

GEYVE DOĞANTEPE BARAJI'NIN DİNAMİK ANALİZİ

Saraylı, S.; Sonmez, O.; Sert, S.; Demir, F.; Tuncer Evcil, G.; Baycan, A.; Ergun, M.

1. Giriş

Barajlar, su depolama, taşkın kontrolü, enerji üretimi ve sulama gibi amaçlarla kullanılan kritik mühendislik yapılarıdır; ancak özellikle sismik açıdan aktif bölgelerde önemli riskler taşırlar [1,2]. Dolgu barajlarda depremler, gövde deformasyonlarına, stabilite kayıplarına ve su-baraj etkileşiminden kaynaklı ilave risklere yol açabilmektedir [3,4]. Bu nedenle, barajların sismik performansının detaylı mühendislik analizleri ile incelenmesi büyük önem taşımaktadır [8,9]. Son yıllarda sonlu elemanlar (FEM) ve sonlu farklar (FDM) yöntemleri, özellikle PLAXIS gibi gelişmiş yazılımlar, barajların dinamik davranışının modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [10,11]. Literatürdeki çalışmalar, deprem sırasında zeminlerin doğrusal olmayan histerik davranış sergilediğini ve baraj-temel sistemine etkiyen ivme zaman geçmişlerinin doğru seçiminin kritik olduğunu göstermektedir [12,13]. Bu bağlamda, Geyve Doğantepe Barajı'nın Kuzey Anadolu Fay Zonu'na (KAFZ) yakın konumu nedeniyle farklı sismik senaryolar altında davranışı incelenmiş, DSİ kılavuzuna uygun olarak risk grubu belirlenmiş ve ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarıyla yapılan analizlerde barajın deformasyon davranışı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, rezervuar etkileşiminin baraj kararlılığında belirleyici olduğunu ve düşük periyotlu sismik hareketlerin güvenlik açısından kritik riskler oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Geyve Doğantepe Barajı, Sakarya ili Geyve ilçesi Doğantepe Mahallesi'nde Karakaya Deresi üzerinde sulama amacıyla inşa edilmiştir. İnşaatı 2015'te başlamış olup, 2024 yılı sonunda su tutmaya başlamıştır. Baraj, Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) Orta Kolu'na yaklaşık 700 m mesafede konumlanmaktadır. Bölgenin aktif tektonik özellikleri ve barajın jeoteknik koşulları, barajın sismik davranışının incelenmesini gerekli kılmaktadır.

2. Barajın Teknik Özellikleri

Baraj, beton kaplı kum-çakıl dolgu tipinde olup, tepe yüksekliği 50,5 m'dir. Rezervuar kapasitesi normal su seviyesinde 2,89 hm³'tür. Temel kaya birimi serpantin ve şeyllerden oluşmaktadır. Barajın ana teknik özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

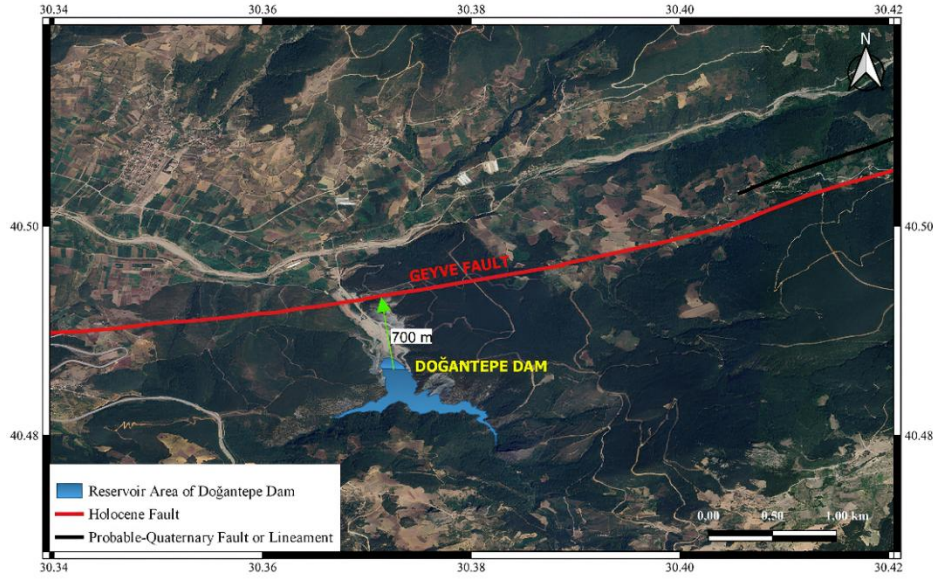
Tablo 1.Geyve Doğantepe Barajı'nın ana teknik özellikleri

