

ÇETİNTEPE BARAJININ SİSMİK PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSMENT OF ÇETİNTEPE DAM SEISMIC PERFORMANCE

Faik CÜCEOĞLU¹, Seçkin AYDIN²

ÖZET

118 m yüksekliğinde kil çekirdekli membası kum-çakıl ve mansabı kaya dolgu tipindeki Çetintepe Barajının sismik performansı barajın inşaatı aşamasında yakın zamanda güncellenen çalışmalar dikkate alınarak tekrar değerlendirilmiştir. Baraj yeri için güncellenen sismik tehlike analizi neticesinde, Maksimum Tasarım Depremine (MDE) karşılık gelen maksimum yatay yer ivmesi 0.384 g'den 0.49 g'ye yükselmiş ve uygulama aşamasında kaya ocağından elde edilen mansap kabuk malzemesinin dolgu parametreleri revize edilerek baraj gövdesinin dinamik performansı tekrar değerlendirilmiştir. 7 adet farklı deprem ivme-zaman kaydının söz konusu yatay yer ivmesi sağlanacak şekilde ölçeklenerek taban hareketi olarak verildiği analizlerde baraj kret ivmesi ve oluşabilecek kalıcı deplasmanlar irdelenmiştir. Ayrıca, basitleştirilmiş ampirik ve yarı ampirik yöntemler ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sayısal analiz ve bazı basitleştirilmiş yöntemlerin sonuçlarına göre, deprem sonrasında Çetintepe barajında önemli ölçüde kalıcı oturmaların meydana geldiği ancak MDE seviyesi için barajda gerekli duraylılığın sağlandığı ve yeterli hava payının bulunduğu teyit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dolgu Baraj, Sismik Tasarım, Deprem

ABSTRACT

The seismic performance of 118 m high clay core upstream sand-gravel and downstream rockfill type Çetintepe Dam has been re-evaluated by considering the recently updated investigations during the dam's construction. Within the updated seismic hazard analysis for the dam site, the peak horizontal ground acceleration corresponding to the Maximum Design Earthquake (MDE) increased from 0.384 g to 0.49 g. The parameters of downstream shell material obtained from the rock quarry during the dam's construction were revised, and the seismic performance of the dam was reassessed. In the analysis where seven different earthquake acceleration-time records were scaled to the current horizontal ground acceleration and given as base motion, the dam crest acceleration and the predicted permanent displacements were examined. In addition, the results of empirical

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara, faikc@dsi.gov.tr (Sorumlu yazar)

² İnşaat Yüksek Mühendisi, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara, seckinaydin@dsi.gov.tr

and semi-empirical simplified methods and numerical analysis were compared. The numerical analysis results and some simplified methods confirmed that although earthquake-induced significant permanent settlements occurred in Çetintepe dam, the necessary stability and sufficient freeboard were provided for the MDE level.

Keywords: Embankment Dam, Seismic Design, Earthquake

1. GİRİŞ

Çetintepe Barajı ile yardımcı tesisleri Adıyaman ili Gölbaşı ilçesi sınırları içinde Göksu Çayı ile Kapıdere'nin birleşim yerlerinin hemen membasında Çataltepe mevkiinde ve Göksu Çayı üzerindedir (Şekil 1). Adıyaman-Göksu-Araban projesi kapsamındaki Çetintepe Barajı projesi ile Gaziantep ilinin içmesuyu ile yaklaşık 70.000 ha arazinin sulanması şeklindedir.



Şekil 1. Çetintepe Barajı çalışma alanına ait lokasyon haritası

Çetintepe Barajının inşaatı 2014 yılında başlamış ve projesine uygun olarak 2021 yılında gövde dolgusu tamamlanmıştır. Özellikle son yıllarda Doğu Anadolu Fay (DAF) hattı ve çevresinde yaşanan 2017 yılı $M_w=5.5$ Samsat (Adıyaman) depremi ve 2020 yılı $M_w=6.8$ Sivrice (Elazığ) depremleri sonrasında inşaatı devam eden Çetintepe Barajının sahaya özgü sismik tehlike analizinin güncellenmesi ve barajın stabilitesinin güncel malzeme parametreleriyle değerlendirilmesi hasıl olmuştur.

Dolgu barajların sismik tasarımında, basit limit denge analizlerinin yanında gelişmiş gerilme-deformasyon özelliklerinin kullanıldığı ileri sayısal modellere kadar farklılık gösteren yöntemler bulunmaktadır (Fell, 2005). Baraj yerinin yüksek sismisiteli bir bölgede yer alması dolayısıyla, deprem yükleri altında güvenliğinin değerlendirilmesinde daha gelişmiş yöntemlerin kullanılması gerekli görülmüş ve bu dinamik davranışının incelenmesine imkan tanıyacak FLAC programı ile elasto-plastik malzeme özelliklerinin dikkate alındığı 7 adet ivme-zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerle Maksimum Tasarım Depremi (MDE) senaryosunda baraj gövdesi üzerinde oluşabilecek kalıcı kret

deplasmanları ve ivme değişim değerleri sunulmuş ve bu analiz sonuçları literatür değerleriyle kontrol edilmiştir.

Çetintepe Barajı son durumda, statik ve dinamik geleneksel limit denge yöntemleri ile mansap koruyucu örtü ihtiyacına binaen mansap şevi 1D/2.5Y olarak revize edilmiştir ancak bu makalede söz konusu çalışmalar kapsam dışında bırakılmıştır.

