HİDROLİK DOLGU BİR BARAJIN SİSMİK ANALİZİ

E. Yıldız[1] ve A. F. Gürdil[2]

[1] *Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş.*
[2] *Dr. İnşaat Yüksek Mühendisi, Temelsu Uluslararası Müh. Hiz. A.Ş.*
Email: ersan.yildiz@temelsu.com.tr; gurdil@temelsu.com.tr

ÖZET:

Bu çalışmada, Kuzey Tacikistan'da Sri-Derya Nehri üzerinde hidrolik dolgu olarak inşa edilen Kayrakkum Barajı'nın sismik duraylılık ve deformasyon değerlendirmesi amacı ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Yaklaşık 27 metre maksimum yüksekliğe sahip 1200 metre uzunluğundaki baraj gövdesi nehir tabanından alınan ince kum ve siltli gereç ile hidrolik dolgu olarak inşa edilmiştir. Anakaya üzerinde yaklaşık 10 m derinliğinde alüvyon üzerine oturan barajın akış yukarı ve akış aşağı kenarlarında granüler dolgu ve kaya dolgu topuklar yer almaktadır. Baraj yeri için yapılan sismik tehlike analizi neticesinde 150, 5 000 ve 10 000 yıl tekrarlanma süresine sahip depremler için maksimum yatay yer ivmesi değerleri sırasıyla 0,25g, 0,67g ve 0,78g olarak belirlenmiştir. Söz konusu yüksek ivme değerleri göz önüne alınarak, barajın deprem performansının değerlendirmesinde, basitleştirilmiş yöntemlerin (eşdeğer statik, Makdisi-Seed) yanı sıra, doğrusal olmayan gerilme-deformasyon özelliklerinin, gerilme-su basıncı bağıl ilişkisinin ve sıvılaşmaya bağlı kayma dayanımı azalımının modellenebildiği zaman-tanım alanında analizlerin yapılması gerekli görülmüştür. Bu amaçla, özellikle toprak dolgu barajların sismik davranışının incelenmesinde geniş kullanım alanı bulan sonlu farklar metodunun kullanıldığı FLAC bilgisayar programı kullanılmıştır. Malzeme parametreleri, baraj yerinde gerçekleştirilen geoteknik ve jeofizik araştırmaların sonuçlarına göre belirlenmiştir. Bahsi geçen farklı yer hareketi seviyeleri için tasarım spektrumları oluşturulmuş, bu spektrumlara uygun 3'er adet farklı deprem kaydı, gerçek deprem kayıtlarından türetilerek analizlerde taban hareketi olarak kullanılmıştır. Analizlerden elde edilen kalıcı deformasyonlar, 150 yıl tekrarlanma süresi olan İşletme Esaslı Deprem (OBE) seviyesi için barajda yeterli hava payının bulunduğunu göstermiştir. Maksimum Tasarım Depremi (MDE) için kullanılabilecek 5 000 ve 10 000 yıllık deprem yüklemesi sonucunda ise meydana gelen deplasmanlar kabul edilebilir limitlerin üzerinde çıkmış, barajda MDE seviyesi için gerekli emniyetin sağlanamadığını, yeterli hava payının bulunmadığını ve güçlendirmenin gerekli olduğu belirlenmiş ve bu doğrultuda öneri güçlendirme projeleri geliştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Hidrolik Dolgu Baraj, Sismik Tasarım, Deprem

1. GİRİŞ

Kayrakkum Barajı, Özbekistan'dan gelerek Tacikistan sınırları içerisinde Kayrakkum Rezervuarı'nı geçtikten sonra tekrar Özbekistan sınırları içerisine akan Sri-Derya Nehri üzerinde bulunmaktadır. İnşası 1952 ile 1959 yılları arasında gerçekleştirilen barajın maksimum yüksekliği 27 m, kret uzunluğu 1200 m ve göl hacmi 3131 milyon m^3'dür. Hidrolik dolgu olarak inşa edilen barajın orta bölümü geçirimsizliğin sağlanarak sızmanın azaltılması amacı ile ince kum ve siltli malzemeden oluşmakta, orta bölüme destek sağlanması için yanlarda daha iri daneli granüler dolgu; akış yukarı ve akış aşağı dış bölgelerinde ise kaya dolgu topuklar yer almaktadır. Baraj gövdesi, ana kaya üzerinde yer alan ve kalınlığı yaklaşık 10 m olan alüvyon üzerine oturmaktadır.

