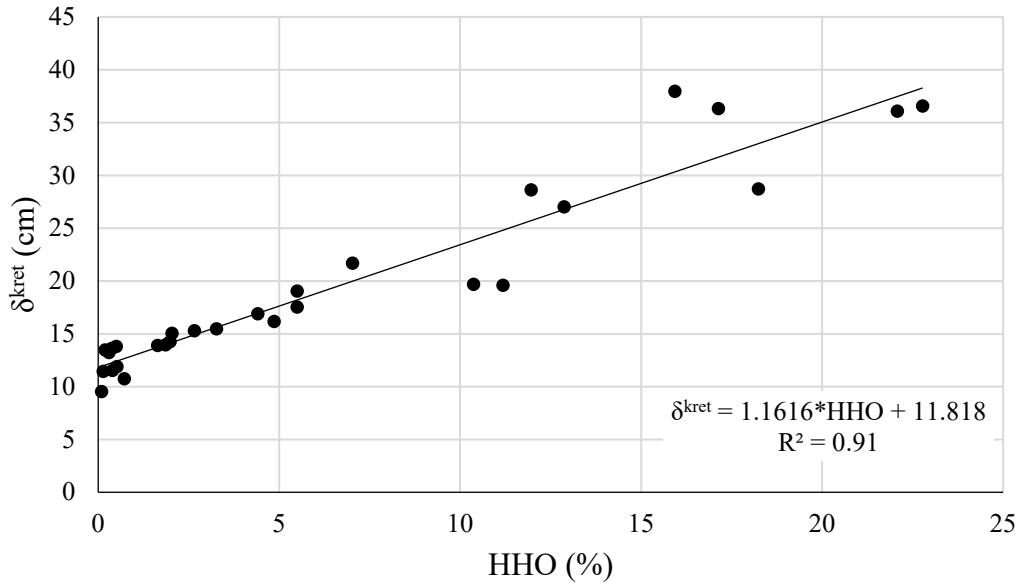
Şekil 45. PGA - HHO ilişkisi

Şekil 46. PGA – δ_{kret} ilişkisi

Şekil 47. PGV - HHO ilişkisi

Şekil 48. PGV - δ^{kret} ilişkisi

Şekil 49. ASI - HHO ilişkisi

Şekil 50. ASI - δ^{kret} ilişkisiŞekil 51. HHO - δ^{kret} ilişkisi

2.3.3. Kırılgnlık Eğrisi Analizleri ve Sonuçlar

Uygulama örneği olan beton kemer barajının sismik kırılgnlık eğrilerini, ÇSA yöntemi ile elde etmek için doğrusal olmayan analiz sonuçları kullanılmıştır. Sonlu elemanın herhangi bir yönünde oluşan en büyük asal çekme gerilmesinin, betonun çekme gerilmesi

dayanımını aştığında sonlu elemanda hasar oluşmaktadır. Analizler sonucunda baraj gövdesinde oluşan toplam hasarı tanımlamak için hasar indeksi (HI) olarak Hasarlı Hacim Oranı (HHO) seçilmiştir.

Alembagher ve Ghemian [115] ADA yönteminde, kemer barajın derzlerinin açılmasını ve barajın tepe deplasmanını MTP olarak almışlardır.

Mirzabozorg vd. [106] ADA yöntemini kullanarak kemer barajın kırılma eğrilerini oluşturmuşlardır. Bu eğrilerde, MTP olarak baraj gövdesinde oluşan çekme gerilmesinin aşıldığı alanı (overstressed area) almışlardır ve bu durum barajın memba ve mansap yüzeyleri için ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Çalışmalarında, barajın hemen kullanım seviyesindeki sınır değerleri memba yüzeyi için %12 ve mansap yüzeyi için %16 alınmıştır. Kontrollü hasar seviyesindeki sınır değerleri memba yüzeyi için %30 ve mansap yüzeyi için %36 alınmıştır.

Literatür incelendiğinde, kemer barajların Limit Durumları (LD) için kesin bir değer bulunmamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında örnek beton kemer baraj için iki adet LD ve üç farklı performans seviyesi (hafif, orta ve ağır hasar) belirlenmiştir. Bu hasar seviyelerinin detaylı açıklaması Tablo 16'da verilmiştir. Bu hasar seviyeleri arasındaki sınır değerler %8 ve %18 olarak belirlenmiştir.

$0 < HHO < 8$	Hafif Hasar Bölgesi
$8 \leq HHO < 18$	Orta Hasar Bölgesi
$18 \leq HHO$	Ağır Hasar Bölgesi

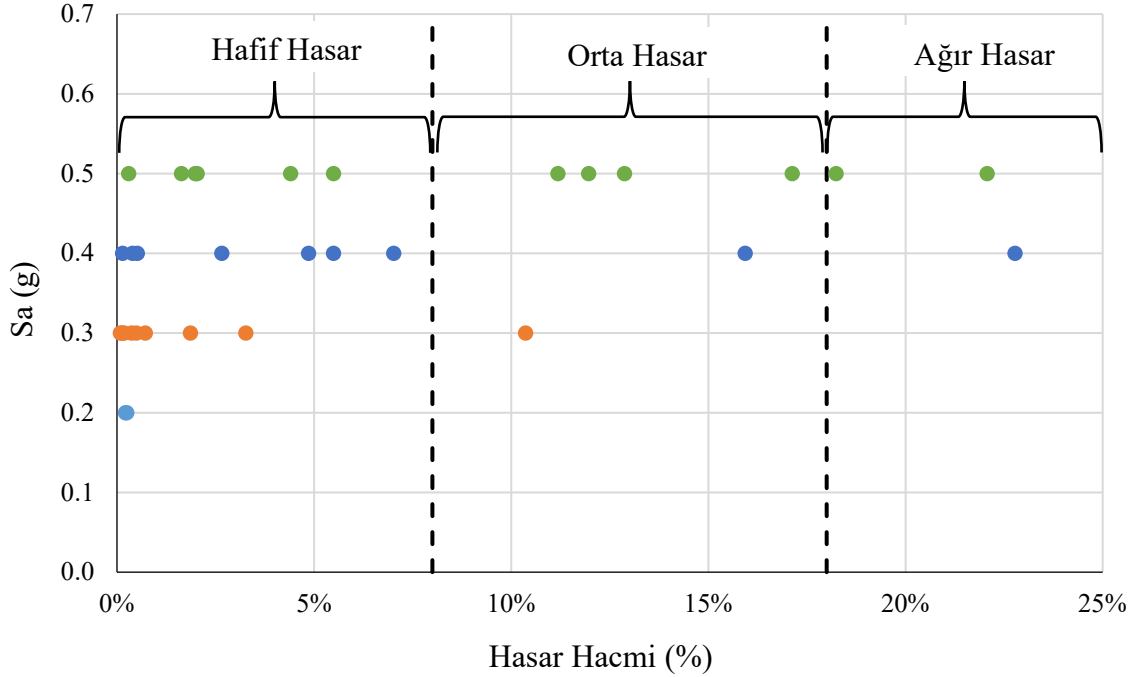
Tablo 16. Hasar seviyeleri ve açıklamaları [116].

Limit Durum	Açıklama
Hafif Hasar	Sınırlı seviyede hasar (çatlak) oluşabilir fakat bu hasar barajın normal işleyişini engellemeyecek seviyede kalmalı ve süratli bir şekilde tamir edilebilmelidir
Orta Hasar	Oluşacak yıkım, kırılma, kopma, göçme, rezervuar boşalması gibi hasarlar baraj gövdesi ve mansap güvenliğini tehlikeye atmamalıdır
Ağır Hasar	Kırılma, kopma ve kontrolsüz rezervuar boşalması meydana gelebilir ve insan yaşamını tehlikeye atabilir.

