# YÜKSEK SİSMİSİTELİ BİR BÖLGEDE 170 METRE YÜKSEKLİĞİNDEKİ BİR KAYA DOLGU BARAJIN DİNAMİK TASARIMI

**E. Yıldız[1] ve R. Güner[2]**

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

## ÖZET

170 m yüksekliğinde kil çekirdekli kaya dolgu bir barajın deprem davranışı, FLAC programı ile gerçekleştirilen zaman-tanım alanında analizler ile incelenmiştir. Baraj gövdesi altında ana kaya üzerinde yaklaşık 20 m kalınlığında bir alüvyon tabakası yer almaktadır. Baraj yeri için Maksimum Tasarım Depremine (MDE) karşılık gelen maksimum yatay yer ivmesinin PGA = 0,65 g gibi oldukça yüksek sayılabilecek bir değer olması göz önüne alınarak, analizlerde gerilme-su basıncı bağıl ilişkisi kullanılmış, alüvyon malzemenin deprem sırasındaki muhtemel kayma dayanımındaki azalma, Finn-Byrne sıvılaşma modeli kullanılarak dikkate alınmıştır. Kocaeli depremi ivme-zaman kaydının söz konusu maksimum yatay yer ivmesi sağlanacak şekilde ölçeklenerek taban hareketi olarak verildiği analizlerde, alüvyon dışında kalan malzemeler için doğrusal olmayan gerilme-deformasyon davranışı Mohr-Coulomb yenilme kriteri ile modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar, deprem esnasında ve sonrasında barajda gerekli duraylılığın sağlandığını ancak deprem sonunda önemli ölçüde kalıcı oturmalar meydana geleceğini göstermiştir. Baraj gövdesi altında yer alan alüvyon tabakasının kaldırılması, meydana gelen kalıcı deplasmanları önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu bağlamda, kret oturmasının proje hava payından daha küçük ve kabul edilebilir bir değere düşürülebilmesi amacı ile alüvyon tabakasının kaldırılması gerekli görülmüştür. Baraj gövdesinin deprem sırasındaki davranışının, eşdeğer statik veya Makdisi-Seed metodu gibi basitleştirilmiş yöntemlerde kabul edilen tek bir kayma düzlemine bağlı olmadığı, deprem esnasında akış aşağı ve akış yukarı şevlerin muhtelif bölgelerinde oluşan kalıcı plastik deformasyonların deprem davranışını belirlediği gözlenmiştir. Barajın kalıcı oturması ayrıca, baraj yeri için deprem büyüklüğü ve maksimum yatay yer ivmesinin göz önüne alındığı ampirik yöntemler ile de irdelenmiş, elde edilen oturma değerlerinin, zaman-tanım alanında yapılan analizler ile hesaplanan oturmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER :** Kaya Dolgu Baraj, Sismik Tasarım, Deprem

## 1 GİRİŞ

Dolgu barajların sismik tasarımında, basit limit denge analizlerinden gelişmiş gerilme-deformasyon özelliklerinin kullanıldığı karmaşık nümerik modellere kadar farklılık gösteren metodlar kullanılmaktadır (Fell vd., 2005). Dinamik kuvvetlerin, kayma kütlesinin ağırlığı ile bir sismik katsayının çarpımı ile elde edilen atalet kuvvetleri olarak temsil edildiği eşdeğer statik yöntem, dolgu barajların sismik duraylılığında kullanılan en basit yaklaşımdır. Pells ve Fell (2003) ve Swaisgood (2003) gibi araştırmacılar tarafından önerilen ampirik yöntemler, deprem yüklemesine maruz kalmış barajlarda oluşan deformasyonların istatistiksel olarak değerlendirilmesine dayanarak, dolgu barajların deprem davranışının tahmin edilmesine yöneliktir. Makdisi ve Seed (1978), Newmark kayma bloğu yaklaşımını göz önüne alarak, dolgu barajların kalıcı deplasmanlarının belirlenebilmesi için çok sayıda eşdeğer doğrusal analiz sonucuna dayanan ve geniş kabul gören basitleştirilmiş bir yöntem geliştirmiştir. QUAD4M (Hudson vd., 1994) gibi sonlu elemanlar programlarının kullanıldığı eşdeğer doğrusal analizlerde, baraj ve temelini oluşturan malzemelerin kayma birim deformasyonu ile değişen rijitlik ve

