

Akköprü Barajı'nın Hesaplanan ve Gözlenen Deformasyon Davranışı

Sami Oğuzhan AKBAŞ*
İbrahim SAK**

ÖZ

Bu çalışmada, kil çekirdekli kaya dolgu tipteki, 162.50 m. yüksekliğe sahip Akköprü Barajı'nın inşaat ve su tutma aşamalarındaki deformasyon davranışı incelenmiştir. Oluşan yer değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla, iki boyutlu düzlem şekil değiştirme prensibi kullanılarak sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaya dolgu malzemenin doğrusal ve elastik olmayan, gerilme bağımlı davranışını temsil etmek için sertleşen zemin modeli kullanılmıştır. Malzeme sonlu eleman model parametreleri, kil çekirdek malzemesi için üç eksenli basınç deney sonuçlarından, diğer malzemeler için ise önceki çalışmalar temelinde seçilmiştir. İnşaat sonrasına ait hesaplanan ve ölçülen deformasyonlar, büyüklük, zamanla değişim ve baraj gövdesindeki konumları itibarı ile uyumludur. En büyük oturma baraj gövde yüksekliğinin yaklaşık yarısında ortaya çıkmıştır. Su tutma aşamasındaki davranış da değerlendirilmiş, oluşması beklenen oturmalar için tahminlerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: barajlar, kaya dolgu, oturma, sonlu eleman analizi, saha ölçümleri

ABSTRACT

Predicted and Observed Deformation Behavior of Akköprü Dam

In this study, the settlement behavior of Akköprü Dam, which is a 162.50 m high rockfill dam with clay core, is investigated for the end-of-construction and reservoir impoundment stages. Finite element analyses that are based on a 2-D plain strain solution are performed to determine the displacements. Hardening soil model is used to represent the non-linear, inelastic, and stress-dependent behavior of rockfill. Material model parameters for clay are selected from triaxial compression test results. For other materials, preliminary values for model parameters are chosen based on the results from previous studies on dams. Predicted and measured displacements are in agreement as a function of time, in terms of magnitude and location for the end-of-construction stage. The maximum settlement is observed to be approximately at the middle of the dam height. Predictions are also made for the displacements for reservoir impoundment conditions.

Keywords: dams, rockfill, settlement, finite element analysis, field measurements

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 22.04.2011 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - soakbas@gazi.edu.tr

** Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Atıksu Dairesi Başkanlığı, Ankara - ibrahim081@yahoo.com

1. GİRİŞ

Barajların davranışlarının bütünleşmiş yaklaşımlarla izlenmesi, mevcut barajların kritik tasarım parametrelerinin doğrulanması ve planlama aşamasındakilerin göstereceği performansın daha kesin ve güvenilir bir biçimde tahmin edilebilmesine yardımcı olur. Ancak, herhangi iki baraj, kullanılan malzeme cinsi ve özellikleri, geometri ve saha karakteristikleri gibi değişkenlerden ötürü birbirinden farklılık gösterir. Ayrıca, deformasyon ve gerilme gözlem verileri de tip, kayıt uzunluğu ve kalitesi açısından bir barajdan diğerine büyük çeşitlilik arz edebilir. Bu sebeplerle, bu önemli yapıların farklı koşullar altında davranışlarının yeterli doğrulukta belirlenebilmesi amacı ile, sayısal yöntemler kullanılarak gerçeğe uygun olarak modellenebilmesi büyük önem taşımaktadır.

Baraj gövdelerinin sayısal modellemesinde, genellikle üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme-birim deformasyon ilişkisine ait parametrelerin seçimi temel kritik aşamadır. Özellikle kaya dolgu barajlar için, kullanılan malzeme boyutlarının büyüklüğü ve buna bağlı olarak özel test ekipmanı gerektirmesi, bu çalışmada olduğu gibi, deneysel verilerin birçok durumda mevcut olmaması anlamına gelmektedir. Literatürdeki az sayıdaki bu tür üç eksenli deney sonucu, kaya dolgu malzemelerin gerilmeye bağlı, elastik ve doğrusal olmayan bir gerilme-birim deformasyon ilişkisine sahip olduğunu işaret etmektedir [1, 2]. Bu da, kaya dolgu baraj analizlerinde, çoğu zaman gerekli parametrelerin daha önce gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar ya da geri analizler yardımı ile tanımlanmasını gerektirmektedir.

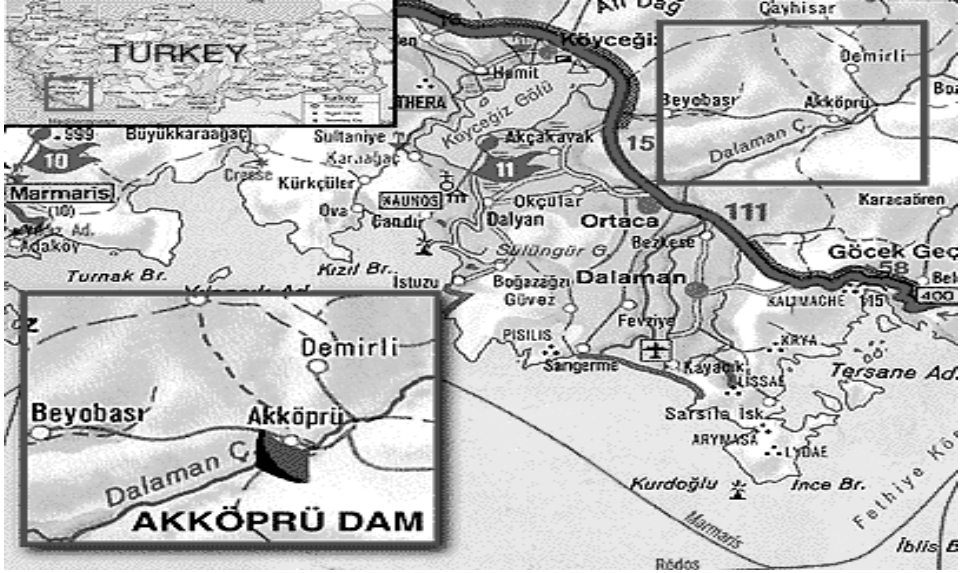
Bu çalışmada, Muğla İline bağlı Köyceğiz İlçesinin 24 km. doğusunda, Dalaman Çayı üzerinde, kil çekirdekli kaya dolgu olarak inşa edilen, temelden yüksekliği 162.50 m. olan Akköprü Barajı sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Yukarıda belirtilen hususlar ışığında, özellikle barajı oluşturan malzemelerin gerilme-birim deformasyon ilişkisine ait parametrelerin seçimi üzerinde durulmuştur. Barajın, zamana bağlı olarak inşaat sırasında ve inşaat sonrası oturma davranışı incelenerek, elde edilen sonuçlar baraj gövde dolgusuna yerleştirilmiş çapraz kollu çökme ölçerlerden alınan okumalar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, çalışma sırasında henüz barajda su tutma aşamasına geçilmediğinden, bu durum gerçekleştiğinde oluşacak deformasyon ve gerilmeler için de tahminlerde bulunulmuştur.