Özellik	Değer
Baraj Gövde Tipi	Beton kaplı kum çakıl dolgu baraj
Tepe Yüksekliği (m)	234.00
Parapet Duvarı Üst Yüksekliği (m)	235.50
Minimum Su Seviyesi (m)	214.15
Normal Su Seviyesi (m)	230.60
Maksimum Su Seviyesi (m)	234.27
Normal Su Seviyesinde Rezervuar Hacmi (hm ³)	2.89
Eğim Eğim	Yukarı Akış (1.00V-1.80H) Aşağı Akış (1.00V-2.10H)
Barajın yüksekliği (m)	50.50

3. Jeoteknik ve Sismotektonik Özellikler

Bölge, KAFZ'nin Orta Kolu üzerinde yer alan İznik–Gemlik fay hattına çok yakındır. Tarihsel kayıtlar, bölgede ~M7 büyüklüğünde depremlerin tekrarlandığını ve segmentin uzun süredir sismik boşluk özelliği taşıdığını göstermektedir. Bu nedenle Geyve Doğantepe Barajı'nın deprem etkileri altında performansı kritik öneme sahiptir.

Geyve Doğantepe Barajı'nın Geyve Fayı'na olan uzaklığı Google Earth görüntüsü üzerinde belirlenmiş ve Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Geyve Fayı ve Geyve Doğantepe Barajı'nın uydu görüntüsü

4. Sayısal Modelleme ve Analiz Yöntemi

Barajın sismik davranışının incelenmesinde PLAXIS 2D sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır.

- Modelde **Hardening Soil** zemin modeli ve **Hoek-Brown** kaya modeli tercih edilmiştir.
- Rezervuar suyu hidrodinamik etkileri **ek kütle (Westergaard-Zangar yaklaşımı)** ile temsil edilmiştir.
- Analizler boş ve dolu rezervuar koşulları altında farklı ölçekli deprem kayıtları için yapılmıştır.
- Mesh yakınsama çalışmaları ile çözümün ağdan bağımsızlığı doğrulanmıştır.

Bu çalışmada, Geyve Doğantepe Barajı için planlama aşamasında hazırlanan **Sismik Tehlike Analiz Raporu** kullanılarak barajın sismik tehlikesi deterministik ve olasılıksal yöntemlerle belirlenmiştir [38]. **Baraj Tasarımında Sismik Parametre Seçimi Kılavuzu**'na göre, yüksek ve en yüksek riskli barajlarda Türk Deprem Yönetmeliği (TDY) spektral ordinatlarının 1,5 katsayısı ile çarpılması gerektiğinden, 2475 yıl geri dönüş periyoduna sahip **Olasılıksal Güvenlik Tabanlı Deprem (PBSE)** hedef spektrumu dikkate alınmıştır [36].

Deprem kayıtlarının seçimi için **Baraj Tasarımında Sismik Parametre Seçimi Kılavuzu** esas alınmış; $M_{hedef}=7,4-7,6$, $R=50$ km, doğrultu atımlı fay mekanizması ve $V_{s30} \geq 760$ m/sn koşullarına uygun gerçek ivme kayıtları, **PEER Yer Hareketi Veritabanı**'ndan alınmıştır. Seçilen ivme kayıtları **SeismoMatch** yazılımı ile ölçeklendirilmiş, Kocaeli (1999) ve Düzce (1999) depremlerine ait veriler analizlerde kullanılmıştır (Tablo 10–11).