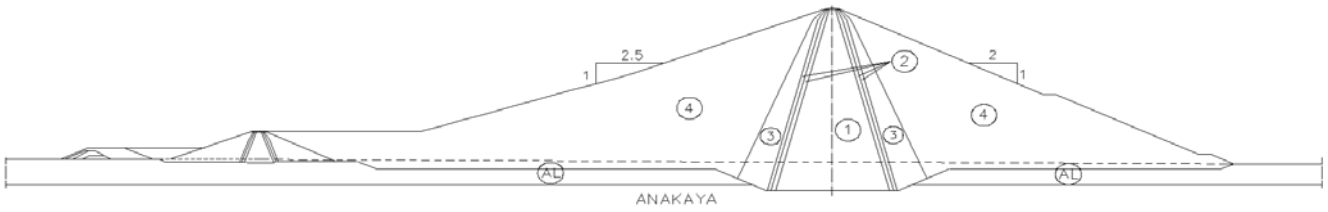
sönümleme karakteristikleri iterasyonlar ile göz önüne alınabilmektedir. Son yıllarda, bilgisayar ve bilgisayar programlarındaki gelişmeler, özellikle yüksek sismisiteli bölgelerde ve sıvılaşmanın söz konusu olduğu hallerde, dolgu barajların dinamik performansının incelenmesinde doğrusal olmayan metodların tercih edilmesine olanak tanımıştır. Genellikle sonlu elemanlar veya sonlu farklar programlarının kullanıldığı söz konusu yöntemlerde gövde ve temel zemininin elasto-plastik gerilme-deformasyon davranışı modellenebildiği gibi, bağıl yöntemler kullanılarak deprem esnasında oluşan ek su basınçları ve davranışa etkisi tahmin edilebilmektedir.Bahsi geçen yöntemler ile ilgili detaylı bilgi Marcuson vd. (2007), Fell vd. (2005) ve Bureau (2003) gibi referanslarda verilmektedir.

Bu çalışmada, yüksek seviyede yer hareketine maruz bir kil çekirdekli kaya dolgu barajın dinamik duraylılık ve deformasyon değerlendirmesi için FLAC programı ile gerçekleştirilen, elasto-plastik malzeme özellikleri ve dinamik su basıncı oluşumunun dikkate alındığı zaman tanım alanında analizler sunulmaktadır. Barajın deprem tasarımında birlikte kullanılan eşdeğer statik ve eşdeğer doğrusal analizler bildiri kapsamı dışında tutulmuştur.

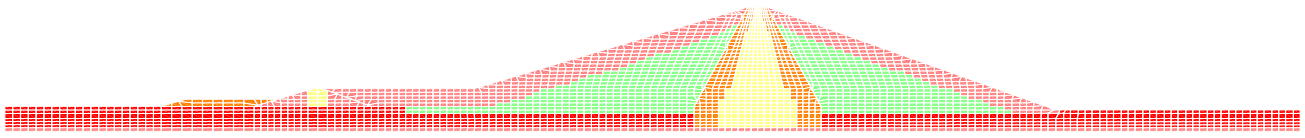
## 2 PROBLEM TANIMI

### *2.1 Geometri ve Model*

Çalışma konusu baraj maksimum kesitte 170 m yüksekliğinde merkezi kil çekirdekli kaya dolgu tipinde olup, 10 m kret genişliğine sahiptir. Akış aşağı ve akış yukarı şevleri sırasıyla 1D/2,5Y ve 1D/2Y olarak tasarlanmıştır. Maksimum işletme durumunda rezervuar su seviyesi kretin 5 m altındadır. Hesaplamalarda kullanılan maksimum baraj kesiti Şekil 1'de gösterilmiştir. Baraj gövdesi kil çekirdek (1 numaralı zon), 2 ve 3 numaralı geçiş zonları ve kaya dolgu kabuktan (4 numaralı zon) oluşmaktadır. Akış aşağısı ve akış yukarısında kaya dolgunun AL olarak gösterilen yaklaşık 20 m kalınlığında alüvyon tabakaya oturması öngörülmüştür.Analiz için oluşturulan sonlu farklar ağı Şekil 2'de verilmektedir. Kaya dolgu kabuk, içsel sürtünme açısının gerilmeye bağlı değişiminin göz önüne alınabilmesi amacı ile sığ ve derin olmak üzere iki farklı tabakaya ayrılmıştır. Çekirdek ile kabuk arasındaki geçiş zonları modelde kolaylık sağlaması açısından tek bir tabaka olarak göz önüne alınmıştır.