Her deprem şiddet seviye için 12 adet deprem yer hareketi kaydı kullanılarak toplam 60 adet lineer olmayan analiz yapılmıştır. Analiz sonuçlarında, $S_a(T_1)=0.1g$ deprem şiddet

seviyesinde baraj gövdesinde hiçbir hasar oluşmamıştır. Bu şiddet seviyesi İED düzeyinde $S(T_1)=0.17$ g olan seviyenin altındadır ve bu seviyede hasar meydana gelmemesi kırılgnlık eğrilerinin oluşturulmasında, $S(T_1)=0.1$ g seviyesinin ilk deprem düzeyi olarak seçilmesinin uygun olduğunu göstermektedir. Diğer seviyelerde oluşan hasar miktarları HHO olarak Tablo 17’de ve grafik olarak Şekil 52’de verilmiştir.

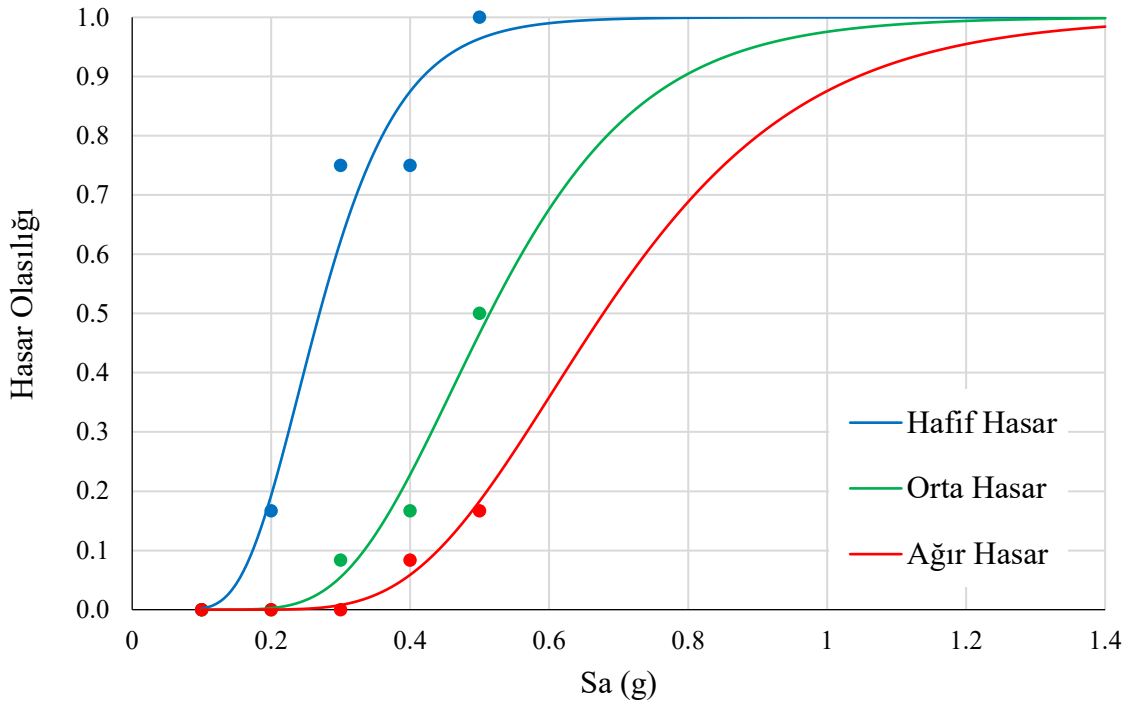
Analizler sonucunda elde edilen hasar miktarları ve belirlenen LD kullanılarak, Baker [146] tarafından önerilen ÇSA yöntemi ile kırılgnlık eğrisi parametreleri olan medyan $\hat{\theta}_d$ ve şiddet ölçüsünün standart sapması $\hat{\beta}_d$ tahmin edilmiştir. Bu işlemler, Baker [185] tarafından oluşturulan Excel dosyası yardımı ile yapılmış olup, Excel dosyalarında kullanılan ve hesaplanan veriler hafif, orta ve ağır hasar performans seviyeleri için sırayla Tablo 18, Tablo 19 ve Tablo 20’de verilmiştir. Hesaplanan bu $\hat{\theta}_d$ ve $\hat{\beta}_d$ değerleri kullanılarak, kemer baraj için üç farklı performans seviyesinde sismik kırılgnlık eğrileri oluşturulmuş ve Şekil 53’te gösterilmiştir.



Şekil 52. Deprem kayıtlarının barajda oluşturdukları hasar miktarları

Tablo 17. Deprem kayıtlarının barajda oluşturdukları hasar miktarları

RSN	Deprem	Sa(T ₁) (g)	HHO (%)
2924	Chi-Chi_Taiwan-04	0.2	0.25
2966	Chi-Chi_Taiwan-05	0.2	0.22
427	Taiwan SMART1(25)	0.3	3.27
3292	Chi-Chi_Taiwan-06	0.3	0.50
3355	Chi-Chi_Taiwan-06	0.3	0.37
3430	Chi-Chi_Taiwan-06	0.3	1.86
3440	Chi-Chi_Taiwan-06	0.3	0.72
3479	Chi-Chi_Taiwan-06	0.3	0.19
3516	Chi-Chi_Taiwan-06	0.3	10.37
4485	L'Aquila_Italy	0.3	0.14
8167	San Simeon_CA	0.3	0.10
748	Loma Prieta	0.4	5.49
771	Loma Prieta	0.4	0.52
789	Loma Prieta	0.4	4.86
989	Northridge-01	0.4	7.02
1096	Northridge-01	0.4	15.94
4893	Chuetsu-oki_Japan	0.4	2.66
5204	Chuetsu-oki_Japan	0.4	22.78
5313	Chuetsu-oki_Japan	0.4	0.14
6922	Darfield_New Zealand	0.4	0.40
1159	Kocaeli_Turkey	0.5	18.24
1234	Chi-Chi_Taiwan	0.5	0.30
1268	Chi-Chi_Taiwan	0.5	1.99
1321	Chi-Chi_Taiwan	0.5	12.87
1322	Chi-Chi_Taiwan	0.5	4.41
1341	Chi-Chi_Taiwan	0.5	17.13
1352	Chi-Chi_Taiwan	0.5	11.96
1434	Chi-Chi_Taiwan	0.5	2.04
1439	Chi-Chi_Taiwan	0.5	11.18
1518	Chi-Chi_Taiwan	0.5	1.64
1572	Chi-Chi_Taiwan	0.5	5.49
5842	El Mayor-Cucapah_Mexico	0.5	22.08



Şekil 53. Örnek kemer baraj için sismik kırılma eğrileri

Elde edilen kırılma eğrileri, Bölüm 2.2.5’de yapılan ön çalışma sonuçları ile test edilmiştir. Barajın bulunduğu bölge için Türkiye Deprem Tehlikesi haritasından ZB zemin sınıfı için işletme esaslı deprem (İED) (geri dönüşüm periyodu 475 yıl) ve emniyet esaslı deprem (EED) (geri dönüşüm periyodu 2475 yıl) için oluşturulan uniform tasarım spektrumlarının $S_a(T_1=0.75s)$ değerleri alınmıştır. Bu spektral ivme değerlerine karşılık gelen aşılma olasılıkları kırılma eğrilerinden elde edilerek Tablo 21’de gösterilmiştir.