Kayrakkum Barajının sismik duraylılığı "Kayrakkum Barajı ve Rezervuarının Deprem Emniyetinin Artırılması ve Baraj İşletmesinin İyileştirilmesi Müşavirlik Hizmetleri İşi" kapsamında incelenmiştir. Baraj yerinin yüksek sismisiteli bir bölgede yer alması dolayısıyla, deprem güvenliğinin değerlendirilmesinde daha gelişmiş

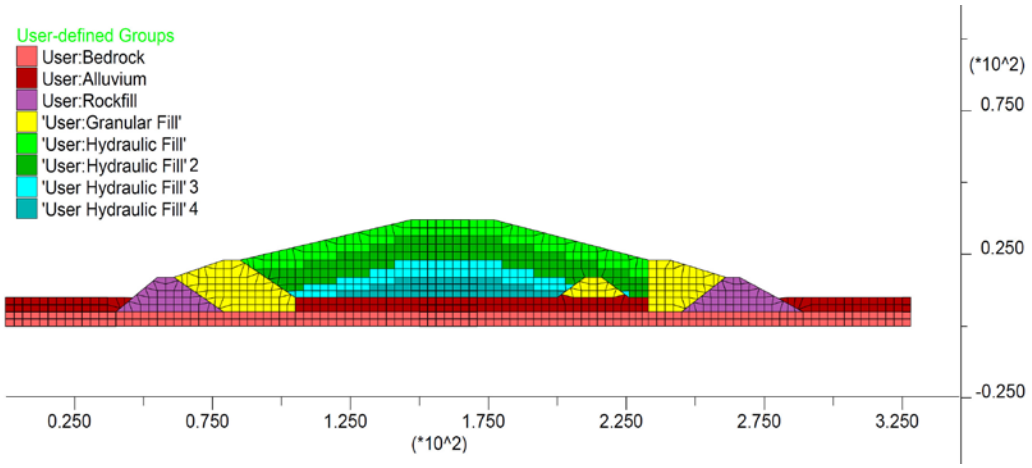
yöntemlerin de kullanılması gerekli görülmüş; dolgu barajların dinamik davranışının incelenmesinde geniş kullanım alanı bulan FLAC programı ile zaman-tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Barajın deprem güvenliğinin incelenmesinde birlikte kullanılan eşdeğer statik veya eşdeğer doğrusal yöntemler ile yapılan ön çalışmalar bu bildiri kapsamı dışında tutulmuş, gerçekleştirilen sonlu farklar analizleri ile ilgili detaylı bilgi verilerek elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Fotoğraf 1. Kayrakkum Barajı ve Hidroelektrik Santralı

2. PROBLEM TANIMI

2.1. Geometri ve Model

Baraj yüksekliğinin maksimum olduğu kesit göz önüne alınarak oluşturulan ve hesaplamalarda kullanılan sonlu farklar modeli Şekil 1'de sunulmaktadır. Baraj gövdesi için, projeye bağlı kalınarak hidrolik dolgu, temel alüvyonu, granüler dolgu topuk, kaya dolgu topuk ve temel kayası olmak üzere 5 farklı malzeme zonu dikkate alınmıştır. Riprap tabakası inceliği nedeniyle analiz sonuçlarında önemli bir fark yaratmayacağından, sonlu farklar ağında basitleştirme yapılarak modelde ihmal edilmiştir. 30 m kret genişliğine sahip barajın hidrolik dolgu olarak teşkil edilen şevlerinde 1D/4Y, granüler malzemenin oluşturduğu şevlerde 1D/3Y ve kaya dolgu topuklarda 1D/2Y şev eğimi verilmiştir. Gövdenin hidrolik dolgu olarak imal edilen orta bölümü yaklaşık 10 m kalınlığında alüvyon tabakasına oturmaktadır. Akış yukarısı ve akış aşağısı bölgelerinde yer alan granüler dolgu ve kaya dolgu altında yer alan alüvyon tabakası temizlenerek, bu tabakaların ana kaya üzerine oturması sağlanmıştır. Maksimum yükseklik temelden itibaren yaklaşık 27 m'dir.



Şekil 1. Sonlu Farklar Ağı

2.2. Malzeme Özellikleri

Sonlu farklar analizlerinde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Hidrolik dolgu için kullanılan birim hacim ağırlık ve içsel sürtünme açısı parametreleri, geoteknik araştırmalarda elde edilen ortalama değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Hidrolik dolgu ve temel kayası için maksimum kayma modülü (G_{max}) yerinde belirlenen kayma dalgası hızları göz önüne alınarak tayin edilmiştir. Yapılan jeofizik çalışmada, hidrolik dolgu tabakası için ortalama kayma dalgası hızı Vs = 300 m/s olarak ölçülmüştür. Kayma dalgası hızının derinliğe bağlı olarak artan şekilde değişimini göz önüne almak için hidrolik dolgu zonu 4 tabakaya ayrılarak bu tabakalar için yüzeyden aşağıya doğru ortalama hız aynı kalacak şekilde Vs = 225, 275, 325 ve 375 m/s hızları kabul edilmiştir. Temel kayası için kayma dalgası hızı jeofizik araştırma sonuçlarına göre Vs=550 m/s olarak alınmıştır. Diğer zonların kayma dalgası hızları, benzer zeminler için tipik değerler göz önüne alınarak tayin edilmiştir.