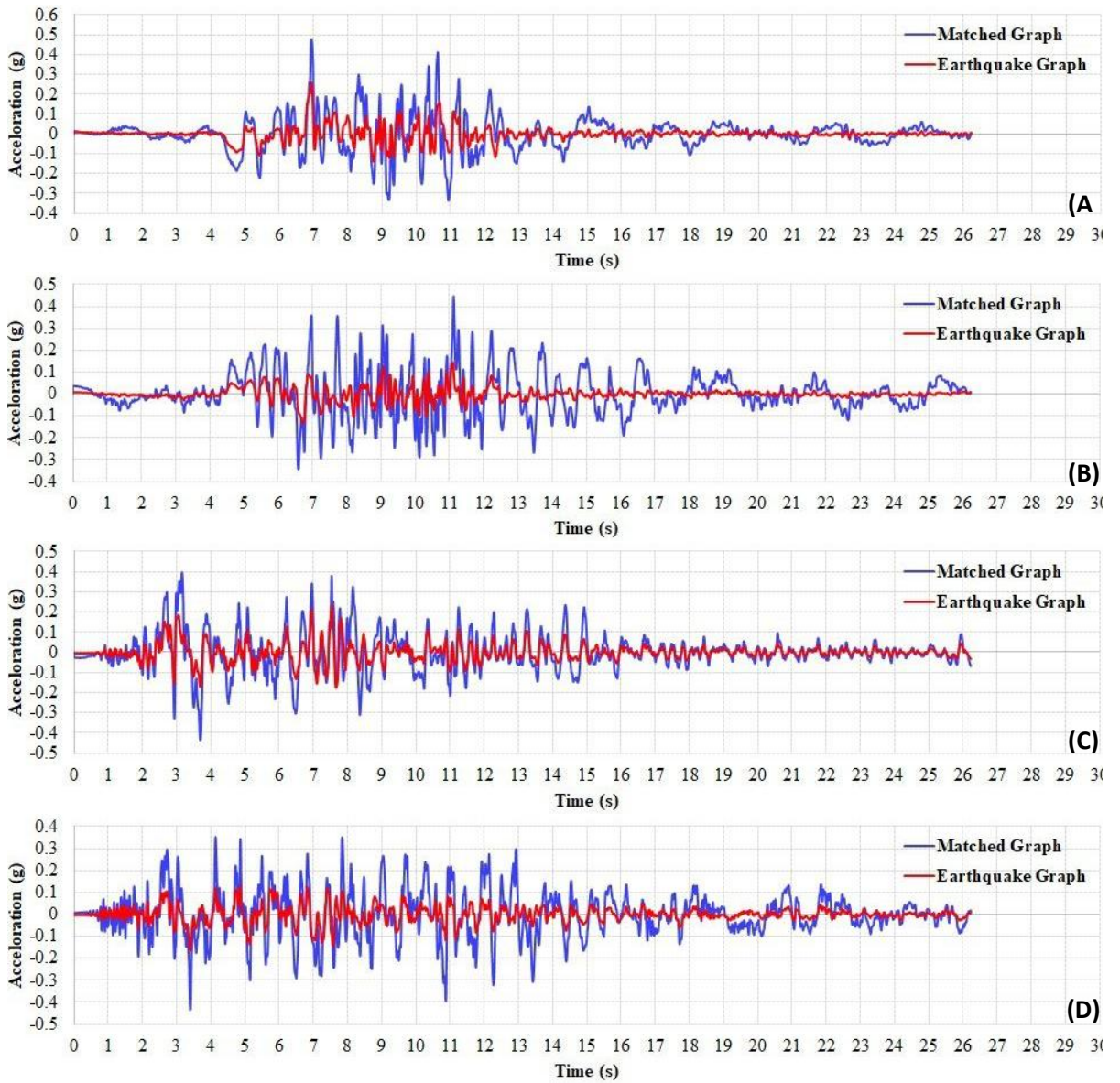
Dinamik analizler **PLAXIS 2D** yazılımında gerçekleştirilmiş; baraj gövdesi boş ve dolu rezervuar koşullarında farklı ölçekli deprem kayıtlarına maruz bırakılmıştır. Malzeme parametreleri barajın jeoteknik ve yapısal özelliklerine göre seçilmiş, sönümlenme ise %5 Rayleigh sönüm oranı kullanılarak modellenmiştir. Rayleigh sönüm modeli, sönümlenme matrisini kütle ve rijitlik matrislerinin doğrusal kombinasyonu olarak ifade etmekte olup $[C]=\alpha[M]+\beta[K]$ şeklinde tanımlanır [4].