Şekil 1. Baraj Maksimum Enkesiti



Şekil 2. Baraj için Oluşturulan Sonlu Farklar Ağı

### *2.2 Malzeme Özellikleri*

Malzemenin gerilme-deformasyon davranışı, Mohr-Coulomb yenilme kriterinin kullanıldığı elastik-tam plastik malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Baraj zonlarının kayma rijitliği 2 farklı durum olarak sabit ve Seed ve Idriss (1970) tarafından önerilen ve aşağıda verilen formül kullanılarak gerilmeye bağlı olarak alınmıştır.

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

Yukarıdaki formülde, $G_{max}$ kPA biriminde maksimum dinamik kayma modülünü, $\sigma'_m$ yine kPA biriminde ortalama efektif gerilmeyi, $K_{2,max}$ ise dönüştürme katsayısını göstermektedir. Kayma dayanımı ve rijitlik parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Ana kaya için kayma modülü her iki durum için sabit alınmıştır.

Tablo 1. Malzeme Parametreleri

| | c' | ϕ' | E | ν | G* | $K_{2,max}$** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kPa) | (der.) | (MPA) | - | (Mpa) | - |
| Kil Çekirdek | 10 | 26 | 40 | 0.45 | 14 | 16 |
| Geçiş Zonları | - | 35 | 80 | 0.30 | 31 | 32 |
| Kaya Dolgu (Derin) | - | 40 | 100 | 0.25 | 40 | 40 |
| Kaya Dolgu (Sığ) | - | 45 | 100 | 0.25 | 40 | 40 |
| Alüyyon | - | 33 | 50 | 0.30 | 19 | 20 |
| Anakaya | 100 | 45 | 3000 | 0.25 | 1200 | - |

* Sabit Kayma Modülü
** Değişken Kayma Modülü

Çekirdek ve geçiş zonlarında kullanılacak malzemelerde, laboratuvar kayma dayanımı deneyleri yapılmamış, kayma dayanımı parametreleri USBR (1987) tarafından sıkıştırılmış zeminler için önerilen tipik değerler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Kaya dolgunun içsel sürtünme açısı, Leps (1970) tarafından önerilen sürtünme açısı – normal gerilme ilişkisi dikkate alınarak, sığ ve derin kayma yüzeylerine karşılık düşük ve yüksek normal gerilmeler için belirlenmiştir.

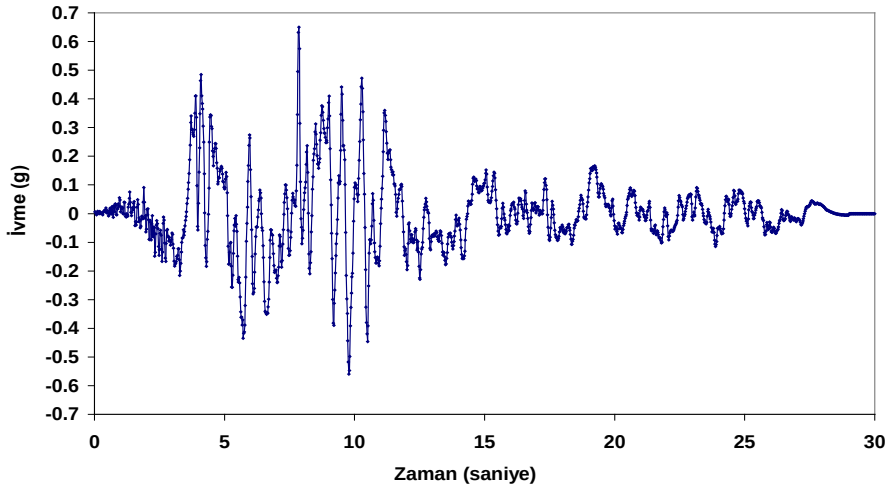
Alüvyon tabakasının derinliğe bağlı özelliklerinin belirlenmesi amacı ile yerinde ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, alüvyonun %65 ile %79 arasında değişen rölatif sıkılık ortalaması %71'dir. Bu değerler, gevşek - orta sıkı - sıkı sınıflamasına göre, orta sıkının üst sınırları veya biraz üzerine karşılık gelmektedir. Presiyometre deneyi sonuçlarından elde edilen net limit basınç, $P_L$ değerleri rölatif sıkılık ile korele edilmiş, elde edilen değerlerin laboratuvar verileri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu bilgiler ışığında, rölatif sıkılık ve yüksek gerilme seviyesi dikkate alınarak alüvyon için içsel sürtünme açısı ϕ' = 33 derece olarak kabul edilmiştir.