Yerinde yapılan deneyler, hidrolik dolgunun permeabilitesinin 3,1 ile 4,3 m/gün arasında değiştiğini göstermektedir. Permeabilite katsayısı 4 m/gün kabul edilerek ve dolgudaki potansiyel anizotropinin dikkate alınabilmesi amacı ile, yatay permeabilitenin düşey permeabiliteye oranı, Sherard vd. (1963) tarafından uniform zemin çökelleri için önerildiği şekilde 25 olarak alınarak yatay ve düşey permeabilite katsayıları hesaplanmış ve yapılan sızma hesaplarında göz önüne alınmıştır.

Dolgu barajın doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışı, tüm zonlar için, Mohr-Coulomb yenilme kriterinin dikkate alındığı elastik-tam plastik malzeme modeli kullanılarak hesaba katılmıştır. Ayrıca analizlerde göz önüne alınan histeretik sönümleme – modül azaltma yöntemi ile dinamik su basınçlarının hesabı ve buna bağlı sıvılaşma davranışının modellenmesi ile ilgili bilgiler bölüm 2.4'de sunulmaktadır.

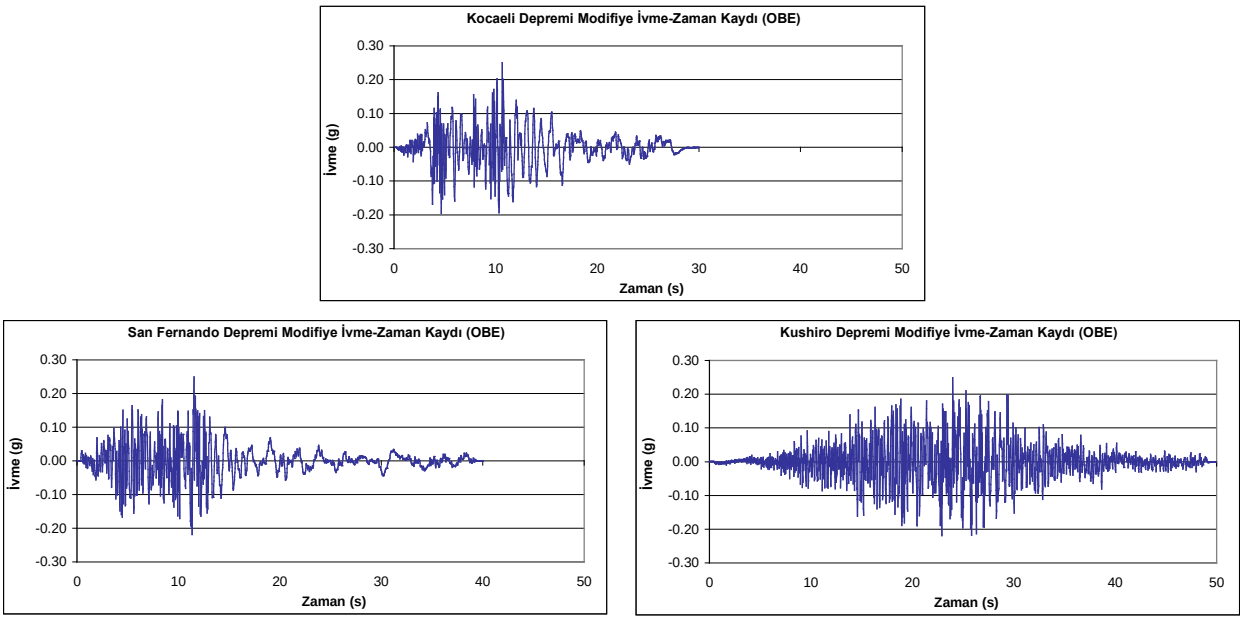
Tablo 1. Malzeme Parametreleri

	γ_{dry}	γ_{sat}	c'	ϕ'	V_s	G_{max}	ν	k_h	k_v
	(kN/m^3)	(kN/m^3)	(kPa)	(der.)	(m/s)	(MPa)	-	(cm/s)	(cm/s)
Hidrolik Dolgu	16	20,0	-	30	225 ~375 (ort. 300)	81~225	0,25	2×10^{-2}	9×10^{-4}
Alüvyon	17	20,5	-	32	400	725	0,33	10^{-2}	10^{-2}
Granüler Dolgu	18	21,0	-	36	450	970	0,33	5×10^{-2}	5×10^{-2}
Kaya Dolgu	20	22,5	-	42	500	1330	0,33	10^{-1}	10^{-1}
Temel Kayası	22	23,5	50	30	550	1600	0,20	10^{-5}	10^{-5}