Tablo 18. Hafif Hasar

ŞÖ	Toplam Analiz Sayısı	Sınırı Aşan Analiz Sayısı	Sınırı Aşan Analiz Oranı	Teorik Kırılma Fonksiyonu	Olabilirlik	Log Olabilirlik	$\hat{\theta}_d$	$\hat{\beta}_d$
0.1	12	0	0	0.0019683	0.976634	-0.02364	0.27	0.34
0.2	12	2	0.17	0.1930586	0.287967	-1.24491		
0.3	12	9	0.75	0.6228235	0.166472	-1.79293		
0.4	12	9	0.75	0.8748939	0.129377	-2.04503		
0.5	12	12	1.0	0.9639912	0.643986	-0.44008		

Tablo 19. Orta Hasar

ŞÖ	Toplam Analiz Sayısı	Sınırı Aşan Analiz Sayısı	Sınırı Aşan Analiz Oranı	Teorik Kırılma Fonksiyonu	Olabilirlik	Log Olabilirlik	$\hat{\theta}_d$	$\hat{\beta}_d$
0.1	12	0	0	5.5958E-08	0.999999	-6.7E-07		
0.2	12	0	0	0.0025052	0.970348	-0.0301		
0.3	12	1	0.08	0.0894697	0.382909	-0.95996	0.51	0.34
0.4	12	5	0.42	0.3796166	0.220837	-1.51033		
0.5	12	8	0.67	0.6908604	0.234610	-1.44983		

Tablo 20. Ağır Hasar

ŞÖ	Toplam Analiz Sayısı	Sınırı Aşan Analiz Sayısı	Sınırı Aşan Analiz Oranı	Teorik Kırılma Fonksiyonu	Olabilirlik	Log Olabilirlik	$\hat{\theta}_d$	$\hat{\beta}_d$
0.1	12	0	0	6.875E-09	1	-8.2E-08		
0.2	12	0	0	1.471E-04	0.998237	-0.00176		
0.3	12	0	0.00	7.809E-03	0.910218	-0.09407	0.68	0.34
0.4	12	1	0.08	5.886E-02	0.36241	-1.01498		
0.5	12	2	0.1667	1.834E-01	0.292712	-1.22857		

Elde edilen bu sonuçların, daha önce Bölüm 2.2.5’de yapılan kemer barajın hasar analizleri sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu analizlerinde, İED seviyesinde baraj gövdesinde hiç hasar oluşmadığı gösterilmişti. İED seviyesi için kırılma eğrilerinden elde edilen hasar olasılıkları hafif hasar için %9, orta hasar için %0.1 ve ağır hasar için %0’dır. EED seviyesinde yapılan hasar analizlerinde baraj gövdesinde hafif ve orta hasar oluştuğu (Şekil 35) gösterilmişti. EED seviyesi için kırılma eğrilerinden elde edilen hasar olasılıkları hafif, orta ve ağır hasar için sırasıyla %66, %6.7 ve %1’dir.

Tablo 21. Çeşitli deprem seviyeleri için hasar olasılıkları

Deprem	Sa(T ₁ =0.75s) (g)	Hafif Hasar	Orta Hasar	Ağır Hasar
İED	0.17	0.09	0.001	0
EED	0.31	0.66	0.067	0.01

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının amacı, beton kemer barajların sismik kırılma eğrilerinin, performansa dayalı deprem mühendisliği yaklaşımı çerçevesinde, oluşturulmasıdır. Bu kapsamda, bir beton kemer baraj modelinin kırılma eğrileri üç farklı hasar seviyesi için Çoklu Seviye Analiz (ÇSA) yöntemi ile elde edilmiştir.

Bu amaçla, ilk olarak, betonun sismik yükler altında lineer olmayan davranışını temsil etmesi için Drucker-Prager beton malzeme modelinin seçilen parametrelerinin uygunluğu, iki boyutlu bir beton ağırlık barajının sismik hasar analizi yapılarak incelenmiştir.

İkinci olarak, örnek kemer barajın sonlu elemanlar modeli oluşturularak, barajın statik yükler altında analizi yapılmıştır.

Üçüncü olarak, bu kemer barajın, İED ve EED seviyelerinde 13 yer hareketi ile hasar analizleri yapılarak, sonuçların USACE rehberinde [167] izin verilen hasar düzeylerinde kaldığı gösterilmiştir. Bu durum, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin sismik yükler altında uygun sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Dördüncü olarak, kemer barajının sismik kırılma eğrilerini elde etmek için yapılan analizlerde kullanılan, yer hareketleri seçilerek ölçeklenmiştir.

Beşinci olarak, ÇSA yöntemi ile seçilen ve ölçeklenen yer hareketleri ile kemer barajın lineer olmayan analizleri yapılarak, yer hareketleri parametreleri ile Hİ arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Son olarak, lineer olmayan analiz sonuçlarının baraj için belirlenen Limit Durumları (LD) aşma oranları kullanılarak, kemer baraj için üç farklı (hafif, orta ağır) hasar düzeyinde kırılma eğrileri oluşturulmuştur.

Yapılan bu çalışmalardan aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Drucker-Prager beton malzeme modeli, beton ağırlık barajlarının sismik hasar davranışını temsil edebilmektedir.
2. Kemer baraj modelinin dinamik yükler altında uygunluğunu kontrol etmek için, İED ve EED seviyelerinde lineer olmayan analizler yapılarak, oluşan hasarların USACE rehberinde [167] belirtilen seviyelerle karşılaştırılması önem arz etmektedir.
3. Kemer baraj sonlu elemanlar modeli ile yapılan hasar analizleri sonuçları, Drucker-Prager beton malzeme modelinin, kemer barajın lineer olmayan davranışını yeterli hassasiyetle temsil edebileceğini göstermiştir.

4. Kemer barajların sismik kırılgnlık eğrileri oluşturulurken, ADA yönteminde analiz sayısı önceden belli olmadığından, ÇSA yönteminin kullanılması avantaj sağlamaktadır.
5. ÇSA yönteminde, yer hareketleri seçilirken, deprem magnitütünün artması ile yer hareketi ivme spektrumlarının tepe noktalarının daha büyük periyotlara doğru kaydığı dikkate alınmalıdır.
6. Hasar İndeksi (HI) olarak seçilen Hasar Hacmi Oranı (HHO) ile PGA arasındaki ilişkide $R^2 = 0.39$ ve kret yatay deplasmanı (δ^{kret}) ile PGA arasındaki ilişkide $R^2 = 0.34$ olarak elde edilmiştir. Bu durum, PGA ile baraj davranışı arasındaki korelasyonun düşük olduğunu göstermektedir.
7. HHO ile PGV arasındaki ilişkide $R^2 = 0.33$ ve δ^{kret} ile PGV arasındaki ilişkide $R^2 = 0.24$ olarak elde edilmiştir. Bu durum, PGV ile baraj davranışı arasındaki korelasyonun düşük olduğunu göstermektedir.
8. HHO ile ASI arasındaki ilişkide $R^2 = 0.31$ ve δ^{kret} ile ASI arasındaki ilişkide $R^2 = 0.29$ olarak elde edilmiştir. Bu durum, ASI ile baraj davranışı arasındaki korelasyonun düşük olduğunu göstermektedir.
9. Barajın sismik davranışı ile yer hareketi parametrelerinden PGA'nın en yüksek korelasyona sahip olduğu görülmüştür.
10. HHO ile δ^{kret} arasındaki ilişkide $R^2 = 0.91$ olarak elde edilmiştir. Bu durum, kemer barajın sismik analizlerinde kullanılan malzeme modelinin, baraj davranışı ile uyumlu olduğunu göstermektedir.
11. Kemer baraj için önerilen %8 ve %18 HHO sınır değerleri ile üç farklı seviye için oluşturulan kırılgnlık eğrilerinin kayıttan kayıta değişimlerinin aynı çıkması, seçilen sınır değerlerinin uygunluğunu ve kırılgnlık eğrilerinin birbirleri ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda dikkate alınamayan fakat ileride yapılacak çalışmalara yol göstermesi açısından şu öneriler verilebilir:

1. Baraj sonlu elemanlar modelinde düşey derzlerin açılıp kapanması davranışı da dikkate alınarak detaylı bir model oluşturulup analizler tekrarlanabilir ve düşey derzlerin etkisi araştırılabilir.
2. Analitik modellemeden kaynaklanan belirsizlikler (boyut, malzeme özellikleri vs.) dikkate alınıp, olasılıksal analizler yapılarak bu belirsizliklerin etkisi incelenebilir ve kırılgnlık eğrilerinin hassaslığı artırılabilir.

4. KAYNAKLAR

1. Hall, J. F. ve Chopra, A. K., Dynamic Response of Embankment, Concrete-Gravity and Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, Report No UCB/EERC 80/39, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1980.
2. Hall, J. F. ve Chopra, A. K., Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects, Journal of Engineering Mechanics, 109,1 (1983) 149-167.
3. Fok, K. L. ve Chopra, A. K., Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams, Report No. UCB/EERC-85/07, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1985.
4. Fok, K. L. ve Chopra, A. K., Earthquake Analysis of Concrete Arch Dams Including Dam-Water Interaction, Reservoir Boundry Absorption and Foundation flexibility, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 114 (1986) 155-184.
5. Tan, H. ve Chopra, A. K., Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24 (1995) 1453-1474.
6. Tan, H. ve Chopra, A. K., Dam-Foundation-Rock Interaction Effects in Earthquake Response of Arch Dams, Journal of Structural Engineering, 122 (1996) 528-538.
7. Elkhodary, M. A. Boundary Element Analysis of Hydrodynamic Pressure on Arch Dams, Yüksek Lisans Tezi, Carleton University, Canada, 1984.
8. Clough, R. W., Chang, K. T., Chen, H. Q. ve Ghanaat, Y., Dynamic Interaction Effects in Arch Dams, Repoert No: UCB/EERC-85/11, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA, 1985.
9. Dowling, M. J., Nonlinear Seismic Analysis of Arch Dams, Doktora Tezi, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1987.
10. Fenves, G. L., Mojtahedi, S. ve Reimer, R. B., ADAP-88 A Computer Program for Nonlinear Earthquake analysis of Concrete Arch Dams, Report No: UCB/EERC-89/12, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA, 1989.
11. Hohberg, J. M., A Joint Element for the Nonlinear Dynamic Analysis of Arch Dams, Institute of Structural Engineering ETH, Zurich, 1992.
12. Zhang, L. ve Chopra, A. K., Computation of Spatially Varying Ground Motion and Foundation-Rock Impedance Matrices for Seismic analysis of Arch Dams, Report No: UCB/EERC-91/06, Earthquake engineering Research Center, Berkeley, CA, 1991.
13. USACE, Arch Dam Design, EM 1110-2-2201, Washington, D.C., 1994.

14. Feng , L. M., Pekau, O. A. ve Zhang , C. H., Cracking Analysis of Arch Dams by 3D Boundry Element Method, Journal of Structural Engineering, 122, 6 (1996) 691-699.
15. Silva, V. D. ve Julio, E. N. S. B., Computation of Membrane Shapes and Analysis of Arch Dams, Computers and Structures, 64 (1997) 849-855.
16. Lan, S. ve Yang, J., Nonlinear Finite Element Analysis of Arch Dam-I. Constitutive Relationships, Advances in Engineering Software, 28 (1997) 403-408.
17. Lan, S. ve Yang, J., Nonlinear Finite Element Analysis of Arch Dam-II. Nonlinear Analysis, Advances in Engineering Software, 28 (1997) 409-415.
18. Hall, J. F., Efficient Non-Linear Seismic Analysis of Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27 (1998) 1425-1444.
19. Ohmachi, T ve Jalali, A., Fundamental Study on Near-Field Effects on Earthquake Response of Arch Dams, Earthquake Engineering and Engineering Seismology, 1,1 (1999) 1-11.
20. Camara, R. J., A Method for Coupled Arch Dam-Foundation-Reservoir Seismic Behaviour Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29 (2000) 441-460.
21. Nasserzarea, J., Leib, Y. ve Eskandari-Shiria, S., Computation of Natural Frequencies and Mode Shapes of Arch Dams as an Inverse Problem, Advances in Engineering Software, 31 (2000) 827-836.
22. Chuhan, Z., Chengda, Y. ve Guanglun, W., Numerical Simulation of Reservoir Sediment and Effects on Hydro-Dynamic Response of Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30 (2001) 1817-1837.
23. Ahmadi, M. T., Izadinia, M. ve Bachmann, H., A Discrete Crack Joint Model for Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Arch Dam, Computers and Structures, 79 (2001) 403-420.
24. Azmi, M. ve Paultre, P., Three-Dimensional Analysis of Concrete Dams Including Contraction Joint Non-Linearity, Engineering Structures, 24 (2002) 757-771.
25. Calayır, Y. ve Karaton, M., Kemer Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi: Euler ve Lagrange Çözümleri, Turkish Journal Engineering Environmental Science, 26 (2002) 179-192.
26. Lotfi, V. ve Espandar, R., An Investigation of Joints Behavior in Seismic Response of Arch Dams, Electronic Journal of Structural Engineering, 1 (2002) 17-31.
27. Toyoda, Y., Shiojiri, H., Ueda, M. ve Tsunekawa, K., Dynamic Analysis of an Existing Arch Dam Including Joint Non-Linearity and Dam-Water-Foundation Rock Interaction, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004, Vancouver, B.C., Canada.