2. GÜNCELLENEN ÇALIŞMALAR

2.1. Çetintepe Barajı Sismik Tehlike Analizi Revizyonu

Sismik Tehlike Analizinde amaç, eskiden olmuş deprem olaylarına ait eldeki verileri, jeolojik sismolojik, istatistiksel ve diğer bilgilerle sistematik bir şekilde birleştirerek, zemin hareketi veya deprem büyüklüğüne ilişkin bir parametrenin proje sahasındaki değerinin, öngörülen süre içinde belirli bir düzeyi aşma olasılığı olarak tanımlanmaktadır (Yücemen, 2011).

Doğu Anadolu Fayının tarihsel depremelerine bakıldığında büyük deprem üretme potansiyeline sahip bir tektonik yapıda olduğunu söyleyebiliriz. Çetintepe Barajı lokasyon itibarıyla Arap levhası ile Anadolu bloğu arasında levha sınır niteliğinde olan ve Doğu Akdeniz'in güncel tektoniği ve depremselliğinde önemli yer tutan sol yönlü atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu'na sadece 2.4 km uzaklıkta yer almaktadır.

Çetintepe Barajında sahaya özgü olarak 1984 ve 2009 yıllarında yapılmış olan sismik tehlike analizi değerlendirmeleri, günümüze ait sismik tehlike analiz yaklaşımları ve güncel veriler (Türkiye Diri Fay Haritası (2012), deprem kayıtları (1900-2021) ve güncel azalım ilişkileri) dikkate alınarak revize edilmiştir. Buna göre, baraj yerine 2.4 km mesafede bulunan en kritik sismik kaynak DAF Erkenek segmentinde meydana gelebilecek $M_w=7.3$ büyüklüğünde bir deprem deterministik senaryo olarak seçilmiştir. Bu senaryo için Next Generation Attenuation (NGA) bağıntı modelleri kullanılarak hesaplanan ivme değerlerinin medyan ortalaması (μ) 0.49 g olarak bulunmuştur.

Olasılıksal yaklaşım ile yapılan hesaplamalarda proje yeri ve çevresi için 1 adet arka plan kaynağı 6 adet çizgisel kaynak belirlenerek yapılan çalışmanın sonuçları Tablo 1.'de verilmiştir (Genç, 2021). Bu proje yeri için, 2009 yılı sismik tehlike analiz raporunda MDE için 0.384 g önerilirken, 2021 yılı revize raporda önerilen MDE değeri 0.49 g olarak güncellenmiştir.

Tablo 1. Çetintepe Barajı olasılıksal yöntem ile hesaplanan maksimum ivme değerleri

Geri Dönüş Periyodu (Yıl)	Aşılma Olasılığı	Chiou & Youngs (2014)	Kalkan & Gülkan (2004)	Campbell & Bozorgnia (2014)	Idriss (2008)	Ortalama
144	100 yılda %50	0.10 g	0.14 g	0.10 g	0.14 g	0.12 g
475	50 yılda %10	0.18 g	0.17 g	0.18 g	0.24 g	0.20 g
975	50 yılda %5	0.25 g	0.22 g	0.23 g	0.32 g	0.26 g
2475	50 yılda %2	0.37 g	0.28 g	0.31 g	0.45 g	0.36 g

2.2. Çetintepe Barajı Jeofizik (Sismik) Etüt Çalışmalar

Sismik araştırmalar; zeminde çeşitli enerji kaynaklarıyla yapay olarak oluşturulan sarsıntıların (elastik dalgaların) yer içerisinde yayılırken kırılarak veya yansıyarak geçtikleri

ortamların fiziksel (mekanik) özelliklerini taşıyarak sismik sinyal olarak yeryüzüne gelişlerinin kaydından, daha sonra da bu kayıtların kendine özgü yöntemlerle değerlendirilmesi ve yorumlanması esasına dayanır.



Şekil 2. Çetintepe Barajı Jeofizik (sismik serim) çalışmaları lokasyon haritası

Tablo 2. Çetintepe Barajı sismik serimlere ait dinamik parametreler

Serim No.	Sismik Hız		Kalınlık (m)	Yoğunluk (g/cm ³)	Poisson Oranı	Shear Modülü (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Bulk Modülü (GPa)	
	V _p (m/s)	V _s (m/s)							
Serim 1	V ₁	560	230	3	1.91	0.40	0.101	0.283	0.465
	V ₂	1100	328	12	2.02	0.45	0.217	0.631	2.154
	V ₃	1380	513		2.08	0.42	0.546	1.551	3.225
Serim 2	V ₁	615	280	4	1.92	0.37	0.151	0.413	0.526
	V ₂	890	440		1.98	0.34	0.383	1.025	1.056
Serim 3	V ₁	590	250	10	1.92	0.39	0.120	0.333	0.508
	V ₂	890	310		1.98	0.43	0.190	0.544	1.313
Serim 4	V ₁	575	225	2	1.92	0.41	0.097	0.273	0.504
	V ₂	720	310	10	1.94	0.39	0.187	0.518	0.759
	V ₃	975	407		2.00	0.39	0.330	0.922	1.456

Çetintepe Barajı dinamik analizlerine altlık oluşturması amacıyla baraj gövdesi memba şevinde 1 adet, krette (kil çekirdek üstü) 1 adet, mansap şevinde 1 adet ve hemen mansabında şev topuğunun dayandığı alüvyonda 1 adet olmak üzere toplam 4 adet sismik serim alınmıştır. Sismik Serim çalışmalarının yapıldığı lokasyonlar Şekil 2’de gösterilmiş ve sismik serilerine ait dinamik fiziksel parametreler Tablo 2’de verilmiştir (Görmüş ve Şimşek, 2021).