2. AKKÖPRÜ BARAJININ ÖZELLİKLERİ

2.1. Genel Karakteristikler

Akköprü Barajı ve Hidroelektrik Santrali Tesisleri, Muğla İli'ne bağlı Köyceğiz İlçesi'nin 24 km. doğusunda Dalaman Çayı üzerinde bulunmaktadır (Şekil 1). İnşaatına 1995 yılında başlanan projenin, gövde dolgu imalatına 15.09.2000 tarihinde geçilmiş, baraj 2007 yılının son çeyreğinde bitirilmiştir. Akköprü Barajı gövdesinin genel görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Sulama, enerji ve taşkın koruma amaçlı inşa edilen Akköprü Barajı'nın işletmeye açılmasıyla birlikte, 115 MW kurulu güçle yılda 343 GWh enerji üretilmesi ve 14 192 ha. arazinin sulanması planlanmaktadır. Baraj gövdesinde 2 106 448 m³ kil, 779 808 m³ filtre dolgu malzemesi ve 9 389 532 m³ kaya dolgu malzemesi kullanılmıştır. Toplam gövde dolgu hacmi 12 hm³'dür. Gövde yüksekliği talvegden 112.50 m. olup, kret uzunluğu 688.27 m.'dir. Baraj gölü minimum işletme, normal ve maksimum su seviyeleri sırası ile

173.00, 200.00 ve 204.00 m., maksimum su seviyesinde göl hacmi 419.00 hm³, göl alanı ise 9.00 km² olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Akköprü Barajı'nın Konumu



Şekil 2. Baraj Gövdesi

2.2. Baraj Yeri Jeolojisi ve Baraj Dolgusu

Akköprü Barajı inşa alanında Mezozoik yaşlı Cehennem Deresi Kireçtaşları, Kretase yaşlı Demirli Melanjı ile Peridotit, Serpantinit, Tersiyer yaşlı Aktaş Kireçtaşı ile Gökseki Flişi, Kuvarterner yaşlı teras, eski alüvyon, alüvyon ve killi yamaç molozu mevcuttur. Baraj yerinde, her iki yakadaki peridotit-serpantinit üzerine sadece sağ yakada teras çökelmiş, üzerlerine killi yamaç molozu ve alüvyon gelmiştir. Ana kaya durumundaki peridotitler bol eklemli, genellikle serpantinleşme gösteren, eklem boyunca derinlerde de serpantinleşmesi süren bir birim olup, geçirimsiz kaya olarak tanımlanmıştır. Ortalama RQD değeri 63.50, karot yüzdesi % 96.22'dir. Peridotit-serpantinitin üzerine uyumsuz olarak gelen teras, peridotit-serpantinit-kireçtaşı-çört kökenli çakıllardan karbonatın çimentolanması ile oluşmuştur. Yarı geçirimli, RQD değeri 39.3, karot yüzdesi % 93.9, orta sıkı çimentolu bir birimdir. Akışa göre sağ sahildeki teras, yamaç molozu ve alüvyon gövde dolgusu başlamadan önce alınmıştır. Talvegdeki alüvyon 15-42 m. arası değişen kalınlıkta, geçirimli-yarı geçirimli bir birimdir. Granülometrik analizlere göre % 10.73 ince malzeme, % 75.21 kum, % 13.13 çakıl, % 0.93 oranında blok içermektedir. Talvegdeki alüvyon da yine gövde dolgusu başlamadan önce alınmıştır.

Akköprü Barajı kil çekirdekli kaya dolgu tipte olup gövde dolgusu kum ve çakıl filtre zonlarını da kapsamaktadır. Barajın mansap şevi 1 düşey (D) / 2 yatay (Y) eğiminde, memba şevi ise 1 (D) / 2.5 (Y) eğimindedir. Akköprü Barajı gövde dolgusunda kullanılan malzemeler ve yerleştirilme detayları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Baraj Gövde Dolgusunda Kullanılan Malzemeler

Malzeme cinsi	Max.dane çapı(mm)	Tabaka kalınlığı(m)	Sıkıştırma
Alüvyon(tüvenan)	100	0.15	8 t / 2 pas
Alüvyon(ince malzeme)	150	0.15	8 t / 2 pas
Kaya ufağı(kaba,inçe)	250	0.20	12 t / 4 pas
Kaya malzeme 1	600	-	-
Kaya malzeme 2	800	0.60	18 t / 5 pas
Karışık dolgu	120	0.25	12 t / 4 pas
Kil	-	0.15	32 t / 12 pas
Filtre malzemesi	76.2	0.30	8 t / 4 pas
Riprap	900	0.90	8 t / 4 pas

2.3. Akköprü Barajında Bulunan Ölçüm Aletleri

Akköprü Barajı'na baraj davranışını gözlemlemek amacıyla gövde içerisine, memba ve mansap şevlerine ölçüm aletleri yerleştirilmiştir. Kil çekirdek içerisinde, gövde km: 0+320'de 52 adet, km: 0+370'te 54 adet olmak üzere toplam 106 adet çapraz kollu çökme ölçer bulunmaktadır. Çapraz kollu çökme ölçerler baraj ekseninden 7.00 m memba tarafında ve baraj temelinden krete kadar bir hat üzerinde 3 m aralıklarla yerleştirilmiştir. Boşluk suyu basıncını ölçmekte kullanılan piyezometre uçları, gövde km: 0+320'de 17 adet, km: 0+370'te 17 adet ve km: 0+420'de 14 adet olmak üzere toplam 48 adettir. Su basıncı ölçmek amacıyla gövde km: 0+320'ye 1 adet, km:0+370'ye 1 adet ve km: 0+420'ye 1 adet olmak üzere 3 adet su basıncı ölçüm cihazı yerleştirilmiştir. Toplam basıncı (su basıncı+zemin basıncı) ölçmek amacıyla km: 0+320'ye 3 adet, km:0+370'ye 3 adet ve km: 0+420'ye 3 adet olmak üzere 9 adet toplam basınç ölçüm cihazı yerleştirilmiştir. Ayrıca, memba ve mansap şevleri üzerinde 39 adet de harici çökme röperi bulunmaktadır.

Akköprü Barajı'nda gövde dolgusu işlemleri 15.09.2000 tarihinde başlamış, gövde dolgusu 2007 yılının son çeyreğinde tamamlanmıştır. Gövde dolgusu içerisine kurulan deformasyon ölçerlerden alınan 2001 ve 2002 yıllarına ait okumalar bulunmakla birlikte, okumalar 2003 yılından itibaren sistematik olarak kayıt altına alınmaya başlanmıştır.