28. Noble, C. R. ve Nuss, L. K., Nonlinear Seismic Analysis of Morrow Point Dam, 13th World Conference on Earthquake Engineerin, 2004, Vancouver, B.C., Canada.
29. Xiuli, D. ve Jinting, W., Seismic Response Analysis of Arch Dam-Reservoir-Rock Foundation Systems, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 3,2 (2004) 283-291.
30. Akköse, M., Lagrange Yaklaşımı ile Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.
31. Akköse, M., Dumanoğlu, A. A. ve Tuna, M. E., Investigation of Hydrodynamic Effects on Linear and Nonlinear Earthquake Responses of Arch Dams by the Lagrangian Approach, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 28 (2004) 25-40.
32. Calayır, Y. ve Karaton, M., Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi, 207 (2004) 3085-3103.
33. Shahkarami, A., Delforouzi, M. ve Salarirad, H., Study of the Compression and Tension Factors of Safety with a 3D Fem Model for an Arch Dam and Rock Foundation: A Case Study of The KarunIII Arch Dam in Iran, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 2B,27 (2004).
34. Alves, S. W. ve Hall, J. F., Generation of Spatially Nonuniform Ground Motion for Nonlinear Analysis of a Concrete Arch Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35 (2006) 1339-1357.
35. Sevim, B., Akköse, M. ve Bayraktar, A., Geometri Değişiminin Kemer Barajların Dinamik Davranışına Etkisi, Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 2006, İstanbul, Türkiye.
36. Du, X., Zhang, Y. ve Zhang, B., Nonlinear Seismic Response Analysis of Arch Dam-Foundation Systems-Part I: Dam-Foundation Rock Interaction, Bulletin Earthquake Engineering, 5 (2007) 105-119.
37. Sani, A. A. ve Lotfi, V., Linear Dynamic Analysis of Arch Dams Utilizing Modified Efficient Fluid Hyper-Element, Engineering Structures, 29 (2007) 2654-2661.
38. Akköse, M., Adanur, S., Bayraktar, A. ve Dumanoğlu, A. A., Elasto-Plastic Earthquake Response of Arch Dams Including Fluid-Structure Interaction by the Lagrangian Approach, Applied Mathematical Modelling, 32 (2008) 2396-2412.
39. Akköse, M., Bayraktar, A. ve Dumanoğlu, A. A., Reservoir Water Level Effects on Nonlinear Dynamic Response of Arch Dams, Journal of Fluids and Structures, 24 (2008) 418-435.
40. Bayraktar, A., Sevim, B., Akköse, M. ve Calayır, Y., Seismic Damage Assessment of

Arch Dam-Reservoir-Foundation System using Demand-Capacity, Journal of Dam Engineering, 18,3 (2008) 195-216.

41. Lemos, J. V., Oliveira, S. ve Mendes , P., Analysis of the Dynamic Behavior of Cabril Dam Considering the Influence of Contraction Joints, 7th European Conference on Structural Dynamics, 2008, Southampton, England.
42. Noorzad, A., Mirzabozorg, H. ve Ghaemian, M., Earthquake Risk Reduction And Seismic Safety Evaluation of Arch Dams Using Infinite Elements, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008, Beijing, China.
43. Moradloo, J., Ahmadi, M. T. ve Vahdani, S., Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Arch Dam Considering Large Displacements, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008, Beijing, China.
44. Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Sevim, B., Kartal, M. E., Türker, T. ve Bilici, Y., Comparison of Near- and Far-Fault Ground Motion Effect on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Nonlinear Dyn, 58 (2009) 655-673.
45. Wang, J. T. ve Chopra, A. K., Linear Analysis of Concrete Arch Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction Considering Spatially Varying Ground Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39 (2010) 731-750.
46. Chopra, A. K. ve Wang, J. T., Earthquake Response of Arch Dams to Spatially Varying Ground Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39 (2010) 887-906.
47. Bayraktar, A., Sevim, B. ve Altunışık, A. C., Finite Element Model Updating Effects on Nonlinear Seismic Response of Arch Dam–Reservoir–Foundation Systems, Finite Elements in Analysis and Design, 47 (2011) 85-97.
48. Wang, J. T., Investigation of Damping in Arch Dam-Water-Foundation Rock System of Mauvoisin Arch Dam, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31 (2011) 33-44.
49. Aminfar, M. H., Mafi-Kandi, H. ve Ahmadi, H., Improving the Seismic Performance of ARch Dams Using Segmentation - A Case Study of Karun 4 Arch Dam, Iran, Journal of Engineering Science and Technology, 6,4 (2011) 397-410.
50. Sevim, B., The Effect of Material Properties on the Seismic Performance of Arch Dams, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11 (2011) 2253-2261.
51. Hariri-Ardebili, M. E. ve Mirzabozorg, H., Reservoir Fluctuation Effects on Seismic Response of High Concrete Arch Dams Considering Material Nonlinearity, Journal of Civil Engineering Research, Cilt 1,1 (2011) 9-20.
52. Wang, J. T., Zhang, C. H. ve Jin, F., Nonlinear Earthquake Analysis of High Arch Dam–Water–Foundation Rock Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 41 (2012) 1157-1176.

53. Hariri Ardebili, M. A. ve Mirzabozorg, H., Effects of Near-Fault Ground Motions in Seismic Performance Evaluation of a Symmetric Arch Dam, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 49,5 (2012) 192-199.
54. Hariri Ardebili, M. A. ve Mirzabozorg, H., Seismic Performance Evaluation and Analysis of Major Arch Dams Considering Material and Joint Nonlinearity Effects, International Scholarly Research Network Civil Engineering, (2012) 1-10.
55. Chen, D. H., Du, C. B., Yuan, J. W. ve Hong, Y. W., An Investigation into the Influence of Damping on the Earthquake Response Analysis of a High Arch Dam, Journal of Earthquake Engineering, 16 (2012) 329-349.
56. Zeinizadeh, A. ve Mirzabozorg, H., Geometric Nonlinearity Effect on Seismic Behavior of High Arch Dams, Journal of Civil Engineering Research, 2,1 (2012) 18-33.
57. Hariri-Ardebili, M. A., Mirzabozorg, H. ve Ghasemi, A., Strain-Based Seismic Failure Evaluation of Coupled Dam-Reservoir-Foundation System, Coupled Systems Mechanics, 2,1 (2013) 85-110.
58. Hariri-Ardebili, M. A. ve Mirzabozorg, H., A Comparative Study of Seismic Satability of Coupled Arch Dam-Foundation-Reservoir-Systems Using Infinite Elements and Viscous Boundary Models, International Journal of Structural Stability and Dynamics, 13,6 (2013) 1-24.
59. Hamidian, D., Seyedpoor, S. M. ve Salajegheh, J., An Investigation of Dam-Reservoir-Foundation Rock Interaction Effects on Linear and Nonlinear Eearthquake Response of Concrete Arch Dams, Asian Journal of Civil Engineering, 14,1 (2013) 111-122.
60. Tarinejad, R., Fatehi, R. ve Harichandran, R. S., Response of an Arch Dam to Non-Uniform Excitation Generated by a Seismic Wave Scattering Model, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 52 (2013) 40-54.
61. Akbari, M., Hariri-Ardebili, M. A. ve Mirzabozorg, H., Nonlinear Response of High Arch Dam to Nonuniform Seismic Excitation Considering Joint Effects, Journal of Engineering, 2013 (2013) 1-6.
62. Hariri-Ardebili, M. A., Mirzabozorg, H. ve Kianoush, M. R., Structural Safety of High Arch Dams with Variable Water Levels Based on Seismic Performance Evaluatiion, IJST, Transactions of Civil Engineering, 38,C1 (2014) 175-190.
63. Hesari, M. A., Ghaemian, M. ve Shamsai, A., Advanced Nonlinear Dynamic Analysis of Arch Dams Considering Joints Effects, Advances in Mechanical Engineering, (2014) 1-6.
64. Hariri-Ardebili, M. A. ve Saouma, V. E., Impact of Near-Fault vs. Far-Field Ground Motions on the Seismic Response of an Arch Dam with Respect to Foundation Type, Dam Engineering, 24,1 (2014) 19-52.