2.3. Çetintepe Barajı Mansap Dolgusu Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Tasarım aşamasında Çetintepe Barajı mansap kabuk dolgusu kaya dolgu olarak öngörülmüştür, ancak kaya ocağındaki (Şekil 3-a) kireçtaşları fayın etkisi ile oldukça hırpalanmış ve kırılmış olduğundan işletme sırasında istenilen kaya dolgu gradasyonunda malzeme elde edilemediği görülmüştür (Şekil 3-b). Kaya ocağından elde edilen malzeme üzerinde elek analizi deneyleri yapılmış ve Şekil 4'te verilen grafikte olduğu gibi Numune 1 ve numune 2'yi genel olarak karakterize edersek %12-%33 aralığında kum, %52-%64 aralığında çakıl ve %15-%24 aralığında kaya ufağı dane çapına sahip olduğu görülmektedir.

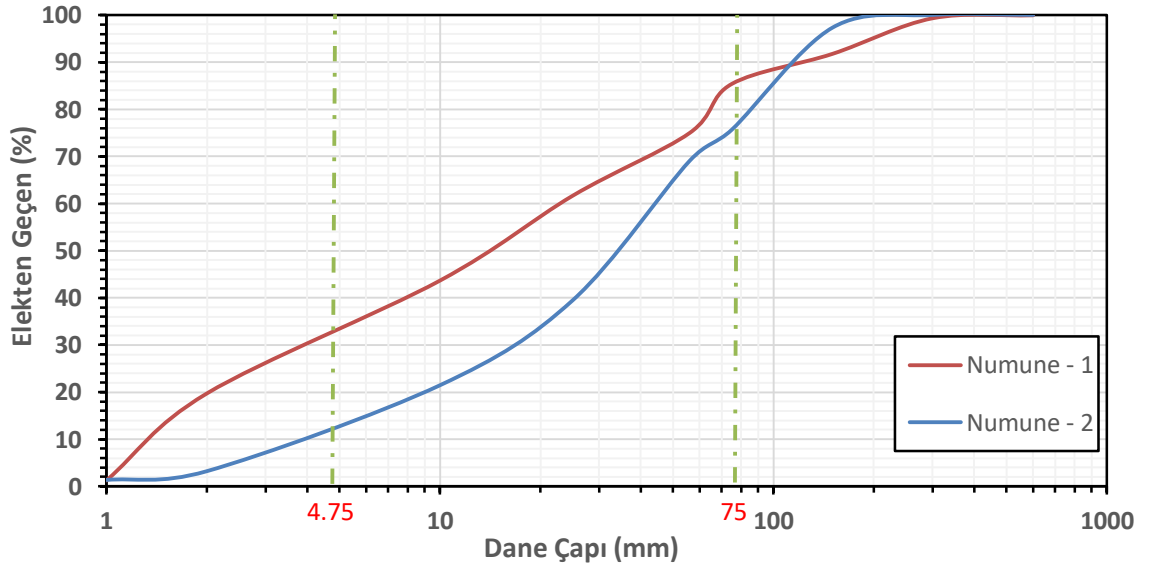


(a)



(b)

Şekil 3. Çetintepe Barajı (a) kaya ocağından bir görünüm, (b) mansap dolgusuna ait bir görünüm



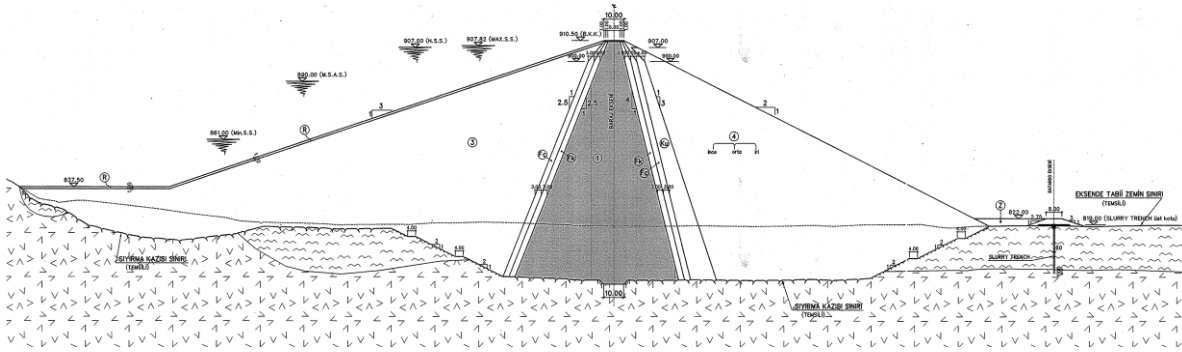
Şekil 4. Çetintepe Barajı mansap dolgusuna ait elek analizi sonuçları

Numune 1 ve numune 2 için üniformalık katsayıları (c_u) sırasıyla 17.5 ve 11.3 olarak hesaplanırken süreklilik katsayıları (c_c) 0.64 ve 1.61 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ışığında; numune 1 kötü derecelenmiş çakıl ve numune 2 ise iyi derecelenmiş çakıl olarak sınıflandırılmıştır.