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN KAYA DOLGU BARAJLARA UYGULANMASI

3.1. Bazı Modelleme Kabul ve Problemleri

Düğüm noktaları ile birbirine bağlı olan ayrık elemanların gerçek bütünlüğü idealize etmek için kullanıldığı sonlu elemanlar yöntemi, kaya ve toprak dolgu barajlar ve temellerindeki gerilme, deformasyon ve boşluk suyu basınçlarının belirlenmesi amacı ile 1970'li yılların başından beri sıkça kullanılmaktadır [3]. Barajlar için tipik bir sonlu elemanlar analizi, en alt tabaka elemanlarının rijitlik ve ölü yüklerinin değerlendirilmesi, ardından bu tabakada inşaata bağlı olarak gerilme ve yer değiştirmelerin hesaplanması ve aynı prosedürün en son tabakanın inşasına kadar devam etmesini içerir. Özellikle kil çekirdekli barajlar için göz önüne alınması gereken önemli bir nokta dolgunun artırımlı yöntemle inşa edildiğidir [4]. Clough vd. [3], bir dolgu için, doğrusal elastik “tek kademeli” ve “on kademeli” analizleri, ortaya çıkan yatay, düşey ve kayma gerilmeleri açısından karşılaştırmışlardır. İki analiz arasındaki fark yatay yer değiştirmeler bakımından çok küçüktür. Fakat, düşey yer değiştirmeler söz konusu olduğunda oldukça farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. En büyük deformasyon “tek kademeli” analizde krette oluşmakta, on kademeli analizde ise en büyük deformasyon yaklaşık baraj yüksekliğinin ortasında meydana gelmektedir. Kademeli analiz hakkında bir başka çalışma da Zomorodian ve ark. [4] tarafından Sange Siah Barajı için yapılmıştır. Sange Siah, İran'da bulunan, 33 m yükseklikte ve kret uzunluğu 351.6 m olan kil çekirdekli kaya dolgu tipte bir barajdır. Baraj, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15 ve 31 kademeli olacak şekilde modellenerek on ayrı analiz yapılmıştır. Analizlerde bir veya daha fazla kademeli modelin tanımlanmasının, oturma dağılımı ve miktarında farklı sonuçlara ulaşılmasına yol açtığı belirlenmiştir.

Baraj temelinin deformasyon özelliklerinin analizlere katılıp katılmaması da tartışmalı hususlardan biridir. Baraj yüksekliğinin yarısı kadar bir derinlikte rijit tabaka bulunması

durumu Clough vd. [3] tarafından incelenmiştir. Analizlerde, baraj tabanı ve rijit tabaka arasında bulunan temel malzemesi için dört farklı elastik modül tanımlanmıştır (4788, 9576, 23940 kPa ve rijit). Baraj gövdesinde oluşan gerilmeler açısından temelin elastisite modülünün etkisi bulunmadığı gözlenmiştir. Buna karşın, yatay gerilmeler ve kayma gerilmeleri, seçilen elastisite modülünden çok büyük oranda etkilenmiştir. Üzerinde çalışılan örnek için, beklenildiği üzere, temelin rijitliği arttıkça yatay ve düşey yer değiştirmelerin azaldığı gözlenmiştir. Yatay yer değiştirmelerin seçilen elastik modül azaldıkça 300 mm'den 1400 mm değerlerine çıktığı görülmüştür. Düşey yer değiştirmeler açısından da aynı durum söz konusudur. Seçilen elastik modül azaldıkça baraj gövde ortasına doğru düşey yer değiştirmeler 200 mm'den 1200 mm değerlerine yükselmektedir. Temelin malzeme karakteristiklerinin analiz sonuçlarına etkisi üzerine bir başka çalışma da, Kuzey Quebec'te Toulmoustou Nehri üzerindeki beton yüzü kaya dolgu Toulmoustou Barajı'nda Szostak-Chrzanowski ve Massiera [5] tarafından gerçekleştirilmiştir. Barajın yüksekliği 75 m, kret uzunluğu ise 575 m'dir. Baraj modeli, değişik temel şartları için analiz edilmiştir. İlk model sıkı kayanın üzerinde, ki bu durum Toulmoustou Barajı'nın gerçek durumudur, ikinci model ise 60 m yüksekliğindeki sıkı moren temelin üzerindedir. Her iki durum için rezervuar dolmuş sonrası yer değiştirmeler karşılaştırıldığında, moren üzerindeki beton yüzü kaya dolgu baraj (CFRD), sıkı kaya üzerindeki CFRD'den beklenilebileceği gibi yaklaşık %30 daha fazla düşey deformasyon yapmıştır.

Genellikle sonlu eleman analizi boyunca, sistem üç boyutlu olmasına rağmen iki boyutlu düzlem-şekil değiştirme problemi kabulü yapılır. Lefebvre vd. [6]'e göre iki boyutlu analiz göreceli basitliği ve pratik olması nedeniyle üç boyutlu analize göre tercih edilebilir. Halbuki, iki boyutlu analiz düzgün, az eğimli vadi profili bulunan dolgu barajlar için uygundur. Bunun sebebi enine-vadi kemer etkisinin düzlem-şekil değiştirme analizinde göz önüne alınmamasıdır. Lefebvre vd. [6] V-şeklinde, eğimleri 1 D:1 Y, 3 Y:1 D ve 6 Y:1 D olan üç farklı vadiye kemerlenme etkisini çalışmıştır. Baraj eğimleri mamba ve mansapta aynı (2.5 D:1 Y) ve tüm farklı vadilerde baraj yüksekliği 49 m'dir. Analizde doğrusal elastik malzeme özellikleri kullanılmıştır. Ayrıca barajın gerçek davranışını simule etmek için sekiz inşa safhası seçilmiştir. Vadi eğimlerinin dikliği arttıkça oluşan oturmaların büyüklüğünün azaldığı gözlenmiştir. Her bir durum için baraj içerisindeki gerilme değişimleri benzer olsa da, kemerlenmeye bağlı olarak en dik vadiye maksimum değer diğerlerine göre küçüktür. Sözü edilen çalışmadan çıkartılabilecek en önemli sonuç, vadi eğimi 3 D:1 Y veya daha az olan barajlarda iki boyutlu analizin kabul edilebilir sonuçlar vermesidir. Hunter ve Fell [7] de, baraj-vadi birleşim yeri eğimi 0, 26°, 45° ve 70°, nehir genişliği 20, 50 ve 100 m olan, 100 m yüksekliğinde bir barajın davranışına vadi şeklinin etkisini araştırmıştır. Model doğrusal elastik, baraj dolgu malzemesi için Young Modülü (E) 100 MPa, Poisson oranı (ν) 0.27 ve temelin Young modülü 50 GPa'dır. Sonuçlar kemerlenme etkisini göz önüne almak için iki boyutlu analiz ile bulunan düşey gerilmelere bir "gerilme azaltma faktörü" uygulanması gerektiğini göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada nehir genişliğinin baraj dolgu yüksekliğine eşit olduğu durumlarda, baraj-vadi birleşim yeri eğimi dikkate alınmaksızın enine-vadi kemer etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu gözlenmiştir [7].