### *2.3 Yükleme Durumları*

Maksimum tasarım depremi (MDE) için maksimum yer ivmesi değeri yapılan sismik tehlike çalışması sonucunda maksimum oluşabilecek deprem büyüklüğü $M_w$=8.2 göz önüne alınarak PGA = 0,65 g olarak belirlenmiştir. Dinamik analizlerde yer hareketi olarak Kocaeli Depremi (1999) kaydı söz konusu maksimum yer ivmesine göre ölçeklenerek kullanılmıştır. Ölçeklenen ivme-zaman kaydı Şekil 3'de verilmektedir. Bu deprem kaydı, daha önce gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal analizler neticesinde seçilen 3 adet yer hareketi arasında en kritik sonuçları vermesi dolayısıyla seçilmiştir. Eşdeğer doğrusal analizler, daha önce belirtildiği üzere bildiri kapsamı dışında bırakılmıştır.

Dinamik yüklemenin öncesinde, başlangıç gerilme ve su basıncı dağılımı iki farklı aşamada yapılan statik yükleme ve sızma analizleri sonuçları birleştirilerek elde edilmiştir. Başlangıç durumun elde edilmesi ve sistemin dengeye gelmesinden sonra, deprem yüklemesi model tabanına uygulanan ivme-zaman kaydı ile

gerçekleştirilmiştir. Yatay yer hareketinin 1/3'ü oranında bir düşey yer hareketi, düşey yöndeki deprem hareketinin barajın dinamik davranışına etkisinin dikkate alınabilmesi amacı ile uygulanmıştır.




Şekil 3. Analizlerde Kullanılan Ölçeklenmiş Kocaeli Deprem Kaydı

### *2.4 Sönümleme ve Dinamik Su Basıncı Oluşumu*

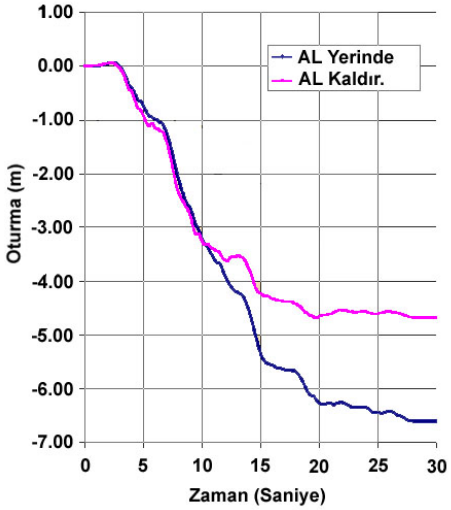
Seed ve Idriss (1970) gibi araştırmacılar tarafından yapılan dinamik tekrarlı yük deneyleri, artan kayma birim deformasyonuna bağlı olarak zeminlerin tanjant kayma modülünün azaldığını ve sönümlemenin arttığını göstermekte, bu deneylerin sonuçları göz önüne alınarak farklı zemin türleri için modül azaltma 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 %5 Rayleigh sönümlemesi uygulanmış, yenilmenin başlamasıyla birlikte sönümleme Mohr-Coulomb malzeme modeline göre oluşan plastik birim deformasyonlar ile kontrol edilmiştir.