3. BARAJA AİT KARAKTERİSTİKLER, SAYISAL MODEL, SEÇİLEN MALZEME PARAMETRELERİ VE DİNAMİK YÜKLER

3.1. Baraj Gövde Karakteristikleri

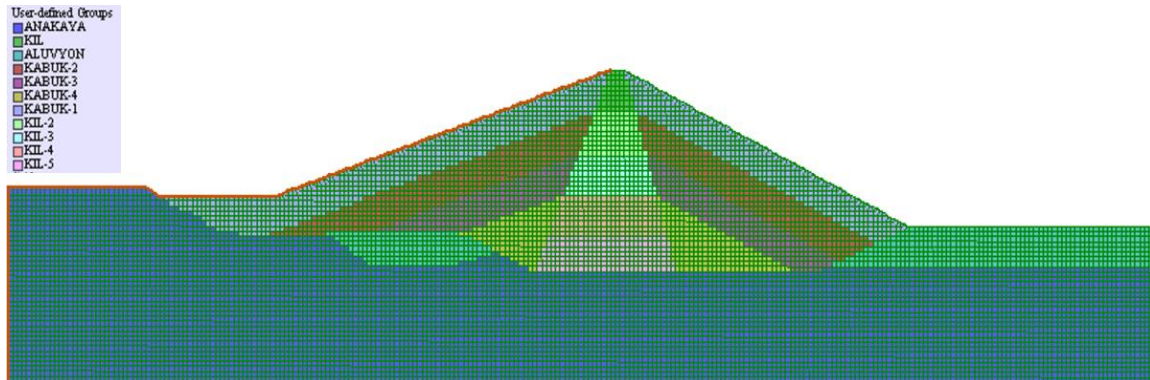
Çetintepe barajı maksimum kesitte 118 m yüksekliğinde kil çekirdekli membası kum-çakıl mansabı kaya dolgu tipinde tasarlanmıştır. Baraj 10 m kret genişliğine sahiptir. Nehir yatağını kesen maksimum enkesit Şekil 5'te verilmiştir. Tasarım aşamasında geleneksel limit denge stabilite hesapları sonucunda memba eğimi 1D/3Y, mansap şevi ise 1D/2Y olarak projelendirilmiştir. Maksimum su seviyesi ile kret kotu arasındaki hava payı 2.7 metredir. Barajın memba dolgusunun bir kısmı ile mansap dolgusunun topukta dayandığı yaklaşık 30 m'lik şev alüvyon üzerinde bırakılmıştır.



Şekil 5. Çetintepe Barajı maksimum gövde enkesiti

3.2. Sayısal Model

Barajın nonlinear deprem davranışı belirleyebilmek amacıyla, özellikle toprak dolgu barajların sismik davranışının incelenmesinde geniş kullanım alanı bulan sonlu-farklar metodunun kullanıldığı FLAC bilgisayar programı kullanılmıştır. Yapılan analizlerde baraj gövdesi içerisinde yer alan filtreler modelin sadeliği açısından modele dahil edilmemiştir. Baraj memba-mansap kabuk dolguları ve kil çekirdek dinamik parametrelerinin kayma dalgası hızının derinliğe bağlı olarak artan şekilde değişimini göz önüne almak için kabuklar 4, kil çekirdek ise 5 ayrı bölgede modellenmiştir.



Şekil 6. Çetintepe Barajı sonlu-fark modeli

Malzeme parametreleri, baraj yerinde gerçekleştirilen geoteknik ve jeofizik araştırmaların sonuçlarına göre belirlenmiştir. Analizde kullanılan sonlu-farklar ızgarası Şekil 6'da

gösterilmektedir. Model 11.925 adet elemana bölünmüş ve modelin sağ ve sol yanları, sınır koşulların sistemin dinamik davranışına olan etkisinin azaltmak amacıyla memba ve mansap doğrultusunda baraj yüksekliğinin iki katı aynı şekilde temel doğrultusunda da yüksekliği iki katı olacak şekilde seçilmiştir. Model tabanı ve model yanlarından deprem dalgasının yansımaları önlemek için taban sessiz sınır yanlar ise free-field olarak atanmıştır. Dinamik analizde model içerisinde yayılan dalganın sayısal olarak bozulmasını önlemek için, modelde kullanılan sonlu-fark ızgarasındaki maksimum eleman boyutu, giriş dalgasının en yüksek frekans bileşeninin dalga boyunun yaklaşık onda biri ile sekizde birinden daha küçük olacak şekilde 3 m olarak ayarlanmıştır (Kuhlemeyer ve Lysmer, 1973).

3.3. Malzeme Parametreleri ve Sönüm

Malzemenin gerilme-deformasyon davranışı, Mohr-Coulomb yenilme kriterinin kullanıldığı elastik-tam plastik malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Modelde zonlarının kayma rijitliği ilk 27 m lik tabakaları için arazide kabuk dolgular ve kil çekirdek üzerinde yapılan sismik kayma dalgası hızlarından tespit edilmiş alt tabakalar ise Seed ve Idriss (1970) tarafından önerilen ve aşağıda verilen formül kullanılarak gerilmeye bağlı olarak hesaplanmıştır.

$$G_{max} = 1000 * K_{2max} * \sqrt{\sigma'_m} \quad (1)$$

Yukarıdaki formülde, G_{max} (kPa) maksimum dinamik kayma modülünü, σ'_m (kPa) ortalama efektif gerilmeyi ve K_{2max} ise dönüştürme katsayısını göstermektedir. Bu değer kum-çakıl dolgu için 85 kil dolgu için 33 olarak alınmıştır. Ana kaya için kayma modülü sabit alınmıştır.