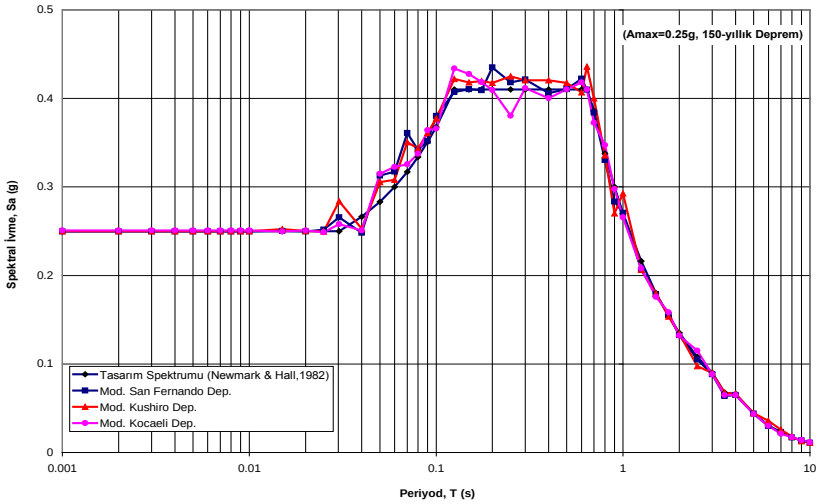
2.3. Yükleme Durumları

Baraj yerinin sismisitesi incelenmiş ve farklı deprem tekrarlanma sürelerine karşılık gelen sismik tasarım parametreleri, gerçekleştirilen olasılıksal sismik tehlike analizi ile değerlendirilmiştir. Buna göre, maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri 150, 5 000 ve 10 000 yıl geri dönüş süreleri için sırasıyla 0,25 g, 0,67 g ve 0,78 g olarak belirlenmiştir. Barajın deprem performansının değerlendirilmesinde, OBE için 150 yıllık deprem, MDE için ise 5 000 ve 10 000 yıllık depremler göz önüne alınmıştır.1985 yılında, rezervuar seviyesi kret kotunun yaklaşık 13 m altındayen baraj yerinde meydana gelen M_w=6.5 büyüklüğündeki deprem, santral binasının ikinci ve üçüncü katlarındaki betonarme elemanlarında kesmeye bağlı çatlaklara neden olmuş, transformatörlerin devrilmesi gibi hasarlar meydana gelmiştir.

Sismik tasarımda kullanılmak üzere, elastik tasarım spektrumları Newmark ve Hall (1982) tarafından önerilen yöntemle, yukarıda belirtilen maksimum yer ivmeleri kullanılarak her bir deprem tekrarlanma süresi için oluşturulmuştur. Tepki spektrumlarının belirlenmesinde sönüm oranı, baraj tipinin toprak dolgu olması dikkate alınarak %10 kabul edilmiştir. Kullanılan sonlu farklar programında, deprem yüklemesi modele tabandan uygulanan ivme-zaman kayıtları ile gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, baraj dinamik hesaplarında yukarıda açıklanan tasarım spektrumlarına uygun yer hareketlerinin kullanılması yaklaşımı benimsenmiştir. Bu amaçla, San Fernando – 1971, Kushiro – 1993 ve Kocaeli – 1999 olmak üzere seçilen 3 adet orijinal yer hareketi uyarlanarak frekans içeriğinin tasarım spektrumu ile uyumlu hale gelmesi sağlanmıştır. Örnek olarak, OBE yüklemesi için uyarlanan yer hareketi kayıtları Şekil 2'de, bu yer hareketlerinin ivme spektrumları ise tasarım spektrumu ile birlikte Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 2. Dinamik Analizlerde Kullanılan İvme-Zaman Kayıtları (OBE)



Şekil 3. Deprem Kayıtlarının İvme Spektrumları (OBE)

Toprak dolgu barajlar için yapılan doğrusal olmayan analizlerde, deprem hareketinin uygulanmasından önce başlangıç gerilme durumunun ve su basınçlarının doğru bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla, iki farklı aşamada gerçekleştirilen statik gerilme ve sızma analizi sonuçları birleştirilerek deprem öncesi efektif gerilme ve su basıncı dağılımı elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra, yer hareketinin model tabanına uygulanması ile deprem yüklemesi gerçekleştirilmiştir.

2.4. Sönümleme ve Dinamik Su Basıncı Oluşumu

Analizlerde, artan kayma birim deformasyonuna bağlı olarak malzemenin sönüm oranındaki artışı ve kayma rijitliğindeki azalmayı dikkate alan histeretik sönümleme yöntemi kullanılmıştır. Sadece doğrusal elastik sınırlar içerisinde aktif olan histeretik sönümleme, yenilme durumunda devre dışı kalmakta ve esas olarak akma sırasındaki plastik birim deformasyonlar sönümlemeyi kontrol etmektedir. Histeretik sönümleme ile ilgili detaylı bilgi Itasca (2008)'de bulunabilir.

Yapılan hesaplamalarda, tüm baraj zonları için gerilme-sızma bağıl ilişkisi dikkate alınmış, deprem esnasında oluşan ek su basınçlarının dağılımı, verilen permeabilite katsayılarının dikkate alındığı sızma hesaplamaları ile modellenmiştir.