Kontrollü olarak sıkıştırılarak teşkil edilecek olan çekirdek, geçiş zonları ve kaya dolgu için sıvılaşma söz konusu değildir. Ancak, baraj altında yer alan alüvyon, göreceli olarak düşük sıkılığı ve maruz kalacağı yüksek dinamik gerilmeler nedeniyle sıvılaşabilir olarak değerlendirilmiştir. FLAC programında kullanılan bağıl yöntemde, boşluk suyu basıncındaki değişiklik, boşluk hacmindeki bir değişime bağlıdır. Alüvyonun sıvılaşma davranışının veya bir başka deyişle deprem sırasındaki olası dayanım kaybının dikkate alınabilmesi için, Martin vd. (1975) tarafından geliştirilen ve Byrne (1981) tarafından basitleştirilen bir ilişkiye bağlı yarı-bağıl yöntem kullanılmıştır. Finn-Byrne olarak isimlendirilen yöntemde boşluk hacmi azalımındaki artış, rölatif sıkılık kullanılarak belirlenebilen iki parametre kullanılarak kayma birim deformasyonu ile ilişkilendirilmiştir. Bu sayede, boşluk suyu basıncı, kayma birim deformasyonuna bağlı olarak artarak efektif gerilmede, dolayısıyla malzemenin dayanımında azalmaya neden olmaktadır. Sıvılaşma modeli, sadece alüvyon tabakası için uygulanmıştır. Bununla birlikte, hacimsel deformasyonlara bağlı boşluk suyu basıncı değişimi barajın tüm zonlarında göz önüne alınmıştır. Sıvılaşma modeli ve dinamik su basıncı oluşumu ile ilgili detaylı bilgi Itasca (2008)'de verilmektedir.

## 3 ANALİZ SONUÇLARI

### *3.1 Sonlu Farklar Analizi Sonuçları*

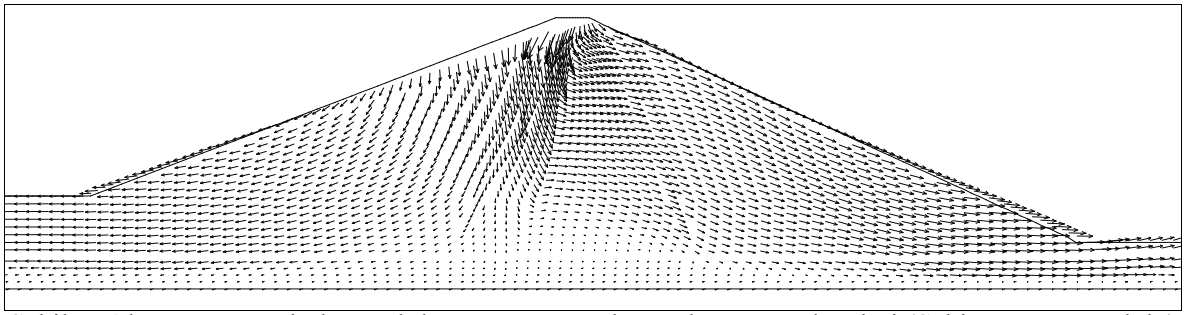
Gerçekleştirilen analizler, deprem sırasında barajın farklı bölgelerinde ve depremin farklı anlarında yenilmeler meydana geldiğini, ancak deprem sonunda duraylılığın korunduğunu göstermiştir. Değişken kayma modülü için kret ortasında deprem sırasında meydana gelen oturma zamana bağlı olarak Şekil 4'de verilmektedir. Görülebileceği gibi, deprem sırasında oluşan geçici yenilmeler artımsal olarak kalıcı deplasmanlara neden olmuş, ancak deprem sonunda deplasman artımı sıfırlanarak sistem dengeye ulaşmıştır. Deprem sonundaki deplasman vektörleri baraj altında alüvyonun yer aldığı durum için Şekil 5 ve 6'da; alüvyonun kaldırılarak yerine kaya dolgu teşkil edildiği durum için Şekil 7 ve 8'de sunulmuştur. Grafikler sabit ve derinlikle değişen kayma modülü için ayrı ayrı verilmiştir. Hesaplanan kret oturmaları, kret boyunca maksimum, minimum ve ortalama olarak Tablo 2'de özetlenmiştir.