Tablo 3. Statik ve dinamik malzeme parametreleri

Zon Adı	Statik Parametreler					Dinamik Parametreler					
	ρ (kg/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	E_{sta} (MPa)	ν	k (m/s)	V_{s30} * (m/s)	G_{max} (MPa)	E_{din} (MPa)	K (MPa)	Yenilme Kriteri
Kil çekirdek	1700	15	20	40	0.40	4E-07	250	190	540	1313	Mohr- Coulomb
		↓ 25					↓ 350	↓ 659	↓ 1900	↓ 4553	
Kum-çakıl kabuk zonları	2000	0	42	70	0.30	2E-02	300	356	980	1250	Mohr- Coulomb
			↓ 32	↓ 80			↓ 450	↓ 927	↓ 2500	↓ 3300	
Alüvyon	1900	0	30	30	0.30	2E-05	200	110	280	240	Mohr- Coulomb
							↓ 500	↓ 600	↓ 1550	↓ 1300	
Anakaya	2200	100	38	1400	0.25	1E-06	800	1400	3600	2500	Elastik

* Modelde 27 m derinlikteki ilk tabakanın dinamik parametreleri için kullanılmıştır.

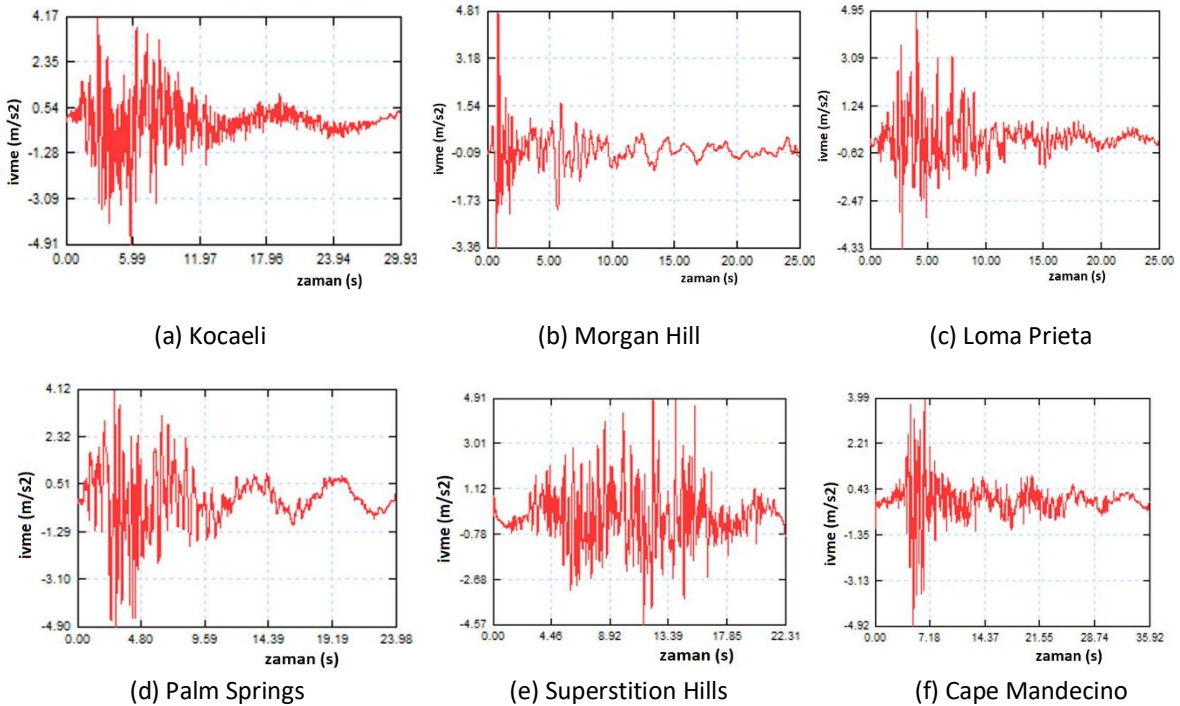
Tasarım aşamasında kaya dolgu olarak planlanan mansap kabuğunun yukarıda verildiği üzere kum-çakıl vasfında elde edilmesi ve elek analizi sonuçlarından kötü derecelenmiş granüler malzeme sınıflandırılmalarının çıkması üzerine dolguya ait kayma mukavemet parametreleri tekrar değerlendirilmiştir. İyi derecelenmiş granüler dolgu malzemelerinin kötü derecelenmiş dolgu malzemesine kıyasla büyük daneler arasındaki boşlukları iyi doldurması ve daha sıkı bir yapıda olmaları sebebiyle kaymaya karşı daha yüksek kesme dayanımı göstermektedir (Duncan vd., 2014). Bu sebeple; kayma dayanım-effektif normal gerilme yenilme zarfı revize edilerek içsel sürtünme açısı üst katmanda 42° ve yüksek normal gerilmenin olduğu alt katmanda ise 32° olarak tanımlanmıştır. Memba ve mansap her iki kabuk zonu için aynı özellikler alınmıştır. Analizlerde kullanılan statik ve dinamik malzeme parametreleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

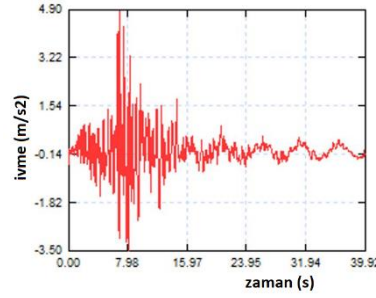
Seed ve Idriss (1970) gibi araştırmacılar tarafından yapılan dinamik tekrarlı yük deneyleri, artan kayma birim deformasyonuna bağlı olarak zeminlerin tanjant kayma modülünün azaldığını ve sönümlemenin arttığını göstermekte, bu deneylerin sonuçları göz önüne alınarak farklı zemin türleri için modül azaltma ve sönümleme eğrileri önerilmektedir. Bu eğriler, genellikle eşdeğer doğrusal metodlar kullanılarak, sismik yükleme sırasında sönümleme ve rijitlik azalımının tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, elasto-plastik bir malzeme modeli kullanılmış olup, enerji harcanması esasen gerilmelerin dayanım sınırlarına ulaşmasıyla birlikte başlayan plastik akma ile gerçekleşmektedir.