3.2. Hiperbolik Model ve Sertleşen Zemin Modeli

Çeşitli laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar, kaya dolgu malzemenin gerilme-birim deformasyon davranışının doğrusal veya elastik olmayan ve gerilme seviyesine bağlı bir karakteri olduğunu ortaya koymaktadır [1, 2]. Bu özellikleri davranışa yansıtan en basit model, elastik modülün tanjant değerinin gerilme seviyesine hiperbolik bir ilişki vasıtası ile bağlı olduğu, ve bu sebeple “hiperbolik model” olarak adlandırılan izotropik-elastik formülizasyondur [8]. Kaya dolgu malzemenin mekanik özellikleri, birçok çalışmada hiperbolik model kullanılarak temsil edilmiştir [9]. Saboya ve Bryne [10] Brezilya’da bulunan ön yüzü beton kaplı kaya dolgu tipteki Foz do Areia barajının inşaa sırasındaki ve su tutma aşamasındaki deformasyon davranışını, kaya dolguyu hiperbolik model kullanarak sonlu elemanlar analizine katarak incelemiş ve gözlenen deformasyonlar ile uyumlu sonuçlara ulaşmışlardır.

Eşitlik 1’de sunulan hiperbolik aksel birim deformasyon (ε) – deviatorik gerilme (q) ilişkisi temel alınarak oluşturulan sertleşen zemin modeli, hiperbolik modele, elastik yerine plastik teoriyi kullanması ve sıkı zeminlerde kayma gerilmesi altında oluşan hacim artışını hesaba katması gibi özellikleriyle üstünlük kurmaktadır [11]:

$$-\varepsilon = \frac{q}{2E_{50}(1 - q/q_a)} \quad (1)$$

Burada q_a , deviatorik gerilmenin asimptotik değeridir. E_{50} yükleme esnasındaki çevre basıncına bağlı modül olup, aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanır:

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \phi - \sigma_3' \sin \phi}{c \cos \phi + p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m \quad (2)$$

Eşitlik 2’de c kohezyon, ϕ içsel sürtünme açısı, σ_3' çevre basıncı, E_{50}^{ref} ise p^{ref} referans çevre basıncındaki modüldür. Modülün gerilme bağımlılığı m katsayısı ile ifade edilmektedir. Nihai deviatorik gerilme q_f Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır:

$$q_f = \frac{2 \sin \phi (c \cot \phi - \sigma_3')}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

Nihai deviatorik gerilme ile asimptotik deviatorik gerilme arasındaki oran, 1’den küçük bir değer olması gereken R_f göçme oranı ile ifade edilmektedir.

Sertleşen zemin modeli, geçirimsiz bitüm membranlı kaya dolgu tipteki Pappadaı Barajının modellenmesinde kullanılmıştır [12]. Baraj yüksekliği 27 m olup, baraj gövdesinde kalkarenit kaya dolgu kullanılmıştır. Barajın mansap ve mamba eğimleri 2 Y:1 D’dir. Barajın temeli sıkı kildir. Baraj performansının incelenmesinde iki boyutlu düzlem-şekil değiştirme analizi kullanılmıştır. Baraj, analizde 10 kademe halinde inşaa edilmiş ve barajın sonlu elemanlar ağı dörtgen elemanlardan oluşturulmuştur. Model parametrelerinin

belirlenmesinde deneysel veriler kullanılmıştır. Tahmin edilen ve gözlemlenen davranış inşa ve su tutma safhaları için karşılaştırılmıştır. Gözlenen ve tahmin edilen değerler birbirleriyle uyum halindedir. Maksimum oturma 68 mm, yaklaşık olarak barajın orta yüksekliğinde ortaya çıkmıştır.

64 m yükseklikte kil çekirdekli dolgu türdeki Shirindarreh barajında, inşa sonrasında oluşan ve sayısal olarak tahmin edilen deformasyonlar Aflaki [13] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada da baraj dolgusunun davranışı sertleşen zemin modeli ile tanımlanmıştır. Gözlenen deformasyonlar ile sayısal olarak elde edilenler genel olarak uyumludur.

Bir diğer çalışma, inşa sonrası ve rezervuar dolum sonrası hesaplanan ve gözlenen deformasyonları karşılaştırmak amacı ile, 133 m yüksekliğinde bir ön yüzü beton kaya dolgu baraj olan Kürtün Barajı için Özkuzukıran vd. [14] tarafından yapılmıştır. Baraj, dar bir vadiye granodiorit formasyon üzerine inşa edilmiştir. Düzlem-şekil değiştirme şartları kabul edilerek baraj davranışının belirlenmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak sertleşen zemin modeli seçilmiştir. Zemin parametrelerinin seçiminde laboratuvar verisi olmadığı için, önceki çalışmalar temel alınmıştır. Barajın kaya temeli rijit kabul edilmiştir. Analizde kullanılan sonlu elemanlar ağı üçgen elemanlardan oluşmaktadır. İnşa sonrası durum için gözlenen ve hesaplanan oturmalar birbirine çok yakındır. Rezervuar dolum durumu için hesaplanan değerler ise gözlenen değerlerden fazladır. Bunun, boşaltma-yükleme etkisinden dolayı gerçekleştiği düşünülmektedir [14].

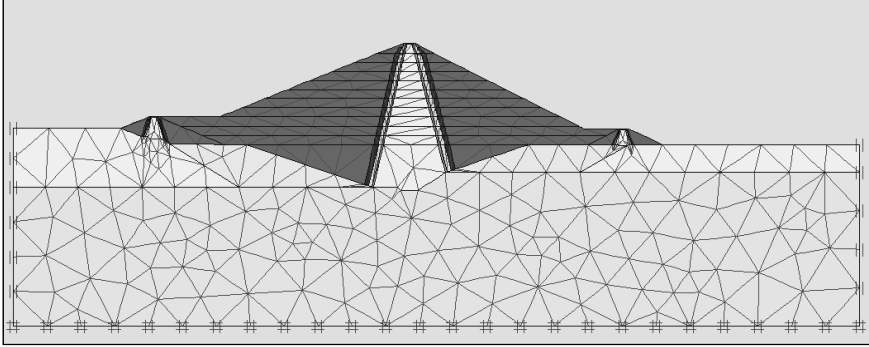
4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

4.1. Analiz ile İlgili Genel Bilgiler

Baraj iki boyutlu düzlem birim deformasyon koşullarının geçerli olduğu kabulü ile analiz edilmiştir. Oluşturulan model, 15 düğüm noktasına sahip yaklaşık 1100 üçgen elemandan oluşmaktadır. Yaklaşık 9000 düğüm noktası, 13200 adet de gerilme noktası mevcuttur. Sonlu elemanlar ağı Şekil 3'te görülmektedir.