65. Hariri-Ardebili, M. A. ve Kianoush, M. R., Integrative Seismic Safety Evaluation of a High Concrete Arch Dam, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67, (2014) 85-101.
66. Garcia, F., Aznarez, J. J., Cifuentes, H., Medina, F. ve Maeso, O., Influence of Reservoir Geometry and Conditions on the Seismic Response of Arch Dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 67 (2014) 264-272.
67. Ferdousi, A., Gharabaghi, A. R. M., Ahmadi, M. T., Chenaghlo, M. R. ve Tabrizi, M. E., Earthquake Analysis of Arch Dams Including the Effect of Foundation Discontinuities and Proper Boundary Conditions, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 52,3 (2014) 579-594.
68. Hariri-Ardebili, M. A. ve Kianoush, M. R., Seismic Analysis of a Coupled Dam-Reservoir-Foundation System Considering Pressure Effects at Opened Joints, Structure and Infrastructure Engineering, 11,7 (2015) 833-850.
69. Pan, J., Xu, Y., Jin, F. ve Jinting, W., Seismic Stability Assessment of an Arch Dam-Foundation System, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 14 (2015) 517-526.
70. Heshmati, M., Kolbadi, S. M. S. ve Kolbadi, S. M. S., Comparison between Strain-Based vs. Stress-Based Criteria in Seismic Performance Evaluation of High Arch Dams, American Journal of Civil Engineering, 3,2-1 (2015) 1-8.
71. Hariri-Ardebili, M. A., Akbari, M. ve Mirzabozorg, H., Impact of Load Combination on the Stability Analysis of an Arch Dam Subjected to Stochastic Non-Uniform Excitations, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 19,3 (2015) 263-277.
72. Hariri-Ardebili, M. A., Furgani, L., Meghella, M. ve Saouma, V. E., A New Class of Seismic Damage and Performance Indices for Arch Dams via ETA Method, Engineering Structures, 110 (2016) 145-160.
73. Omid, O. ve Lotfi, V., A Symmetric Implementation of Pressure-Based Fluid-Structure Interaction for Nonlinear Dynamic Analysis of Arch Dams, Journal of Fluids and Structures, 69 (2017) 34-55.
74. Espandar, R. ve Lotfi, V., Comparison of Non-orthogonal Smeared Crack and Plasticity Models for Dynamic analysis of Concrete Arch Dams, Computers and Structures, 81 (2003) 1461-1474.
75. Lotfi, V. ve Espandar, R., Seismic Analysis of Concrete Arch Dams by Combined Discrete Crack and Non-orthogonal Smeared Crack Technique, Engineering Structures, 26 (2004) 27-37.
76. Karaton, M., Sıvı-Yapı Etkileşimi Dikkate Alınarak Kemer Barajların Dinamik Hasar Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2004.

77. Mirzabozorg, H. ve Ghaemian, M., Non-linear Behavior of Mass Concrete in Three-Dimensional Problems using a Smeared Crack Approach, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34 (2005) 247-269.
78. Zhong, H., Lin, G. ve Li, H., Numerical Simulation of Damage in High Arch Dam due to Earthquake, Front. Archit. Civ. Eng. China, 3,3 (2009) 316-322.
79. Hariri Ardebili, M. A., Mirzabozorg, H. ve Kianoush, R., A Study on Nonlinear Behavior and Sesimic Damage Assessment of Concrete Arch Dam-Reservoir-Foundation System Using Endurance Time Analysis, International Journal of Optimization in Civil Engineering, 2,4 (2012) 573-606.
80. Alembagheri, M. ve Ghaemian, M., Damage Assessment of a Concrete Arch Dam Through Nonlinear Incremental Dynamic Analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 44 (2013) 127-137.
81. Wang, J. T., Lv, D. D., Jin, F. ve Zhang, C. H., Earthquake Damage Analysis of Arch Dams Considering Dam–Water–Foundation Interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 49 (2013) 64-76.
82. Hariri-Ardebili, M. A. ve Mirzabozorg, H., Orthotropic Material and Anisotropic Damage Mechnics Approach for Numerically Seismic Assessment of Arch-Dam-Reservoir-Foundation System, Strength of Materials, 45,6 (2013) 648-665.
83. Meghella, M. ve Furgani, L., Application of Endurance Time Analysis Method to the Non Linear Seismic Analysis of Dams: Potentialities and Limitations, International Symposium on Dams in a Global Environmental Challenges, 2014, Bali, Indonesia.
84. Hariri-Ardebili, M. A., Impact of Foundation Nonlinearity on the Crack Propagation of High Concrete Dams, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 51,2 (2014) 72-82.
85. Hariri-Ardebili, M. A. ve Mirzabozorg, H., Estimation of Probable Damages in Arch Dams Subjected to Strong Ground Motions using Endurance Time Acceleration Functions, KSCE Journal of Civil Engineering, 18,2 (2014) 574-586.
86. Pan, J., Xu, Y. ve Jin, F., Seismic Performance Assessment of Arch Dams Using Incremental Nonlinear Dynamic Analysis, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 19,3 (2015) 305-326.
87. Hariri-Ardebili, M. A. ve Seyed-Kolbadi, S. M., Seismic Cracking and Instability of Concrete Dams: Smeared Crack Approach, Engineering Failure Analysis, 52 (2015) 45-60.
88. Wang, J. T., Jin, A. Y., Du, X. L. ve Wu, M. X., Scatter of Dynamic Response and Damage of an Arch Dam Subjected to Artificial Earthquake Accelerograms, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 87 (2016) 93-100.
89. Omidi, O. ve Lotfi, V., Seismic Plastic–Damage Analysis of Mass Concrete Blocks in

- Arch Dams Including Contraction and Peripheral Joints, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 95 (2017) 118-137.
90. Wang, J., Jin, F. ve Zhang, C., Nonlinear Seismic Response Analysis of High Arch Dams to Spatially-Varying Ground Motions, International Journal of Civil Engineering 17 (2018) 487-493.
 91. Hariri-Ardebili, M. A., Saouma, Victor E. ve Porter, Keith A., Quantification of Seismic Potential Failure Modes in Concrete Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 45 (2015) 979-997.
 92. Hariri-Ardebili, M.A. ve Saouma, V.E., Probabilistic Seismic Demand Model and Optimal Intensity Measure for Concrete Dams, Structural Safety, 59 (2016) 67-85.
 93. Liang, C., Chen, J., Xu, Q. ve Li, J., Correlation Study between Seismic Intensity Measures and Nonlinear Response of Arch Dam via Endurance Time Analysis, KSCE Journal of Civil Engineering, 25,1 (2021) 256-271.
 94. de Araujo, J. M. ve Awruch, A. M., Probabilistic Finite Element Analysis of Concrete Gravity Dams, Advances in Engineering Software, 29,2 (1998) 97-104.
 95. Tekei, P. B. ve Ellingwood, B. R., Seismic Fragility Assessment of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32 (2003) 2221-2240.
 96. Lin, L. ve Adams, J., Lessons for the Fragility of Canadian Hydropower Componentes under Seismic Loading, Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering, 2007, Ottawa, Ontario, Canada.
 97. Applied Technology Council, ATC-13 Earthquake Damage Evaluation Data for California, Redwood City, CA, 1985.
 98. Yao, X.W., Elnashai, A.S. ve Jiang, J.Q., Analytical Seismic Fragility Analysis of Concrete Arch Dams, 2012, 15th World Conference on Earthquake Engineering Lisbon, Portugal.
 99. Wetergaard, H. M., Water Pressures on Dams during Earthquakes, ASCE, 98 (1933) 418-433.
 100. Yücel, A. R., Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam Foundation Reservoir Interaction, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara, 2013.
 101. Fenves, G. ve Chopra, A., EAGD-84: A Computer Program for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1984.
 102. Zhong, Hong, Li, Hongjun ve Bao, Yanli, Seismic Risk Analysis of an Arch Dam, Applied Mechanics and Materials, 353-356 (2013) 2020-2023.
 103. Abdelhamid, H., Mahmoud, B. ve Hussein, M., Seismic Fragility and Uncertainty

Analysis of Concrete Gravity Dams under Near-Fault Ground Motions, Civil and Environmental Research, 5 (2013).