Zaman tanım alanında çalışan bilgisayar programlarında en sık kullanılan yöntem olan Rayleigh sönümlemesinde, sönümleme matrisi kütle ve rijitlik matrislerinin istenilen sönüm oranına göre seçilen katsayılar ile çarpılarak toplanması suretiyle elde edilmektedir. Hesaplamalarda, küçük birim deformasyonlar ve elastik sınırlar içerisinde %0.2 oranında Rayleigh sönümlemesi uygulanmış, yenilmenin başlamasıyla birlikte sönümleme Mohr-Coulomb malzeme modeline göre oluşan plastik birim deformasyonlar ile kontrol edilmiştir. Dinamik analizlerde Rayleigh sönümünde merkezi frekans olarak kullanmak amacıyla barajın dolu durumu için modal analiz yapılarak barajın esas titreşim periyodu 0.95 sn olarak elde edilmiştir.

3.4. Dinamik Yükler

Dinamik analizlerde kullanılmak üzere sahayı temsil eden B grubu kaya yada kaya benzeri formasyonlar üzerinde alınmış 7 adet ivme kaydı seçilmiş ve bu kayıtlar MDE=0.49 g olacak şekilde sismik risk analiz raporunda verilen sahaya özgü hedef spektrum kullanılarak ölçeklenmiştir. Analizlerde yatay ivme kaydının 2/3'ü düşey ivme kaydı olarak modele uygulanmıştır. Şekil 7'de ölçeklenmiş 7 adet ivme kayıtları görülmektedir. Gereğinden fazla küçük sonlu-fark ızgarası boyutunun önüne geçebilmek amacıyla analizlerde kullanılan ivme kayıtlarında 10 Hz.in üzerindeki yüksek frekanslı bileşenler filtrelenmiştir.