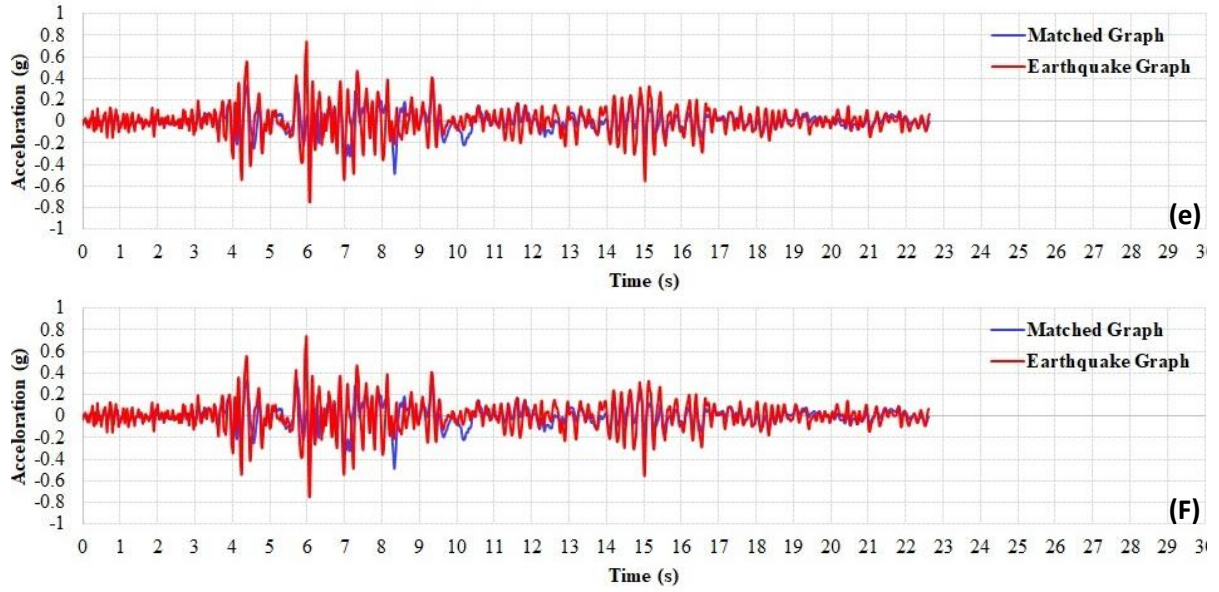
PEER Zemin Hareketi Veritabanı sayfasından elde edilen ve ölçeklendirilen deprem kayıtlarına ilişkin bilgiler Tablo2’de sunulmaktadır.

Tablo 11. Deprem kayıtları hakkında bilgi

Deprem Adı	Yıl	İstasyon Adı	Deprem Büyüklüğü (Mw)	Mekanizma	Vs30 (m/sn)
Kocaeli_ Türkiye	1999	Gebze	7.51	Doğrultlu	792
Kocaeli_ Türkiye	1999	İzmit	7.51	Atımlı	811
Düzce_ Türkiye	1999	IRIGM 496	7.14		760

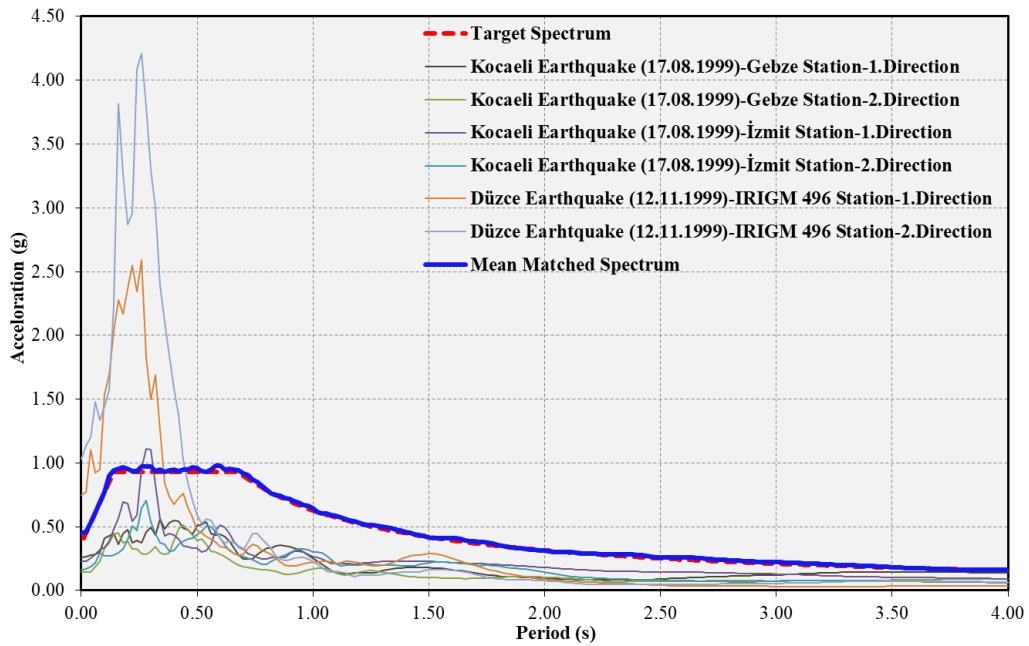
Şekil 2’de, zamanın saniye, ivmenin ise “g” cinsinden verildiği depremlerin ölçeklendirilmemiş ve ölçeklendirilmiş ivme-zaman grafikleri sunulmaktadır.