104. Y. Ghanaat, P. S. Hashimoto, O. Zuchuat ve R. P. Kennedy, Seismic Fragility of Mühleberg Dam Using Nonlinear Analysis with Latin Hypercube Simulation, 31st Annual USSD Conference, 2011, San Diego, California.
105. Ghanaat, Y., Patev, R. C. ve Chudgar, A. K., Seismic Fragility Analysis of Concrete Gravity Dams, 15th World Conference on Earthquake Engineering, 2012, Lisbon, Portugal.
106. Kadkhodayan, V., Aghajanzadeh, S. M. ve Mirzabozorg, H., Seismic Assessment of Arch Dams Using Fragility Curves, Civil Engineering Journal, 1,2 (2015) 14-20.
107. Ghanaat, Y., Failure Modes approach to Safety Elevation of Dams, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004, Vancouver, B.C., Canada.
108. Hariri-Ardebili, M.A., Saouma, V. E. ve Porter, K. A., Quantification of Seismic Potential Failure Modes in Concrete Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 45 (2016) 979-997.
109. Jayaram, N., Lin, T. ve Baker, J. W., A Computationally Efficient Ground-Motion Selection Algorithm for Matching a Target Response Spectrum Mean and Variance, Earthquake Spectra, 27,3 (2011) 797-815.
110. Saouma, V., <https://ceae.colorado.edu/~saouma/wp-content/uploads/pdf-files/users.4c13366f.pdf>, 10 July 2010
111. Hariri-Ardebili, M. A. ve Saouma, V. E., Collapse Fragility Curves for Concrete Dams: Comprehensive Study, Journal of Structural Engineering, 142,10 (2016).
112. Hariri-Ardebili, M.A. ve Saouma, V. E., Sensitivity and Uncertainty Quantification of the Cohesive Crack Model, Engineering Fracture Mechanics, 155 (2016) 18-35.
113. Bernier, C., Padgett, J. E., Proulx, J. ve Paultre, P., Seismic Fragility of Concrete Gravity Dams with Spatial Variation of Angle of Friction: Case Study, Journal of Structural Engineering, 142,5 (2016).
114. Bernier, C., Monteiro, R. ve Paultre, P., Using the Conditional Spectrum Method for Improved Fragility Assessment of Concrete Gravity Dams in Eastern Canada, Earthquake Spectra, 32,3 (2016) 1449-1468.
115. Alembagheri, M. ve Ghaemian, M., Seismic Performance Evaluation of a Jointed Arch Dam, Structure and Infrastructure Engineering, 12,2 (2016) 256-274.
116. Wang, J.-T., Zhang, M.-X., Jin, A.-Y. ve Zhang, C.-H., Seismic Fragility of Arch Dams Based on Damage Analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 109 (2018) 58-68.

117. Hariri-Ardebili, M.A., Seyed-Kolbadi, S.M. ve Noori, M., Response Surface Method for Material Uncertainty Quantification of Infrastructures, Shock and Vibration (2018).
118. Segura, R., Bernier, C., Monteiro, R. ve Paultre, P., On the Seismic Fragility Assessment of Concrete Gravity Dams in Eastern Canada, Earthquake Spectra, 35,1 (2019) 211-231.
119. Clough, R.W., Non-linear Mechanisms in the Seismic Response of Arch Dams, Proceedings of the International Research Conference on Earthquake Engineering, 1980, Skopje, Yugoslavia, 669.
120. Sevim, B. Kemer Barajların Dinamik Davranışlarının Sonlu Eleman ve Deneysel Modal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon 2010.
121. Wilson, E. L. ve Khalvati, M., Finite Elements for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 19 (1983) 1657-1668.
122. Dungar, R., An Efficient Method of Fluid-Structures Coupling in the Dynamic Analysis of Structures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13 (1978) 93-107.
123. Newmark, N. M., A Method of Computation for Structural Dynamics, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, (1959) 67-94.
124. Chopra, A.K., Dynamics of Structures, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ, 2013.
125. Coulomb, C. A., Essai sur une Application des Regles des Maximis et Minimis a Quelques Problemes de Statique Relatifs, a la Architecture, Mem. Acad. Roy. Div. Sav, 7 (1776) 343-387.
126. Drucker, D. C. ve Prager, W., Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design, Quarterly of Applied Mathematics, 10,2 (1952) 157-165.
127. Chen, A. C. T. ve Chen, W. F., Constitutive Relations for Concrete, J. Eng. Mech. Div, 101 (1975) 465-481.
128. Ottosen, N. S., A failure Criterion for Concrete, J. Eng. Mech. Div., 103 (1977) 527-535.
129. Hsieh, S. S., Ting, E. C. ve Chen, W. F., A Plastic Fracture Model for Concrete, Int. J. Solids Struct, 18 (1982) 181-197.
130. Willam, K. J. ve Warnke, E. P., Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete, Proceedings of the International Assoc. for Bridge and Structural Engineering, 19 (1975) 1-30.

131. ANSYS Inc., ANSYS Mechanical APDL Material Reference Release 18.2., Canonsburg, PA, 2017.
132. National Research Council (NRC), Earthquake Engineering for Concrete Dams: Design, Performance and Research Needs, National Academy Press, 1990, Washington, D.C.
133. Alves, S. W. ve Hall, J. F., System Identification of a Concrete Arch Dam and Calibration of its Finite Element Model, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35 (2006) 1321-1337.
134. DSİ Genel Müdürlüğü, Beton Barajlar Tasarım İlkeleri Rehberi, Ankara, 2012.
135. Lallelmant, D., Kiremidjian, A. ve Burton, H., Statistical Procedures for Developing Earthquake Damage Fragility Curves, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 44 (2015) 1373-1389.
136. Kennedy, R., Cornell, C., Campbell, R., Kaplan, S. ve Perla, H., Probabilistic Seismic Safety Study of An Existing Nuclear Power Plant, Nuclear Engineering and Design, 59 (1980) 315-338.
137. Porter, K., Kennedy, R. ve Bachman, R., Creating Fragility Functions for Performance-Based Earthquake Engineering, Earthquake Spectra, 23,2 (2007) 471-489.
138. Porter, K. A., An Overview of PEER's Performance-Based Earthquake engineering Methodology, Ninth International Conference on Application of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP9), 2003, San Francisco.
139. Padgett, J. E., Seismic Vulnerability Assessment of Retrofitted Bridges Using Probabilistic Methods, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2007.
140. Porter, K. A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk. University of Colorado Boulder, 2020.
141. Singhal, A. ve Kiremidjian, A.S., Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage, Journal of Structural Engineering, 122 (1996) 1459-1467.
142. Ibarra, L.F. ve Krawinkler, H. Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations, Technical Report, Blume Center, 2005.
143. Bradley, B.A. ve Dhakal, R.P., Error Estimation of Closed-form Solution for Annual Rate of Structural Collapse, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37 (2008) 1721-1737.
144. Bird, J., Bommer, J., Sancio, R. ve Spence, R., Comparing Loss Estimation with Observed Damage in a Zone of Ground Failure: A Study of the 1999 Kocaeli Earthquake in Turkey, Bulletin of Earthquake Engineering, 2 (2004) 329-360.

145. Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J. ve Naganuma, T., Statistical Analysis of Fragility Curves, Journal of Engineering Mechanics, 126 (2000) 1224-1231.
146. Baker, J. W., Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis, Earthquake Spectra, 31,1 (2015) 579-599.
147. USACE, Response Spectra and Seismic Analysis for concrete Hydrolic Structures EM 1110-2-6050, Washington, DC, 1999.
148. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, DSİ., Barajlarda Sismik Parametrelerin Tayini Rehberi, Ankara, 2014.
149. Yüçemen, M. S., Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi: Geleneksel Bakış ve istatistiksel Modellemede Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, 2011.
150. Cornell, C., Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 58 (1968) 1583-1606.
151. Hariri-Ardebili, M.A., Probabilistic Seismic Demand Model and Optimal Intensity Measure for Concrete Dams, Structural Safety, 59 (2016) 67-85.
152. Hariri-Ardebili, M.A ve Saouma, V.E., Seismic Fragility Analysis of Concrete Dams: A state-of-the-art Review, Engineering Structures, 128 (2016) 374-399.
153. Hariri-Ardebili, M. A., Performance Based Earthquake Engineering of Concrete Dams, PhD Thesis, University of Colorado, Boulder, 2015.
154. Jalayer, F., Direct Probabilistic Seismic analysis: Implementing Non-Linear Dynamic Assessments, PhD Thesis, University of Stanford, Palo-Alto, CA, 2003.
155. Cornell, C. A., Jalayer, F., Hamburger, R. O. ve Foutch, D. A., Probabilistic Basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines, Journal of Structural Engineering, 128,4 (2002) 526-533.
156. Hariri-Ardebili, M.A. ve Saouma, V.E., Quantitative Failure Metric for Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 44 (2015) 461-480.
157. Furgani, L., Hariri-Ardebili, M. A., Meghella, M. ve Seyed-Kolbadi, S. M., On the Dynamic Capacity of Concrete Dams, Infrastructures, 4,57 (2019) 1-19.
158. Vamvatsikos, D. ve Cornell, C. A., Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31 (2002) 491-514.
159. Bradley, B. A., A Generalized Conditional Intensity Measure Approach and Holistic Ground-Motion Selection, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39,12 (2010) 1321-1342.
160. Lin, T., Haselton, C. B. ve Baker, J. W., Conditional Spectrum-Based Ground Motion

- Selection. Part I: Hazard Consistency for Risk-Based Assessments, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 42 (2013) 1847-1865.
161. Baker, J. W. ve Cornell, C. A., Vector-Valued Ground Motion Intensity Measures for Probabilistic Seismic Demand Analysis, Report No. 150, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford, CA, 2005.
 162. Straub, D. ve Der Kiureghian, A., Improved Seismic Fragility Modeling from Empirical Data, Structural Safety, 30,4 (2008) 320-336.
 163. Taşdemir, M.A., Deriner Barajı ve Hidroelektrik Santralı Su tutma Program ve Prosedürü, 2. Barajlar Kongresi, İstanbul, 2014.
 164. <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH>, T.C. BAŞBAKANLIK, AFAD, Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamaları, 20 Mart 2019.
 165. Chopra, A. K. ve Chakrabarti, P., The Earthquake Experince at Koyna Dam and Stresses in Concrete Gravity Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1 (1972) 151-164.
 166. ANSYS Inc., ANSYS Academic Research Mechanical, Release 18.2., 2018.
 167. USACE, Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures, EM 1110-2-6051, Washington, DC, 2003.
 168. Calayır, Y. ve Karaton, M., A Continuum Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dam–Reservoir Systems, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25 (2005) 857-869.
 169. Calayır, Y. ve Karaton, M., Seismic Fracture Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam–Reservoir Interaction, Computers and Structures, 83 (2005) 1595-1606.
 170. Jianwen, P., Chuhan, Z., Yanjie, X. ve Feng, J., A Comparative Study of the Different Procedures for Seismic Cracking Analysis of Concrete Dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31 (2011) 1594-1606.
 171. Hariri-Ardebili, M. A., Seyed-Kolbadi, S. M. ve Mirzabozorg, H., A Smearred Crack Model for Seismic Failure Analysis of Concrete Gravity Dams Considering Fracture Energy Effects, Structural Engineering and Mechanics, 48,1 (2013) 17-39.
 172. Oudni, N. ve Bouafia, Y., Response of Concrete Gravity Dam by Damage Model under Seismic Excitation, Engineering Failure Analysis, 58 (2015) 417-428.
 173. Hariri-Ardebili, M. A., Seyed-Kolbadi, S. M. ve Kianoush, M. R., FEM-Based Parametric Analysis of a Typical Gravity Dam Considering Input Excitation Mechanism, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 84 (2016) 22-43.
 174. Chen, K., Zou, D. ve Kong, X., A Nonlinear Approach for the Three-Dimensional

- Polyhedron Scaled Boundary Finite Element Method and its Verification Using Koyna Gravity Dam, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 96 (2017) 1-12.
175. Wang, G., Wang, Y., Lu, W., Yu, M. ve Wang, C., Deterministic 3D Seismic Damage Analysis of Guandi Concrete Gravity Dam: A Case Study, Engineering Structures, 148 (2017) 263-276.
 176. Huang, J., An Incrementation-Adaptive Multi-Transmitting Boundary for Seismic Fracture Analysis of Concrete Gravity Dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 110 (2018) 145-158.
 177. USACE, Earthquake Design and Evaluation of concrete Hydraulic Structures, EM_1110-2-6053, Washington, DC, 2007.
 178. <https://ngawest2.berkeley.edu/site>, PEER Ground Motion Database, 20 Mart 2019.
 179. PEER, Technical Report for the PEER Ground Motion Database Web Application. 2010.
 180. Graizer, V. ve Kalkan, E., Prediction of Spectral Acceleration Response Ordinates Based on PGA Attenuation, Earthquake Spectra, 25,1 (2009) 39-69.
 181. Baker, J. W. ve Cornell, A., Spectral Shape, Epsilon and Record Selection, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35,9 (2006) 1077-1095.
 182. Haselton, C. B., Baker, J. W., Liel, A. B. ve Deierlein, G. G., Accounting for Ground-Motion Spectral Shape Characteristics in Structural Collapse Assessment through an Adjustment for Epsilon, ASCE Journal of Structural Engineering, 137,3 (2011) 332-344.
 183. Hariri-Ardebili, M., Furgani, L., Meghella, M. ve Saouma, V., A New Class of Seismic Damage and Performance Indices for Arch Dams via ETA Method, Engineering Structures, 110 (2016) 148-160.
 184. Chen, J., Cao, X., Xu, Q. ve Li, J., Exploration on Damage Mechanism and Equivalent Damage Model of High Arch Dams under Earthquakes, KSCE Journal of Civil Engineering, 24,4 (2020) 1285-1306.
 185. Baker, J. W., <https://web.stanford.edu/~bakerjw/fragility.html>., Baker Research Group 21 Haziran 2021

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2002 yılında Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2006 yılında mezun olduktan sonra Milli Eğitim Bakanlığı'nın yurtdışı eğitim bursunu kazanarak Amerika Birleşik Devletleri'ne gitti. İngilizce dil eğitimini tamamladıktan sonra, University of Colorado – Boulder Üniversitesinden Aralık 2010'da yüksek lisans derecesi ile mezun oldu. 2011 yılında Türkiye'ye döndükten sonra Sivas Cumhuriyet Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. İyi derecede İngilizce bilen Erdiñç Erkan Başbolat evli ve iki çocuk babasıdır.