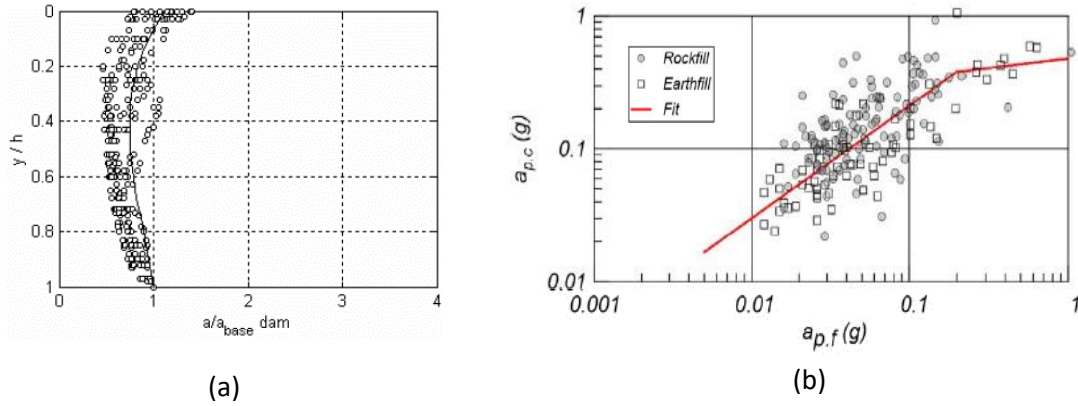


(g) Northridge

Şekil 7. Sahaya özgü hedef spektrumu ile ölçeklenmiş MDE ivme kayıtları

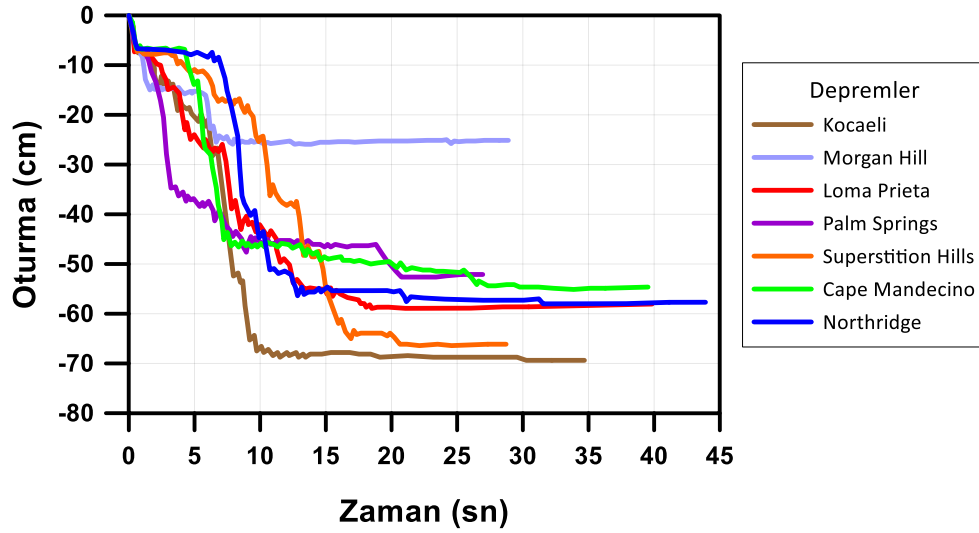
4. ANALİZ BULGULARI VE TARTIŞMA

Deprem altında dolgu barajlarda baraj kret ivmelerinin taban ivmesine göre değişimi için Kavruk (2003) tarafından yapılan çalışmada $PGA \geq 0,42$ $T \geq 0,75$ sn için baraj kretinde tabandaki ivmenin çok artmadığı hatta Şekil 8(a)'da görüldüğü şekilde azalabildiği belirlenmiştir. Ayrıca, Park ve Kishida (2019) çalışmasında Japon barajları deprem kayıtlarını kullanarak 0.2 g taban ivmesinin alt ve üst sınırı için iki farklı bağıntı ortaya önermişler ve 0.49 g taban ivmesi için bu bağıntı 0.45 g kret ivmesi hesaplamaktadır. 7 adet MDE kaydı için yapılan sayısal dinamik analizler sonucunda elde edilen kret ivmeleri 0.49 g taban ivmesi için 0.40 g – 0.45 g arasında elde edilen ivmeler Tablo 4'te özetlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen kret ivme sonuçlarının Kavruk (2003) ve Park ve Kishida (2019) çalışmaları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Şekil 8. (a) Kavruk (2003) $PGA \geq 0,42$ $T \geq 0,75$ sn için taban ivmesinin baraj boyunca değişimi (b) Park ve Kishida (2019) taban ivmesinin krette değişimi

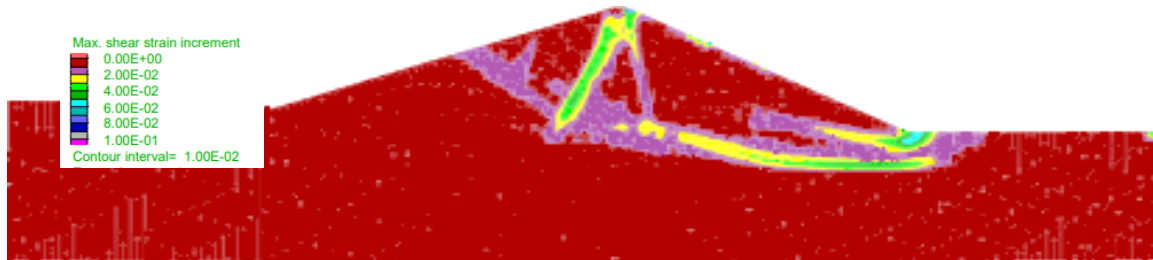
Tablo 4. Maksimum kret ivmeleri ve deprem sonrası kalıcı kret oturmaları

	Depremler						
	Kocaeli	Morgan Hill	Loma Prieta	Palm Springs	Superstition Hills	Cape Mendocino	Northridge
Maksimum Kret ivmesi (g)	0.41	0.42	0.43	0.43	0.40	0.45	0.43
Kalıcı Oturma (cm)	69.4	25.1	58.1	52.1	66.1	54.6	57.7
Ortalama							54.7

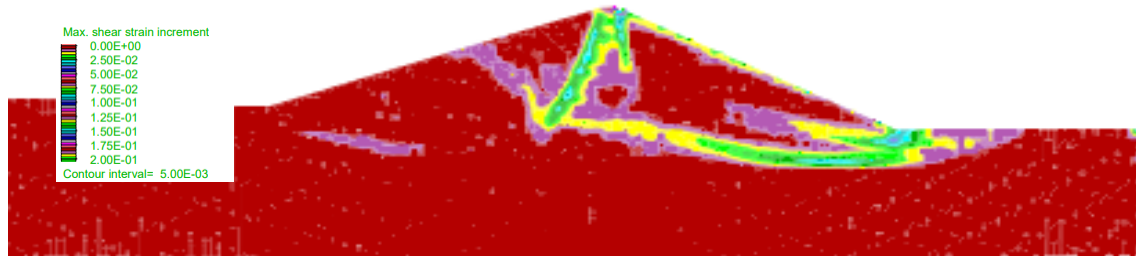


Şekil 9. Deprem sırasında kret oturmasının zamana bağlı değişimi

Analiz depremleri altında baraj kretinde meydana gelen kalıcı oturma miktarları Tablo 4’te özetlenmiş ayrıca kret oturmasının zamana bağlı değişimi Şekil 9’da verilmiştir. Kocaeli depreminde maksimum oturma 69.4 cm olarak meydana gelmiş olup tüm depremlerin ortalaması 54.7 cm olarak kayda geçmiştir. Örnek olarak Kocaeli ve Northridge depremleri süresince baraj gövdesinde zorlanan bölgeleri gösteren maksimum kayma birim deformasyon dağılımı sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir. Açıkçası barajın deformasyon davranışının belirgin bir kayma yüzeyinin yanında depremin farklı anlarında akış yukarı ve akış aşağı bölgelerinde biriken plastik deformasyonlarada bağlı olduğunu göstermiştir.



Şekil 10. Kocaeli depremi sırasında baraj gövdesinin maksimum kayma birim deformasyon dağılımı



Şekil 11. Northridge depremi sırasında baraj gövdesinin maksimum kayma birim deformasyon dağılımı

Yarı ampirik yöntemlerden Makdisi ve Seed (1978) ve Bray and Travasarou (2007), ampirik yöntemlerden Bureau (1997) ve Pells ve Fell (2003) kullanılarak yapılan hesaplamalardan Makdisi ve Seed (1978) ve Bray and Travasarou (2007) MDE seviyesindeki böyle bir yer

ivmesi (PGA=0.49 g) için çok düşük sonuçlar vermiş, diğer yöntemler yaklaşık olarak sayısal analizlerden gelen kalıcı oturma mertebeleriyle örtüşmektedir. Sadece basitleştirilmiş yöntemler ile kalıcı deplasman hesaplandığı durumlarda bunu birden fazla yöntem ile kontrol edilmesi bu sebeple önem arz etmektedir. Ampirik ve yarı ampirik yöntemlerden elde edilen tüm sonuçlar ve kabuller Tablo 5'te özetlenmiştir.