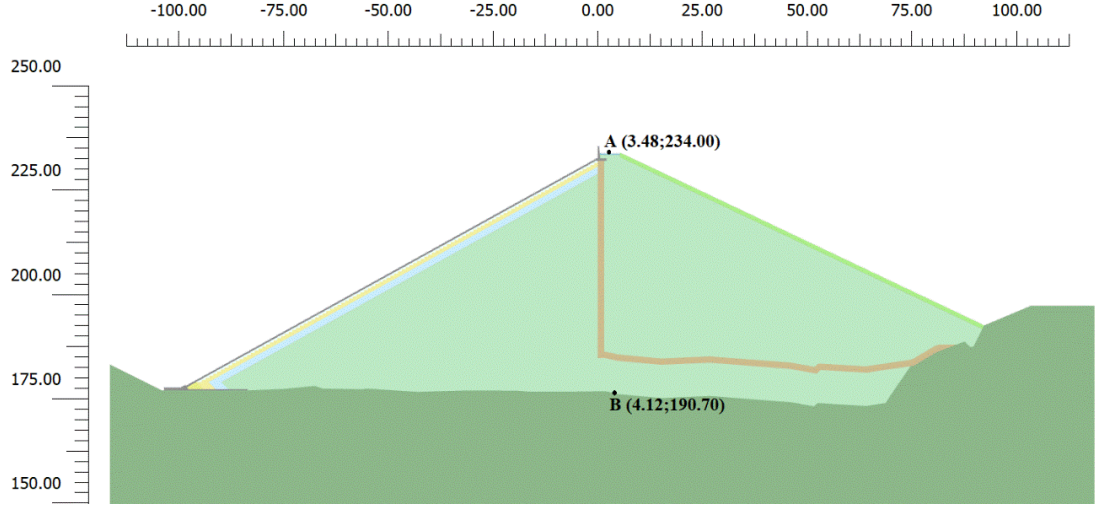
Şekil 2. Depremlerin ölçeksiz ve ölçekli ivme zaman grafikleri (a) Kocaeli Depremi (17.08.1999) – Gebze İstasyonu – 1. Yön; (b) Kocaeli Depremi (17.08.1999) – Gebze İstasyonu – 2. Yön; (c) Kocaeli Depremi (17.08.1999) – İzmit İstasyonu – 1. Yön; (d) Kocaeli Depremi (17.08.1999) – İzmit İstasyonu – 2. Yön; (e) Düzce Depremi (12.11.1999) – IRIGM 496 İstasyonu – 1. Yön; (f) Düzce Depremi (12.11.1999) – IRIGM 496 İstasyonu – 2. Yön

Ölçekleme uygulanan depremlerin ölçeklendirilmemiş spektrum grafikleri, ölçekli spektrum grafikleri ve hedef spektrum grafikleri Şekil 3’ te sunulmaktadır.