FLAC programında, boşluk suyu basınçları, mekanik yükleme sonucunda boşluk hacminde meydana gelen değişmeye bağlıdır. Potansiyel olarak sıvılaşabilir olarak değerlendirilen hidrolik dolgu için bir yarı-bağıl (semi-coupled) sıvılaşma modeli olan Finn-Byrne modeli kullanılmıştır. Söz konusu modelde, kayma birim deformasyonuna (γ) bağlı meydana gelen hacimsel birim deformasyondaki azalma, $\Delta\varepsilon_{vd}$, aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2 \frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma}) \quad (1)$$

Yukarıdaki formülde, C_1 ve C_2 model sabitleri olup, C_2, $0.4/C_1$ olarak, C_1 ise rölatif sıkılığa bağlı olarak aşağıdaki şekilde önerilmektedir.

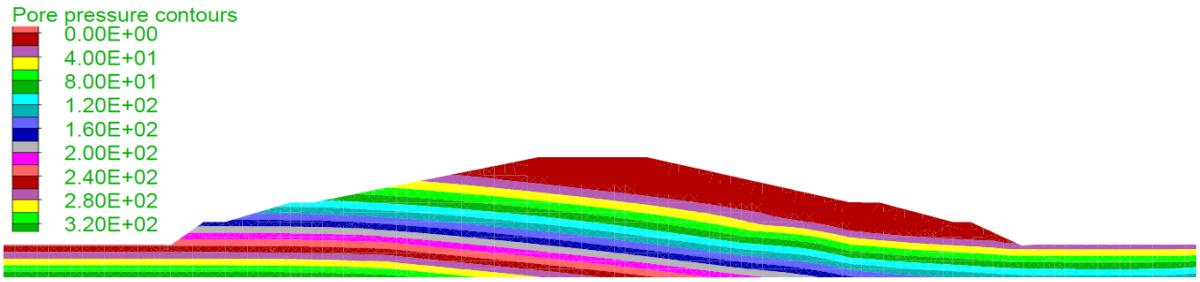
$$C_1 = 7600(D_R)^{-2.5} \quad (2)$$

Sadece zeminin rölatif sıkılığı kullanılarak, yukarıdaki bağıntılar yardımı ile tekrarlı kayma birim deformasyonuna bağlı ek su basınçları ve buna bağlı olarak efektif gerilme ve malzemenin dayanımındaki azalmalar hesaplanabilmektedir. Gerçekleştirilen arazi ve laboratuar deneylerinde hidrolik dolgunun rölatif sıkılığı kesin bir şekilde belirlenememiş, bu nedenle %40 ve %50 olmak üzere iki farklı rölatif göz önüne alınmıştır. Dinamik su basınçları ve sıvılaşma modeli ile ilgili detaylı bilgi Itasca (2008)'de bulunabilir.

3. ANALİZ SONUÇLARI

3.1. Başlangıç Durumu

Baraj zonlarının efektif gerilmeye bağlı dayanıma sahip olan elasto-plastik malzemeler olarak modellendiği analizlerde, öncelikle deprem yüklemesi öncesindeki başlangıç gerilme durumu belirlenmiştir. Kret seviyesi 351,5 m olan barajın işletme durumu için akış yukarı ve aşağı su seviyeleri sırasıyla 347,5 m ve 327,5 m alınmış ve yeraltı suyu sızma analizi yapılarak freatik hat bulunmuştur. Elde edilen su basınçları, statik gerilme analizi sonuçları ile birleştirilerek dinamik hareket öncesi efektif gerilme dağılımı elde edilmiştir. Başlangıç durumu su basıncı dağılımı Şekil 4'de verilmektedir.