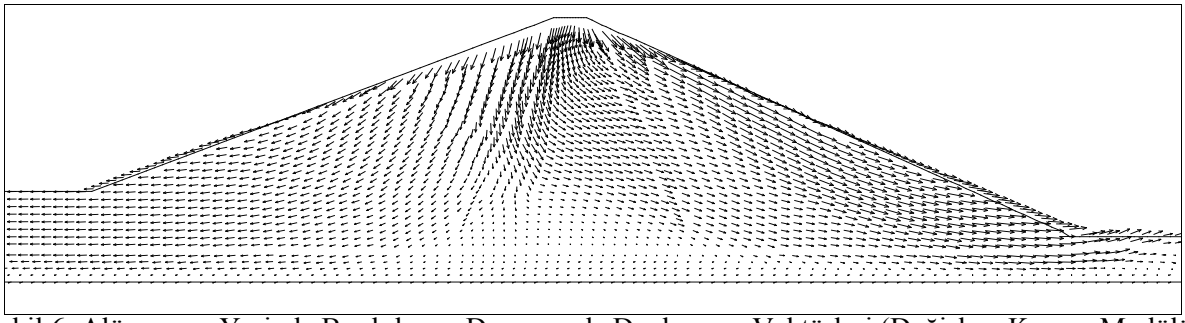

Şekil 4. Deprem Sırasında Kret Oturmasının Zamana Bağlı Değişimi

Tablo 2. Deprem Sonrası Kret Oturmaları

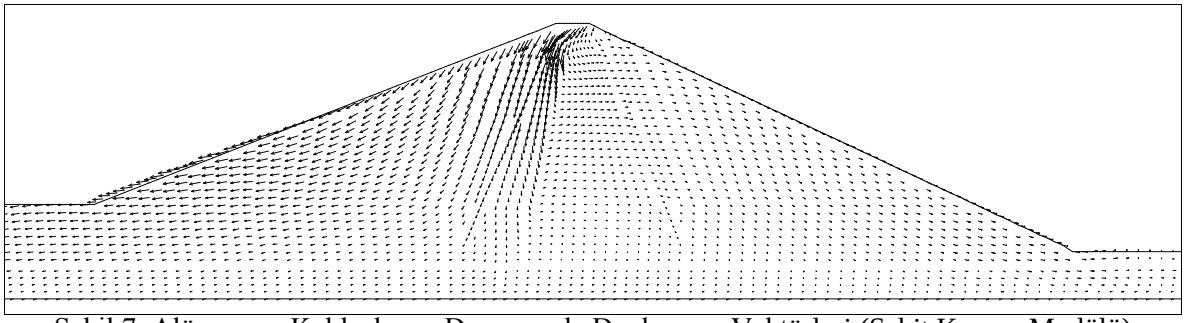
| | Maks. Oturma(m) | Ort. Oturma(m) | Min. Oturma(m) |
|---|---|---|---|
| Kabuklar Altı Alüvyon (Sabit G) | 12,6 | 7,7 | 3,7 |
| Kabuklar Altı Alüvyon (Değişken G) | 8,0 | 6,7 | 5,4 |
| Alüvyon Yerine Kaya Dolgu (Sabit G) | 8,6 | 4,8 | 2,1 |
| Alüvyon Yerine Kaya Dolgu (Değişken G) | 6,2 | 4,9 | 4,3 |



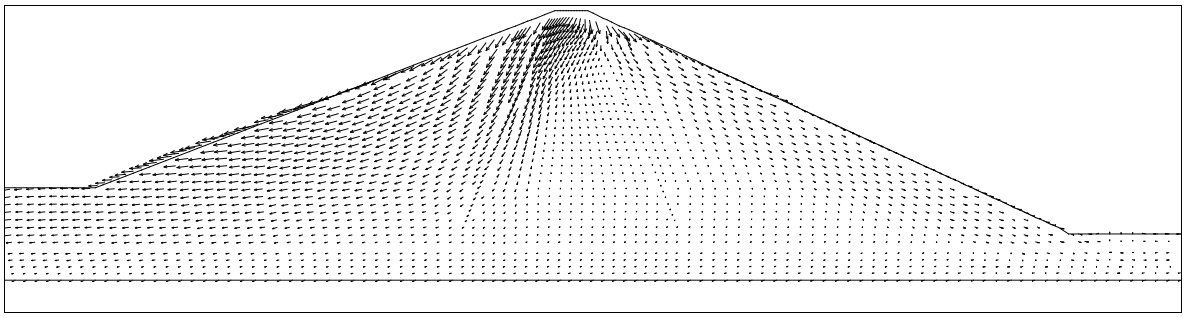
Şekil 5. Alüvyonun Yerinde Bırakılması Durumunda Deplasman Vektörleri (Sabit Kayma Modülü)



Şekil 6. Alüvyonun Yerinde Bırakılması Durumunda Deplasman Vektörleri (Değişken Kayma Modülü)