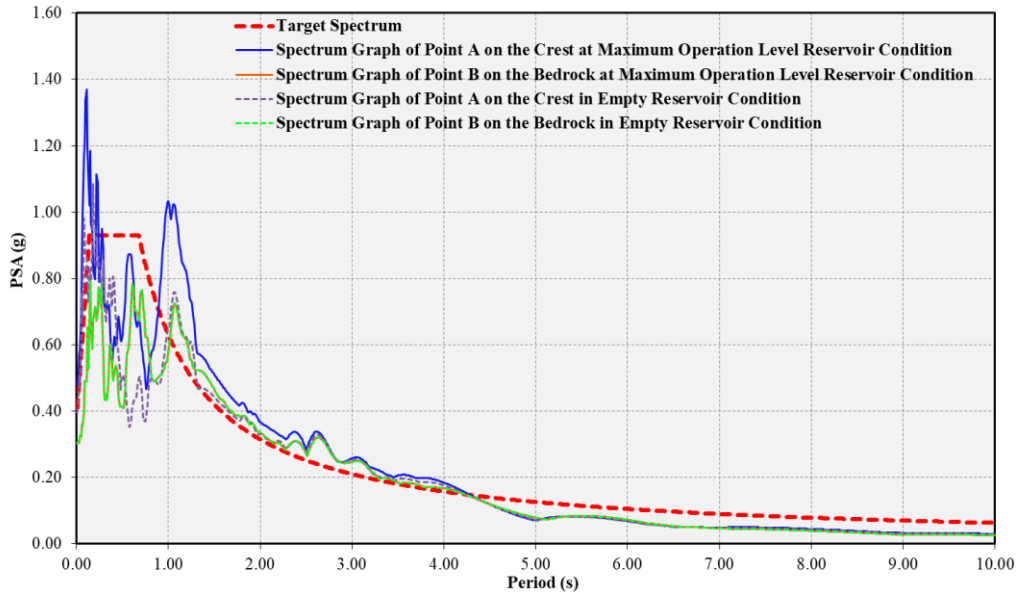
Şekil 3. Ölçekleme uygulanan depremlerin ölçeklenmemiş spektrum grafikleri, ölçekli spektrum grafiği ve hedef spektrum grafiği

Deformasyon ve spektrum grafikleri çizerek değerlendirmeler yapabilmek için, barajın tepe noktasında ve taban kayası üzerinde, barajın orta noktasına (merkezine) denk gelen iki nokta belirlendi. Seçilen noktaların konumları ve koordinatları Şekil 4’ te verilmiştir.



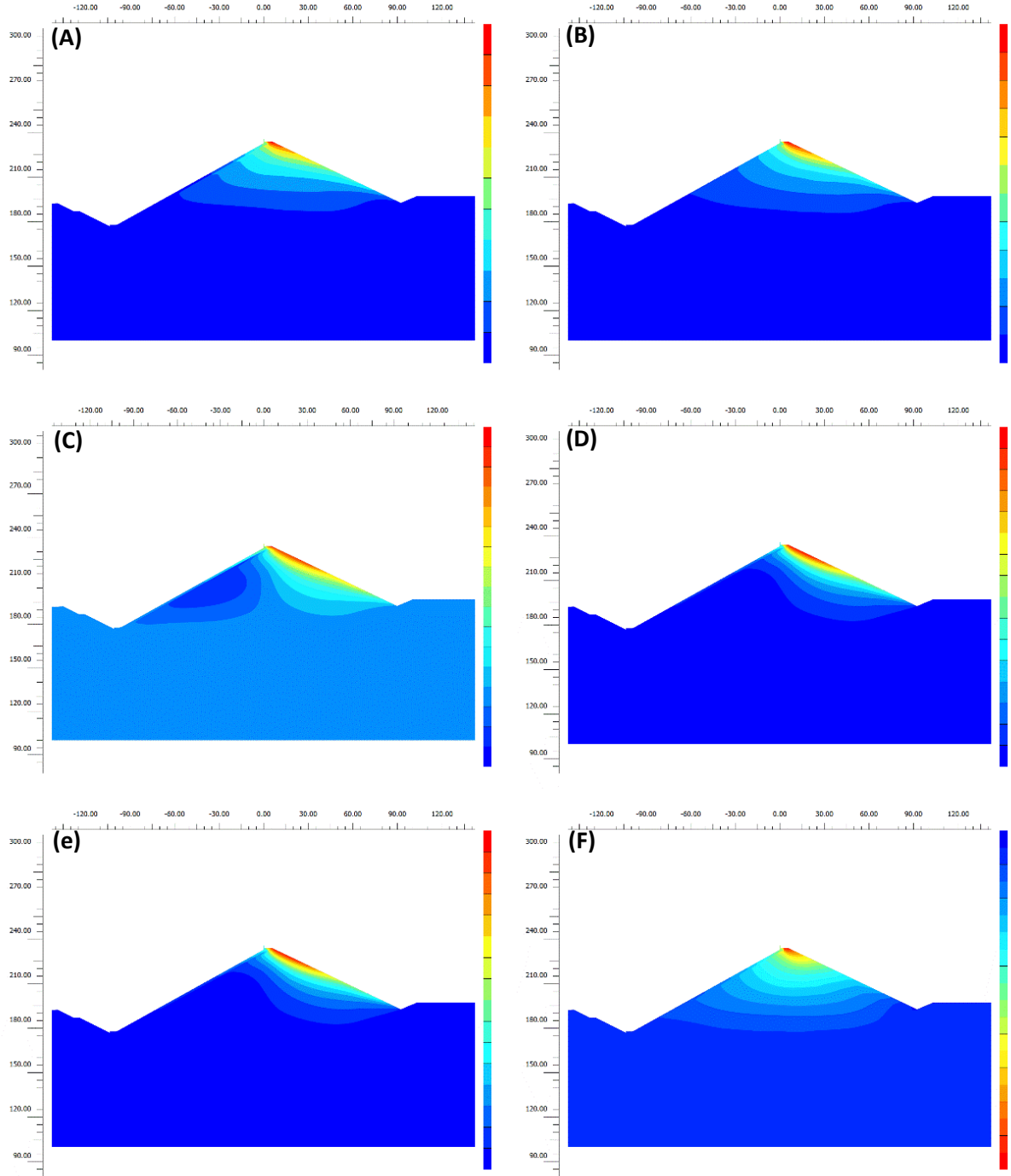
Şekil 4. Barajda grafik çizimlerde kullanılan noktaların yerleri