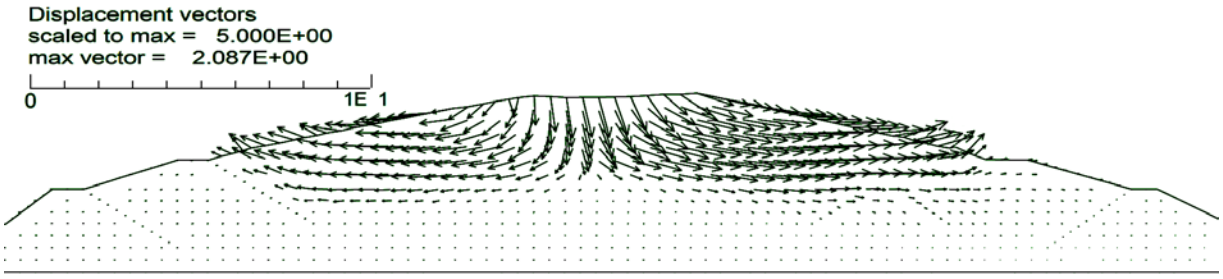
Şekil 4. Başlangıç Su Basıncı Dağılımı

3.2. OBE Yüklemesi

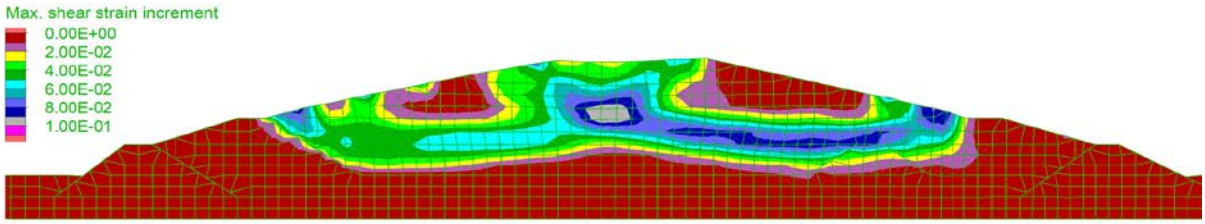
OBE yüklemesi için daha önce belirtilen 3 farklı deprem kaydı kullanılarak yapılan analizler neticesinde, özellikle hidrolik dolgudan oluşan orta bölümde kalıcı deformasyonlar meydana gelmiş, ancak deprem sonunda barajın duraylılığı korunmuştur. Yapılan tüm analiz sonuçlarının bildiri kapsamında sunulması mümkün olmadığından, örnek olarak aşağıda en kritik sonuçların elde edildiği Kushiro depremi ve Dr=%50 rölatif sıkılık için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 8'de kret oturmasının zamana bağlı değişimini gösteren eğri, deprem esnasında dayanım sınırlarının aşılması nedeniyle deplasmanların meydana geldiğini, ancak deprem sonunda oturmaların tamamlandığını ve sistemin dengeye ulaştığını göstermektedir. Kret oturması, Dr = %40 rölatif sıkılık için 1,3-1,6 m arasında, Dr = %50 rölatif yoğunluk için ise 1,1-1,25 m arasında elde edilmiştir. Burada, her iki rölatif yoğunluk durumu için aynı dayanım parametreleri kullanılmış, dolgunun rölatif sıkılığının, sadece dinamik su basınçlarını etkilemesine rağmen farklı oturmalara neden olduğu görülmüştür. Bu durum hidrolik dolgu için kullanılan sıvılaşma modelinin etkisini göstermektedir.

Şekil 5'de gösterilen kalıcı deformasyon vektörlerinden görüleceği gibi, akış yukarı ve akış aşağı yönlerindeki tekrarlı yer hareketleri sırasında, her iki yöne doğru plastik deformasyonlar oluşmakta ve barajın oturmasına da esasen dışa doğru meydana gelen bu deformasyonlar neden olmaktadır. Deprem sonunda kayma birim deformasyonların verildiği Şekil 6, yenilme mekanizmasının depremin farklı anlarında çeşitli bölgelerde meydana gelen akmalar nedeniyle her iki yöne doğru geliştiğine işaret etmektedir.

Bu seviyede bir depremde, göreceli olarak daha sağlam olan topuklarda dayanım sınırlarına ulaşılmamış, topuklar hidrolik dolguya gerekli desteği sağlayarak deplasmanların artmasını önlemiştir. Meydana gelen kalıcı deplasmanların ve oturmanın ana sebebi, zayıf dayanımlı hidrolik dolguda dinamik su basınçlarının da etkisiyle oluşan geçici yenilmelerdir.

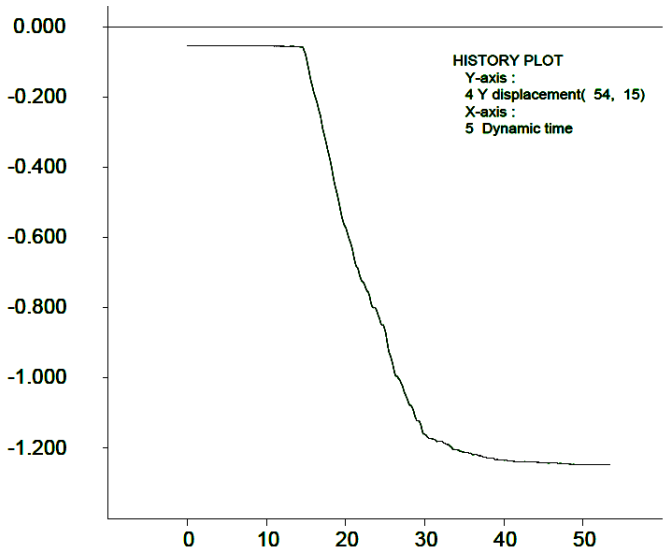


Şekil 5. Kalıcı Deformasyon Vektörleri (OBE)



Şekil 6. Deprem Sonu Kayma Birim Deformasyonları (OBE)

Elde edilen kalıcı oturmalar, hava payının yaklaşık 1/3'ü mertebelerinde olup, bu seviyede bir oturma (0 – 5 ft) DSOD(California Department of Water Resources) tarafından kabul edilebilir olarak değerlendirilmektedir.