Kaya dolgu malzemesinin gerilmeye bağımlı, elastik ve doğrusal olmayan davranışını yansıtmak amacıyla sonlu elemanlar metodu analizi Plaxis v8.2'de mevcut olan sertleşen zemin modeli kullanılarak yapılmıştır. Sertleşen zemin modelinde kullanılan malzeme parametreleri üç eksenli basınç deney sonuçlarından elde edilebilir. Akköprü Barajı'nda sadece kil malzeme için üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Kaya dolgu malzemesinin üç eksenli basınç deneyleri yapılmadığından, gerekli parametreler, öncelikle inşa edilen diğer bazı barajlar üzerinde yapılan çalışmalar dikkate alınarak seçilmiştir. Baraj ile birlikte temel zemininin de davranışını gerçekçi bir biçimde modelleyebilmek için barajın altındaki zemin formasyonları da sonlu eleman modeline dahil edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde dolgu, artırımlı yöntemle kademeler halinde modellenmiştir. Bunun sebebi gerçekte de dolgunun tek bir kademede değil kademeler halinde inşa edilmiş olmasıdır. Analizde kullanılan tabaka kalınlığı 10 m seçilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi analizin tek bir kademede yapılmasıyla kademeler halinde yapılması arasında hesap sonucu ortaya çıkan oturma davranışı açısından çok önemli farklar vardır. Gerçek durumda maksimum oturma değeri baraj gövde dolgusunun ortalarında meydana gelir. Analiz tek bir kademede modellendiğinde maksimum oturma değerinin krette olduğu gözlemlenir [3].



Şekil 3. Akköprü Barajının Sonlu Elemanlar Ağı

Analiz inşaat sonrası durum için yapılmıştır. Barajın kendi ağırlığıyla oturması sonucu meydana gelen deformasyonlar, kil çekirdeğin konsolidasyonu dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca, yıl sonu gerçekleşen dolgu yüksekliğine bağlı olarak her yıl için ayrı ayrı olmak üzere oturma davranışı Plaxis sonlu eleman analizi programı ile incelenerek ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nden yetkililerle yapılan görüşmeler sonucunda, piyezometrelerin son kalibrasyonlarının yapılmadığı öğrenilmiş ayrıca çalışma sırasında barajda henüz su da tutulmadığı için, piyezometre okuma değerleri dikkate alınmamıştır. Su tutulması durumu için ek bir analiz yapılarak baraj gövdesinde meydana geleceği tahmin edilen deformasyonlar da ayrıca belirlenmiştir.

Akköprü Barajı gövde dolgusunda ölçüm aletlerinin kurulduğu üç adet kesit bulunmaktadır. Gövde km: 0+320 ve km: 0+370'teki kesitlere çapraz kollu çökme ölçerler ve piyezometreler, gövde km: 0+320, km: 0+370 ve km: 0+420'ye ise hem çapraz kollu çökme ölçerler hem de piyezometreler yerleştirilmiştir. Bu çalışmada maksimum kesit olan gövde enkesit km: 0+370'teki deformasyonlar incelenmiştir.

Ana kaya, kaya dolgu, filtre kum ve çakıl, alüvyon ve teras zonlarında efektif davranış için kohezyon değeri "0" olmakla birlikte, sayısal analizin stabilitesi açısından bu değer "1 kPa" alınmıştır.

4.2. Kil, Ana Kaya ve Filtre Malzeme Model ve Parametrelerinin Seçimi

Baraj çekirdeğini oluşturan kil malzemenin sonlu elemanlar analizinde kullanılacak parametreleri, üç eksenli basınç deneylerinden alınmıştır. Kilin üç eksenli basınç deney sonuçları ile hacimsel değişim katsayısı (m_v) ve konsolidasyon katsayısı (c_v) değerleri sırası ile Çizelge 2, 3 ve 4'te verilmiştir.

Çizelge 2'de verilen üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre kilin ortalama kohezyonu 108 kPa'dır. Aynı çizelgeye göre kilin ortalama içsel sürtünme açısı 14° 'dir. Analizlerde kilin kohezyon değeri 108 kPa, içsel sürtünme açısı 14° kullanılmıştır. Çizelge 3 incelendiğinde, kil çekirdeğin büyük kısmının maruz kalacağı gerilme seviyeleri olan 400 – 1000 kPa aralığı için, ödometrik modülün ($M = 1 / m_v$) 44000 – 67000 kPa arasında değiştiği ve ortalamasının 50000 kPa olduğu görülmektedir. Ödometrik modül ile elastisite modülü (E) arasında, elastik teori kullanılarak çok bilinen aşağıdaki Poisson oranına (ν) bağlı ilişki elde edilebilir:

$$M = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

Kil için tipik bir ν değeri olan 0.3 seçildiğinde, sonlu eleman analizlerinde $E = 40000$ kPa olarak kullanılabilceği belirlenmiştir. Kil için kullanılması seçilen nihai parametreler, yüksek kohezyon ve düşük içsel sürtünme açısı değerleri göz önüne alındığında, drenajsız davranışa yakın özelliklere sahip olarak görülmektedir. Bu seçim, Atatürk Barajı'nın sonlu eleman modeli oluşturulurken çekirdek malzemesi davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile temsili için parametre belirlenmesinde yapılan öneriler [15] ile uyum içindedir. Ayrıca, laboratuvar deney sonuçları kullanılmayıp, kil için önceki çalışmalardan alınan drenajlı davranışa ait değerler kullanıldığında dahi, barajın deformasyon davranışında beklenildiği üzere belirgin bir fark görülmemektedir. Literatürden alınan değerler ile gerçekleştirilen parametrik çalışma sonuçları Çizelge 5'te sunulmuştur.