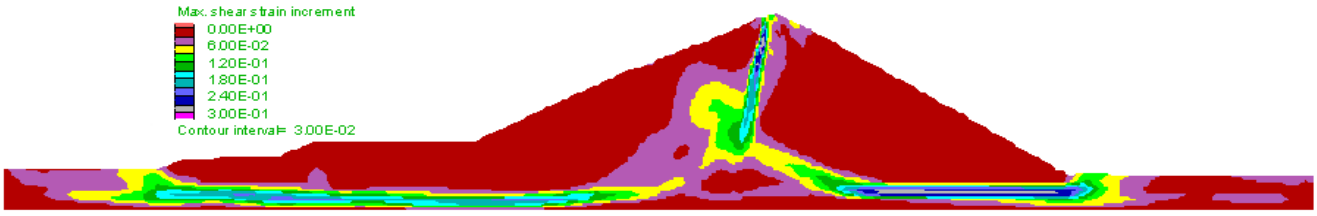
Şekil 7. Alüvyonun Kaldırılması Durumunda Deplasman Vektörleri (Sabit Kayma Modülü)



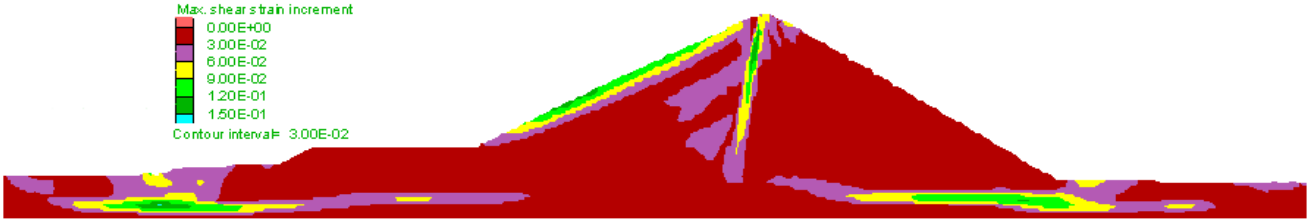
Şekil 8. Alüvyonun Kaldırılması Durumunda Deplasman Vektörleri (Değişken Kayma Modülü)

Değişken kayma modülü için, baraj altında alüvyonun bırakıldığı ve kaldırıldığı analizler neticesinde elde edilen kayma birim deformasyonları Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarının sunulduğu şekillerin değerlendirilmesi sonucunda, kalıcı deformasyonların Makdisi ve Seed (1978) gibi basitleştirilmiş metodlarda kabul edildiği gibi tekil bir kayma yüzeyinin hareketine bağlı olarak oluşmadığı, zaman tanım alanında yapılan bir hesapta kullanılan elasto-plastik gerilme-deformasyon davranışı ile modellenebilen, farklı bölgelerde anlık yenilmeler ve özellikle kaya dolgu kabukların dışarıya doğru yayılma hareketi nedeniyle meydana geldiği sonucuna varılabilmektedir.




Şekil 9. Alüvyonun Bırakılması Durumu Deprem Sonu Kayma Birim Deformasyonu Dağılımı




Şekil 10. Alüvyonun Kaldırılması Durumu Deprem Sonu Kayma Birim Deformasyonu Dağılımı

Elde edilen ortalama kret oturmaları, sabit ve gerilmeye bağlı olarak değişen kayma modülü için yakındır. Ancak deformasyon paterninin iki durum için farklılık gösterdiği, sabit kayma modülü için akış yukarı tarafındaki deplasmanların hayli fazla olduğu, değişen kayma modülü kullanımı ile daha uniform ve makul bir oturma elde edildiği gözlenmiştir.

Kaya dolgu kabuklar altında yer alan alüvyon tabakasının baraj oturmasını önemli ölçüde olumsuz etkilediği, 6,7-7,7 m olarak hesaplanan ortalama kret oturmasının alüvyon tabakası yerine kaya dolgu teşkil edilmesi durumunda 4,8-4,9 m mertebelerine indiği görülmüştür. Bu farklılık, alüvyon tabakasının göreceli olarak düşük içsel sürtünme açısı ve kayma birim deformasyonları nedeniyle deprem sırasında oluşan ek boşluk suyu basınçlarının etkisiyle dayanımdaki azalmadan kaynaklanmakta olup, yüksek seviyeli yer hareketi göz önüne alındığında beklenen bir durumdur.