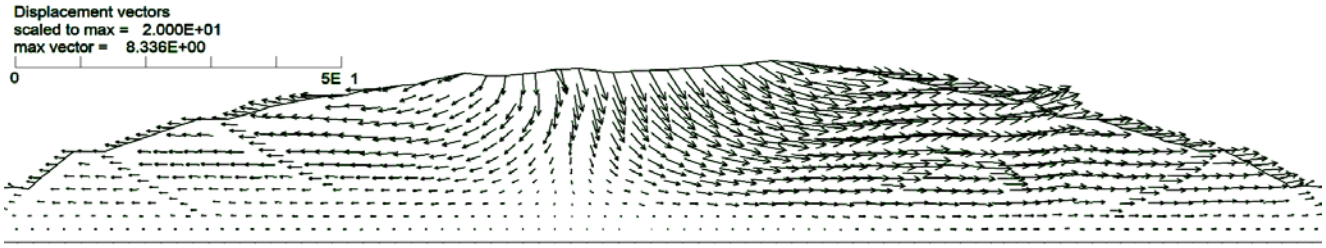
Şekil 7. Kret Oturmasının Zamana Bağlı Değişimi (OBE)

3.3. MDE Yüklemesi

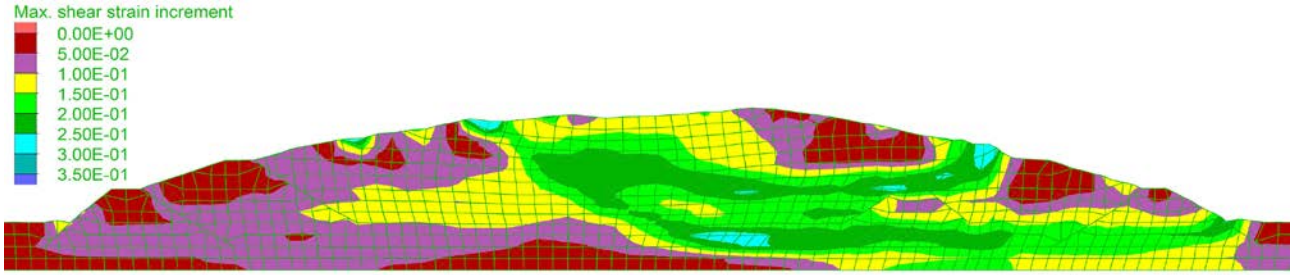
Bölüm 2.3'de açıklandığı üzere, MDE yüklemesi için 5 000 ve 10 000 yıl tekerrür sürelerine sahip depremler dikkate alınmıştır. 5 000 yıllık deprem için PGA=0,67 g kullanılarak Kushiro depremi için Dr=%40 kabul edilerek yapılan analizde, hidrolik dolgunun akış aşağısında meydana gelen plastik deformasyonlar, sonlu farklar ağı geometrisinin limitlerin üzerinde aşırı bozulmasına neden olmuş ve analiz durmuştur. Bu durumda son adımdaki deplasmanlar ve kayma birim deformasyonları incelendiğinde hidrolik dolgunun %40 rölatif sıkılığa sahip olması durumunda, öngörülen 5 000 yıllık bir depremde duraylılığını yitireceği sonucuna varılmıştır. Aynı maksimum yer ivmesi ve Dr=%50 için kret oturması 3,3-3,75 m arasında hesaplanmış olup, bu oturmalar barajın mevcut 4 m'lik hava payına çok yakındır.

5 000 yıllık depremde %40 rölatif sıkılık için barajın duraylılığının sağlanamaması nedeni ile 10 000 yıllık depremde sadece %50 rölatif sıkılık dikkate alınmıştır. Sonuçlara örnek olarak verilen aşağıdaki grafiklerde Kushiro depremi için yapılan analiz kullanılmıştır. Şekil 10'da verilen kret oturmasının zamana bağlı değişiminden görüleceği gibi, deprem sonunda sistem dengeye gelerek barajın duraylılığı sağlanmıştır. Şekil 8'de verilen kalıcı deformasyon vektörleri ve Şekil 9'da gösterilen kayma birim deformasyonlarının işaret ettiği üzere, bu seviyede bir depremde granüler dolgu ve kaya dolgu topuklar dahil olmak üzere tüm barajda dayanımlar geçici olarak aşılmakta, meydana gelen plastik deformasyonlar, özellikle barajın akış aşağı tarafında