Çizelge 2. Kil için Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Numune No	Kohezyon, c(kPa)	İçsel sürtünme açısı, $\phi(^{\circ})$
E2	118	9
E4	103	20
E5	69	6
E9	89	11
E10	98	17
E11	132	13
E12	147	20

Çizelge 3. Kil için Hacimsel Değişim Katsayısı Değerleri

Numune No	m_v Değerleri ($\times 10^{-3}$ m ² /kN)						
	Gerilme Aralığı (kPa/98.1)						
	0.00-0.25	0.25-1.00	1.00-2.00	2.00-4.00	4.00-10.00	10.00-20.00	20.00-25.00
E2	0.0648	0.0472	0.0224	0.0172	0.0148	0.0034	0.02
E4	0.0602	0.0694	0.0396	0.0292	0.0198	0.0054	0.0348
E5	0.0728	0.074	0.0398	0.0338	0.0224	0.0062	0.0382
E9	0.047	0.0692	0.041	0.0344	0.0212	0.0044	0.026
E10	0.0426	0.0512	0.0316	0.0336	0.021	0.0034	0.0212
E11	0.0594	0.08	0.0522	0.0394	0.0214	0.005	0.0294
E12	0.0262	0.0922	0.0744	0.05	0.0224	0.009	0.0586

Çizelge 4. Kil için Konsolidasyon Katsayısı Değerleri

Numune No	c_v Değerleri ($\times 10^{-7}$ m ² /s)			
	Yükler (kPa/98,1)			
	1.00	2.00	4.00	10.00
E2	2.67	-	2.39	1.42
E4	2.60	1.67	1.34	0.87
E5	0.89	0.55	0.47	0.35
E9	6.36	2.29	2.08	0.74
E10	3.38	1.89	2.52	1.42
E11	5.25	2.31	2.20	0.62
E12	0.64	0.60	0.23	0.15

Çekirdekte kullanılan kilin konsolidasyonu da analizlerde göz önünde bulundurulmuştur. Zeminin permeabilite katsayısı k , konsolidasyon deney sonuçları kullanılarak, dolaylı olarak aşağıdaki eşitlik yardımı ile belirlenebilir:

$$k = c_v \gamma_w m_v \quad (5)$$

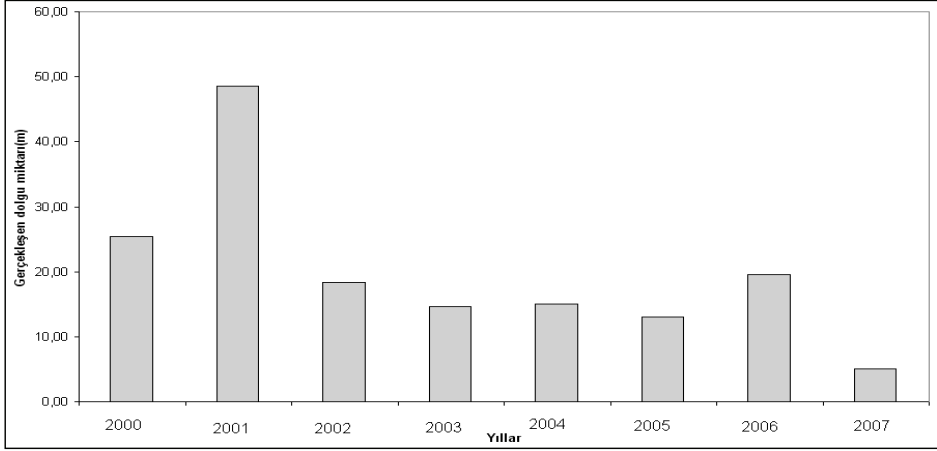
Bu eşitlikte γ_w suyun birim hacim ağırlığı olan 9.81 kN/m³'e eşittir. Baraj çekirdeğinin maruz kalacağı gerilme seviyeleri olan 400 – 1000 kPa aralığında, üzerinde ödometre deneyi gerçekleştirilen yedi numune için konsolidasyon katsayısı değerleri Çizelge 4'te sunulmuştur. Sonlu eleman analizlerinde, bu değerlerin aritmetik ortalaması olan 1.2×10^{-7} değeri kullanılmıştır. Daha önce elde edilen hacimsel değişim katsayısı 1/50000 m² / kN da

Çizelge 5. Kilin Kohezyonunun ve İçsel Sürtünme Açısının Belirlenmesi için Literatürden Alınan Değerlerle Yapılan Parametrik Çalışma Sonuçları

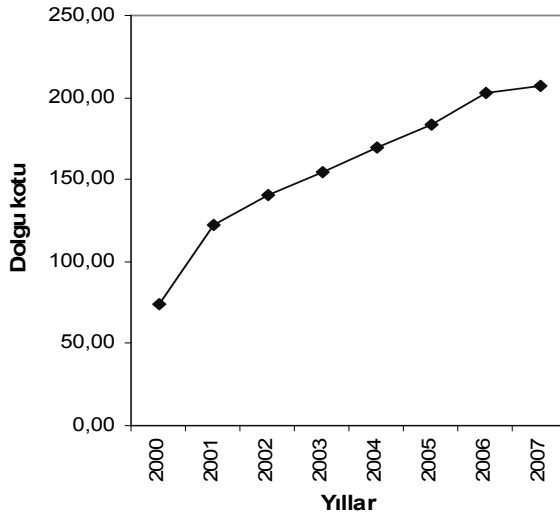
Numune No	Kohezyon, c' (kPa)	İçsel sürtünme açısı, ϕ (°)	Maksimum Oturma (m)
Deneme 1	118	9	2.71
Deneme 2	103	20	2.68
Deneme 3	69	6	2.62
Deneme 4	89	11	2.71
Deneme 5	98	17	2.61
Deneme 6	147	20	2.60

Eşitlik 5'de yerine konulduğunda, analizlerde kilin permeabilite katsayısı için 2.4×10^{-11} m/s değerinin kullanılmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

Dolgu başlangıcından bitimine kadar geçen süre dikkate alınarak, her yıl için gerçekleşen dolgu miktarı (metre cinsinden) ve gerçekleşen dolgu kotu tespit edilip, gerçekleşen dolgu kotu-zaman ve gerçekleşen dolgu miktarı(m)-zaman eğrileri çizilerek kil malzemenin konsolidasyonu sonlu elemanlar analizinde hesaplara dahil edilmiştir. Söz konusu ilişkiler sırası ile Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 4. Yıllara Göre Gerçekleştirilen Dolgu Miktarı



Şekil 5. Gerçekleşen Dolgu Kotu (m) – Zaman İlişkisi

Barajın oturduğu ana kayanın mekanik özelliklerine ait herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Literatürde, ana kayanın deformasyon davranışının barajların sonlu eleman analizlerinde hesaba katıldığı çalışma sayısı son derece sınırlıdır. Bu çalışmada ana kaya durumundaki geçirimsiz peridotitler rijit kabul edilmemiş, Gikas ve Sakellariou [16] tarafından önerilen $E = 450 \text{ Mpa}$ ve $\nu = 0.2$ elastik parametreleri ve Mohr-Coulomb yenilme modeli kullanılarak sayısal modele dahil edilmiştir.

Filtre kum, filtre çakıl ve kaya ufağı zonlarında kullanılan malzeme parametreleri, daha önce gerçekleştirilen bazı çalışmalar ışığında yapılan parametrik çalışma sonrası belirlenmiştir. Da'ao Barajı [17] ve Oroville Barajı'nda [18] gerçekleştirilen incelemelere göre, geçiş zonlarının malzeme parametreleri, sonlu eleman analizleri için birbirlerine yakın alınabilirler. Çizelge 6'da sunulduğu üzere, filtre zonları için seçilen parametrelerin barajın oturma davranışına çok fazla etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu noktadan hareketle, filtre kumun elastisite modülü 100 MPa , filtre çakılın elastisite modülü 150 MPa , kaya ufağının elastisite modülü ise 200 MPa olarak seçilmiştir.