Barajın dinamik analizleri ölçekli deprem ivmeleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve A ve B referans noktaları için tepki spektrumları analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Tüm hesaplamalarda %5'lik bir sönüm oranı dikkate alınmış ve spektrumlar PLAXIS 2D yazılımı kullanılarak en fazla 10 saniyelik süreler için üretilmiştir. A ve B noktaları için hesaplanan spektrumlar Şekil 15' te sunulmaktadır.



Şekil 5. A ve B noktalarının spektrum grafikleri ve hedef spektrum grafiği

Ölçekli ivme-zaman grafiği kullanılarak boş ve dolu rezervuar durumları için gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda elde edilen deformasyon görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 15. Ölçekli ivme zaman grafiği kullanılarak boş rezervuar ve dolu rezervuar durumları için ayrı ayrı elde edilen deformasyon görüntüleri (a) Boş Rezervuar Durumu için Toplam Yer Değiştirme I_{uI} Hesaplama Sonuçları; (b) Maksimum İşletme Seviyesi Rezervuar Durumu için Toplam Yer Değiştirme I_{uI} Hesaplama Sonuçları; (c) Boş Rezervuar Durumu için x Yön Yer Değiştirme u_x Hesaplama Sonuçları; (d) Maksimum İşletme Seviyesi Rezervuar Durumu için x Yön Yer Değiştirme u_x Hesaplama Sonuçları; (e) Boş Rezervuar Durumu için y Yön Yer Değiştirme u_y Hesaplama Sonuçları; (f) Maksimum İşletme Seviyesi Rezervuar Durumu için y Yön Yer Değiştirme u_y Hesaplama Sonuçları

5. Sonuç ve Öneriler

- Baraj gövdesinde kritik bölgelerde yer değiştirmelerin deprem ivmesine bağlı olarak arttığı, rezervuar dolu iken deformasyonların daha büyük değerlere ulaştığı, zemin–baraj etkileşiminin özellikle temel kayası ile gövde birleşiminde belirleyici olduğu görölmüştür.
- PLAXIS analizleri, deprem senaryolarında barajın kritik bölgelerinde önemli deformasyonların oluşabileceğini göstermektedir.
- Baraj, Geyve Fayına yakınlığı nedeniyle kritik sismik risk taşımaktadır.
- Dinamik analizler, barajın kısa periyotlu depremlere duyarlı olduğunu göstermiştir.
- Maksimum yer deęiřtirmeler baraj kretinde meydana gelmiřtir.
- Dolu rezervuar koşulları, deplasmanları artırmıştır.
- Barajın işletme döneminde düzenli olarak **sismik izleme, deformasyon ölçümleri ve acil eylem planlarının** hazırlanması önerilmektedir.
- Kalıcı deplasmanlar uzun vadeli güvenlik açısından dikkate alınmalıdır.