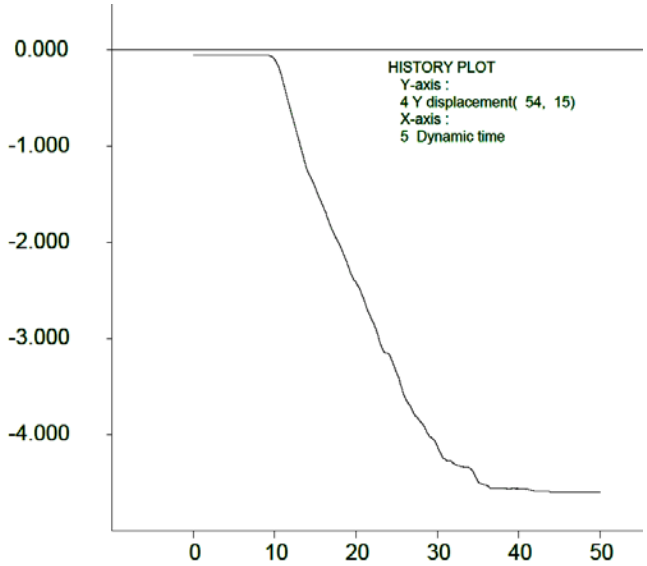
büyük deplasmanlara neden olmaktadır. Kayma birim deformasyonları, akış aşağı yönünde hidrolik dolgu içinden ve alüvyon ve topuklar altından geçen iki farklı ana yenilme mekanizmasını göstermektedir.



Şekil 8. Kalıcı Deformasyon Vektörleri (MDE)



Şekil 9. Deprem Sonu Kayma Birim Deformasyonları (MDE)



Şekil 10. Kret Oturmasının Zamana Bağlı Değişimi (MDE)

Kocaeli depremi için elde edilen 3,55 m'lik kret oturması hava payına oldukça yakındır. San Fernando ve Kushiro deprem kayıtları kullanılarak yapılan hesaplamalarda oturmalar hava payının üzerinde sırasıyla 4,2 m ve 4,6 m olarak belirlenmiş olup, 10 000 yıllık bir depremde işletme durumunda rezervuar suyunun barajı aşacağını ve buna bağlı olarak barajın yıkılacağını göstermektedir.

Yukarıda elde edilen sonuçlar, MDE seviyesi için barajın deprem güvenliğinin yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum göz önüne alınarak, hidrolik dolgunun akış yukarısı ve akış aşağısı bölgelerinde güçlendirme alternatifleri önerilmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hidrolik dolgu tipindeki Kayrakkum Barajı'nın dinamik duraylılığı ve kalıcı oturmalar, doğrusal olmayan gerilme-deformasyon özellikleri, gerilme-sızma bağıl davranışının göz önüne alındığı ve hidrolik dolgu için tekrarlı kayma birim deformasyonlarının yaratacağı dinamik su basınçlarını dikkate alan bir sıvılaşma modelinin kullanıldığı zaman-tanım alanında analizler ile değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, 150 yıl dönüş süresine sahip işletme esaslı depremde (OBE) hava payının yeterli olduğunu göstermiştir. Maksimum tasarım depremi (MDE) için kabul edilen 5 000 ve 10 000 yıl dönüş süreli depremler için elde edilen kalıcı deplasmanlar kabul edilebilir sınırların üzerinde çıkmış ve barajın deprem güvenliğinin yetersiz olduğu görülmüştür.

Bu bağlamda baraj gövdesinin güçlendirilmesi uygun bulunmuş ve öneri tasarımlar geliştirilmiştir. Akış yukarısı şevinde, derinlik, çap ve aralıkları detaylı hesaplamalarla kesinleştirilecek olan taş kolonların yapılması önerilmiştir. Taş kolonlar gerek hidrolik dolgunun sıkılaşmasını ve kayma dayanımının artmasını sağlayacak, gerekse drenaj işlevini yerine getirecektir.

Barajın akış aşağısı tarafındaki hidrolik dolguda ise, tüm şevde benzer şekilde taş kolonların yapılması veya belli bir yüksekliğe kadar hidrolik dolgunun kaldırılarak yerine kontrollü granüler dolgu yapılması alternatifleri ileriki safhalarda yapılacak detaylı güçlendirme çalışmaları için öneri olarak sunulmuştur.

KAYNAKLAR

Beaty, M.H., ve Perlea, V.G. (2011). Several Observations on Advanced Analyses with Liquefable Materials. *31st Annual USSD Conference*, San Diego, California, April 11-15,2011

Bureau, G.J. (2003). Dams and Appurtenant Facilities. Earthquake Engineering Handbook, Chapter 26, Chen W. And Scawthorn C. ed., CRC Press.

Newmark, N. M., ve Hall, W. J. (1982). Earthquake Spectra and Design, *Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records*, Vol 3, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA

Itasca Consulting Group, Inc. (2008). FLAC ver 6.0 User's Guide, Dynamic Analysis, Minneapolis:Itasca.

Sherard, J. L., Woodward, R. J., Gizienski, S. F., and Clevenges, W. A. (1963). Earth and Earth-Rock Dams, John Wiley & Sons, New York.