Teras, peridotit-serpantin-kireçtaşı-çört kökenli çakıllardan karbonatın çimentolanması ile oluştuğundan ve çakıl ağırlıklı olduğundan, malzeme parametreleri filtre çakıl zonunda kullanılan malzeme ile özdeş alınmıştır. Talvegdeki alüvyon ise % 75.2 oranında kum ihtiva ettiğinden, filtre kum zonunda kullanılan malzeme ile aynı şekilde modellenmiştir.

4.3. Kaya Dolgu Malzeme Modelinin ve Parametrelerinin Seçimi

Kaya dolgu malzemesinin parametrelerinin belirlenmesinde, Saboya ve Byrne. [10] tarafından sonlu elemanlar yöntemiyle ve hiperbolik yöntem kullanılarak deformasyon incelemesi yapılan 160 m yüksekliğindeki Foz de Areia Barajı'nın analiz sonuçlarından faydalanılmıştır. Söz konusu çalışmada kaya dolgu malzemesinin hiperbolik malzeme parametreleri, daha önce birçok baraj üzerinde yapılan çalışmaların laboratuvar test sonuçlarının derlenmesi yolu ile elde edilmiştir. Saboya ve Byrne. [10] tarafından ilk analizde kullanılan hiperbolik malzeme parametreleri Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7'de sunulan K_E ve K_B , dane boyutunun zemin rijitliği üzerindeki etkisini ifade eden rijitlik parametreleridir. İlk analiz için $E_{50}^{\text{ref}} \approx 50 K_E$ kabulü kullanılmıştır. $\Delta\phi$, hücre basıncının on kat artırılmasına karşılık gelen içsel sürtünme açısındaki azalma miktarıdır. Sertleşen zemin parametrelerinden E_{50}^{ref} için gerçekleştirilen parametrik çalışma sonucu Çizelge 8'de sunulmuştur. Parametrik analiz neticesinde E_{50}^{ref} değerinin analiz sonucunu büyük oranda etkilemediği anlaşılmıştır. E_{50}^{ref} değeri 125000 kPa alınmıştır.

Sertleşen zemin parametrelerinden R_f değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları Çizelge 9'da verilmiştir. Bu parametrenin oluşan deformasyonlarda çok fazla etkisi olmadığı yapılan parametrik analiz sonuçlarında görülmüştür. R_f değeri analizlerde 0.75 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6. Filtre Zonlarının Elastisite Modülünün Belirlenmesi için Yapılan Parametrik Çalışma Sonuçları

	Elastisite Modülü (MPa)	Maksimum deformasyon(m)
Filtre kum	100	
Filtre çakıl	100	2.89
Kaya ufağı	100	
Filtre kum	100	
Filtre çakıl	150	2.75
Kaya ufağı	150	
Filtre kum	150	
Filtre çakıl	150	2.68
Kaya ufağı	200	
Filtre kum	150	
Filtre çakıl	200	2.66
Kaya ufağı	200	
Filtre kum	200	
Filtre çakıl	250	2.63
Kaya ufağı	200	
Filtre kum	200	
Filtre çakıl	300	2.61
Kaya ufağı	300	

Çizelge 7. Foz da Areia Barajının Sonlu Eleman Analizinde Kullanılan Hiperbolik Model Parametresi Aralıkları

Malzeme	K_E	R_f	K_B	m	ϕ	$\Delta\phi$
IB	250-400	0.60	100-200	0-0.30	45	5.5
IC	250-400	0.80	150-200	0-0.30	42	2.0
ID	300-350	0.65	100-200	0-0.30	38	2.0

Çizelge 8. E_{50}^{ref} Değerinin Belirlenmesi için Gerçekleştirilen Parametrik Çalışma Sonuçları

E_{50}^{ref} (kPa)	Maksimum deformasyon (m)
80000	2.72
100000	2.71
125000	2.71
150000	2.70
200000	2.69

Çizelge 9. R_f Değerinin Belirlenmesi için Gerçekleştirilen Parametrik Çalışma Sonuçları

R_f	Maksimum deformasyon(m)
0.70	2.70
0.75	2.70
0.80	2.71

Modülün gerilme bağımlılığını ifade eden m katsayısının uygun değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları Çizelge 10'da verilmiştir. m değeri arttıkça deformasyonların azaldığı, azaldıkça deformasyonların arttığı tespit edilmiştir. Parametrik analiz neticesinde m değeri 0.20 olarak seçilmiştir.

Çizelge 10. m Değerinin Belirlenmesi için Gerçekleştirilen Parametrik Çalışma Sonuçları

m	Maksimum deformasyon(m)
0.20	2.72
0.30	2.68
0.35	2.66
0.40	2.64
0.50	2.60

Parametrik çalışma sonrasında kaya dolgu için belirlenen nihai sertleşen zemin malzeme parametreleri Çizelge 11'de, diğer malzemeler için kullanılan Mohr-Coulomb modeline ait nihai parametreler ise Çizelge 12'de özetlenmiştir.

Çizelge 11. Kaya Dolgu için Analizlerde Kullanılan Malzeme Parametreleri

p_{ref} (kPa)	c_{ref} (kPa)	ϕ	$E_{50}^{ref} = 50 \times K_E$ (kPa)	m	R_f
100	1	40+5	125000	0,20	0,75

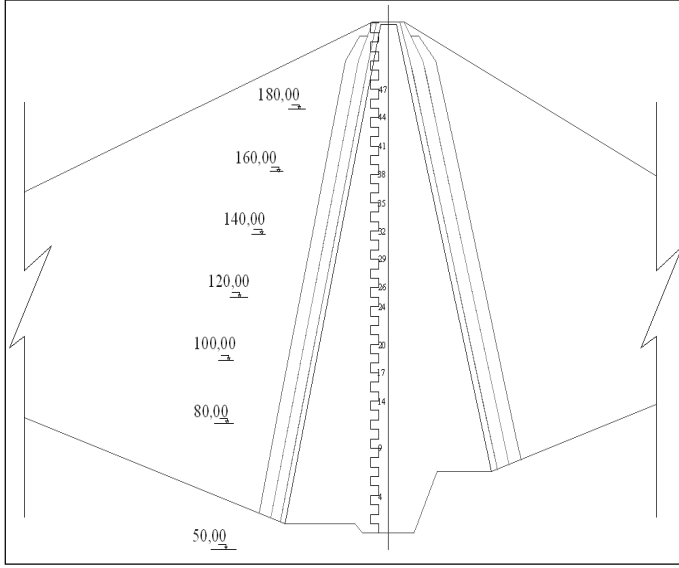
Çizelge 12. Analizlerde Kullanılan Nihai Malzeme Parametreleri

Malzeme	E (MPa)	c (kPa)	ϕ (°)	k (m/s)	γ_{kuru} (kN/m ³)	γ_{doymun} (kN/m ³)
Kil	40	108	14	$2.4 \cdot 10^{-11}$	18	20
Ana Kaya	450	-	50	10^{-1}	20	22
Filtre kum	100	-	37	10^{-1}	19	20
Filtre çakıl	150	-	40	10^{-1}	22	23
Alüvyon	100	-	37	10^{-1}	19	20
Teras	150	-	45	10^{-1}	22	23

5. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Gövde enkesit km: 0+370'te 54 adet çapraz kollu çökme ölçerin kurulu bulunduğu daha önce ifade edilmişti. Yük altındaki dolgu davranışını temsil edebilecek 14 adet çapraz kollu seçilerek okumaları incelenmiştir. Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin numaraları ve dolgu içerisindeki kotları Şekil 6'da verilmiştir.