### *3.2 Ampirik Yöntemler ile Karşılaştırma*

Pells ve Fell (2003), 305 dolgu barajı incelemiş, 95'inde sıvılaşma olmamasına rağmen ciddi hasar meydana geldiğini belirtmiş ve yapılan gözlem ve analizlere dayalı hasar sınıflandırmasını, kaya dolgu barajlar için maksimum yer ivmesi ve deprem büyüklüğü kullanılarak hasarın tahmin edilmesine yönelik bir grafik olarak sunmuştur. Bu yaklaşıma göre, $M_w$ = 8,2 deprem büyüklüğü ve PGA = 0,65 g için baraj, sınırları kesin olarak belirlenmemiş 4/5 hasar sınıfına girmektedir. Hasar sınıfı 4, ağır hasar olarak tanımlanmış ve kret oturmasının baraj yüksekliğinin %1,5-5'i arasında olabileceği belirtilmiştir. Göçme olarak tanımlanan hasar sınıfı 5 için ise kret oturması baraj yüksekliğinin %5'inden fazla olarak verilmektedir. Swaisgood (2003), 69 adet farklı tipte, depreme maruz kalmış, temel zemininde sıvılaşmanın olduğu ve olmadığı dolgu barajın istatistiksel değerlendirmesini yapmıştır. Çalışmada barajın oturmasını etkileyen en önemli iki faktörün deprem büyüklüğü ve maksimum yer ivmesi olduğu belirtilmiş ve kret oturmasının tahmini için bir bağıntı önerilmiştir. Söz konusu bağıntı ile kret oturması %1,82 olarak elde edilmiştir.

Yukarıda açıklanan ampirik yöntemler ile barajın kret oturması, sonlu farklar analizi sonuçları ile uyumlu olarak sırasıyla 8 m ve 3 m olarak tahmin edilmektedir.

## 4 SONUÇ VE ÖNERİLER

Merkezi kil çekirdekli bir kaya dolgu barajın sismik duraylılık ve deformasyon analizi sunulmuştur. Barajda oluşacak kalıcı deplasmanların tahmin edilebilmesi amacı ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan bağıl

analizler FLAC programı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, barajın deformasyon davranışının tekil bir kayma yüzeyine değil, depremin farklı anlarında akış yukarı ve akış aşağı bölgelerinde biriken plastik deformasyonlara bağlı olduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, baraj altında 20 m kalınlığındaki alüvyon tabakasının kaldırılarak yerine kaya dolgu teşkil edilmesinin, kret oturmasını hava payının altında tutmak için gerekli olduğuna işaret etmektedir. Hesaplamaların, maksimum kesit için düzlem deformasyon durumu için yapıldığı ve meydana gelecek oturmaların gerçek baraj geometrisi ve üç boyutlu etkiler nedeni ile hesapta elde edilen değerlerin altında olacağı dikkate alındığında, alüvyonun kaldırılması durumunda hava payı, suyun kreti aşmaması için yeterli olacaktır.Barajın deprem sonunda oturması ampirik yöntemler ile de tahmin edilmiş, elde edilen sonuçların sonlu farklar analizleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

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

Byrne, P.M. (1991). A cyclic shear-volume coupling and pore-pressure model for sand. Proceedings of Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, March 1991.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D. & Bell, G. 2005. *Geotechnical engineering of dams*. Leiden: Balkema.

Hudson, M., Idriss, I.M. & Beikae, M. 1994. QUAD4M - A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA.

Itasca Consulting Group, Inc. 2008. *FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 6.0 User's Guide, Dynamic Analysis.* Minneapolis: Itasca.

Leps, T.M. 1970. Review of shearing strength of rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 96: 1159-1170.

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.

Marcuson, W.F., Hynes, M.E. & Franklin, A.G. 2007. Seismic design and analysis of embankment dams: the state of practice. *Proceedings of 4th Civil Engineeering Conference in the Asian Region (CECAR), Taipei.*

Martin, G. R., Finn, W.D.L. & Seed, H.B. 1975. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading. *Journal of Geotechnical Division, ASCE,* 101: 423-438.

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.

Swaisgood, J.R. 2003. Embankment dam deformations caused by earthquakes. *Proceedings of the 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering,* 13-15 Feb. 2003.

U.S. Bureau of Reclamation. 1987. *Design of small dams*, Third edition.