Tablo 5. Ampirik ve yarı ampirik yöntemler ile deprem sonrası kalıcı kret oturma tahminleri

	Makdisi ve Seed (1978)*	Bureau (1997)	Swaigood (2003)	Pells ve Fell (2003)**	Bray and Travarasrou (2007)***
Kalıcı	< 0.1 ($a_y=0.17$ g, $y/h=1$)				
Oturma	0.26 ($a_y=0.24$ g, $y/h=0.49$)	90	49.7	59-177	5.2
(cm)	3.9 ($a_y=0.3$ g, $y/h=0.21$)				

$M_w=7.3$ olarak kabul edilmiştir.

* Kret ivmesi için sayısal analiz sonuçlarından gelen 0.45 g kullanılmıştır.

** 3 no'lu hasar bölgesinde kret oturmasının baraj yüksekliğinin %0.5-%1.5'i arasındadır.

*** 7 depremin ortalaması verilmiştir.

5. SONUÇLAR

Merkezi kil çekirdekli dolgu tipindeki Çetintepe Barajının yeri için maksimum yer ivmesinin MDE=0.49 g olarak güncellenmesinin üzerine barajda yapılan jeofizik araştırmalar ve mansap dolgu malzemesinin parametrelerinin değerlendirilmesinin akabinde baraj gövdesinin sismik duraylılığı ve kalıcı oturmaların tahmin edilebilmesi amacıyla farklı ivme-zaman tanım alanında doğrusal olmayan gerilme-deformasyon özellikleri dikkate alınarak FLAC programı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Barajda maksimum taban yer ivmesinin yüksek olduğu durumlarda kret ivmesinin amplifike olmak yerine azaldığı ortaya konulmuş ve literatür çalışmalarıyla sonuçlar doğrulanmıştır. Gerçekleştirilen analizler neticesinde en büyük oturmanın Kocaeli depreminde 69.4 cm olarak hesaplanmış ve 7 depremin ortalaması için bu sonuç 54.7 cm olarak bulunmuştur. Basitleştirilmiş yöntemler ile sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında Makdisi ve Seed (1978) ve Bray and Travarasrou (2007) çok düşük sonuçlar vermiş ancak diğer kullanılan yöntemler yaklaşık olarak beklenen kalıcı deplasmanları vermişlerdir.

Bu sonuçlara göre; deprem sonrasında Çetintepe barajında önemli ölçüde kalıcı oturmaların meydana geldiği ancak MDE seviyesi için barajda gerekli duraylılığın sağlandığı ve suyun kreti aşmaması için yeterli hava payının bulunduğu teyit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Çetintepe Barajı projesinin hayata geçmesinde en büyük emeği olan Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığına, Jeoteknik Hizmetler ve YAS Dairesi Başkanlığına ve DSİ 20. Bölge Müdürlüğü ile projelendirilmesinden inşaatına kadar emeği geçen herkese katkılarından dolayı teşekkürü borç biliyoruz.

KAYNAKLAR

Bray, J. D., & Travarasrou, T. (2007). Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 133(4), 381-392.

- Bureau, G. (1997). Evaluation methods and acceptability of seismic deformations in embankment dams. In *Transactions of the International Congress on Large Dams* (Vol. 2, pp. 175-200).
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087-1115.
- Chiou, B. S. J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117-1153.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons.
- Fell, R. (2005). *Geotechnical engineering of dams*. CRC press.
- Genç, M. (2021). Çetintepe Barajı Sismik Tehlike Analizi Raporu. DSI Kurum içi yayınlanmamış Rapor.
- Görmüş, H., & Şimşek, H. (2021). Çetintepe Barajı Jeofizik (Sismik) Etüt Raporu. DSI Kurum içi yayınlanmamış Rapor.
- Idriss, I. M. (2008). An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes. *Earthquake spectra*, 24(1), 217-242.
- Itasca Consulting Group, Inc. 2011. *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 7.0 User's Guide, Dynamic Analysis*. Minneapolis: Itasca.
- Kalkan, E., & Gülkan, P. (2004). Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey. *Earthquake Spectra*, 20(4), 1111-1138.
- Kavruk, F. M. (2003). *Seismic behavior of embankment dams* (Master's thesis, Middle East Technical University).
- Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5), 421-427.
- Makdisi, F.I. & Seed, H.B. 1978. Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake induced deformations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104: 849-867.
- Park, D., & Kishida, T. (2019). Seismic response of embankment dams based on recorded strong-motion data in Japan. *Earthquake Spectra*, 35(2), 955-976.
- Pells, S. & Fell, R. 2003. Damage and cracking of embankment dams by earthquake and the implications for internal erosion and piping. *Proceedings 21st International Congress on Large Dams, Montreal, ICOLD, Paris Q83-R17. International Commission on Large Dams, Paris*.
- Seed, H.B. & Idriss, I.M. 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Earthquake Engineering Research Center (EERC), University of California, Berkeley, Report No. EERC 70-10.
- Swaigood, J. R. (2003, February). Embankment dam deformations caused by earthquakes. In *Pacific conference on earthquake engineering* (Vol. 14).
- Yücemen, M. S. (2011, Ekim 11-14). Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi: Genel Bakış ve İstatistiksel Modellemede Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar. 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı. ODTÜ, ANKARA, TURKEY.