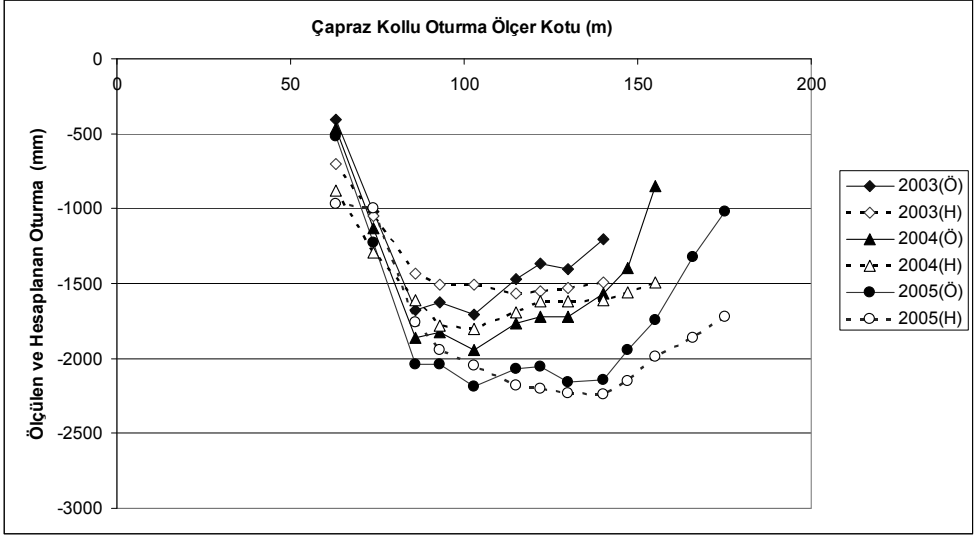
Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde, her yıl sonu itibariyle dolgu imalatının gerçekleşme durumu incelenerek, dolgu yüksekliği 2003, 2004, 2005, 2006 ve 2007 yıl sonları için belirlenmiştir. Dolgu imalatı 2007 yılının son çeyreğinde tamamlandığından, 2007 yılı sonu inşaat sonuna da karşılık gelmektedir. 2003 yılı son okuma tarihi 17.11.2003, 2004 yılı son okuma tarihi 04.11.2004, 2005 yılı son okuma tarihi 25.12.2005, 2006 yılı son okuma tarihi 15.11.2006 ve 2007 yılı son okuma tarihi 19.09.2007'dir. Son okuma tarihindeki dolgu yüksekliğinden hareketle, analizde kademeli inşaat yöntemi kullanıldığından, sayısal modelde hangi safhaya karşılık geldiği tespit edilerek yıl sonu okumaları ve model analiz sonuçları düşey deformasyonlar açısından karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.



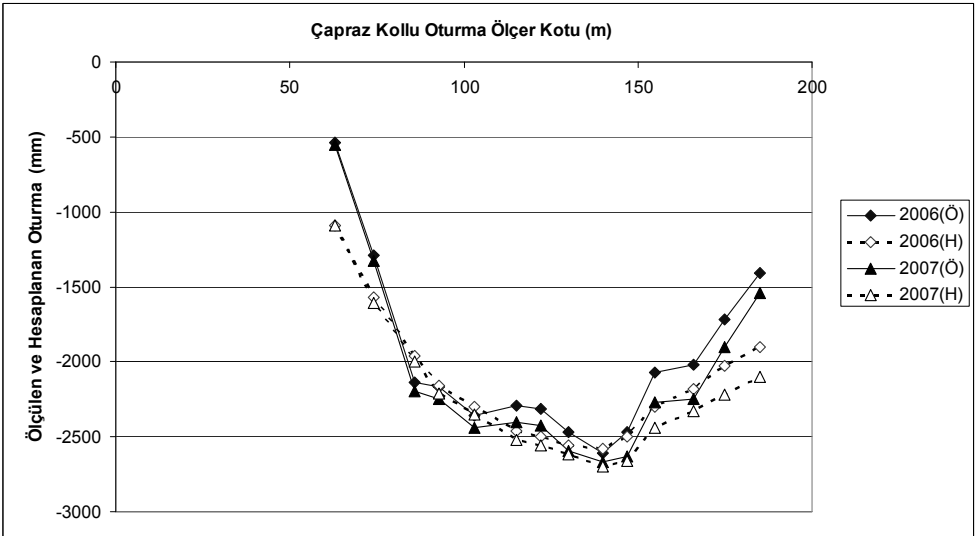
Şekil 6. Gövde Enkesit km: 0 + 370'de Seçilen Çapraz Kollu Çökme Ölçerler

Örneğin, 2003 yılı sonu itibariyle dolgu yüksekliği 107.07 m'dir. Şekil 7'de 2003 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu görülmektedir. Yapılan sonlu eleman analizi sonucunda hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme 1570 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme ise 1705 mm'dir. Şekil 8'de ise 2007 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu görülmektedir. İnşaat sonu durumu olarak değerlendirilebilecek tarih olan 19.09.2007 itibariyle dolgu yüksekliği 162.50 m'dir. Yapılan analiz sonucunda hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme 2700 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme 2670 mm'dir. Tüm ölçüm ve sonlu eleman analiz sonuçlarında, düşey yer değiştirmelerin, baraj temelinden krete doğru çıktıkça arttığı, baraj yüksekliğinin yaklaşık yarısında maksimuma ulaştığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir.

Şekil 9 ve 10'da 2003 – 2007 yılları arasında, baraj gövdesi içerisinde çeşitli yüksekliklerde yıl sonu itibarı ile ölçülen (Ö) ve hesaplanan (H) oturmalar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sunulan grafiklerden de görüleceği gibi baraj, dolgu imalatının başından itibaren beklenildiği üzere oturma davranışı göstermektedir. Baraj dolgusu, maksimuma ulaşan dolgu hacmi ve çekirdekte bulunan kil malzemenin konsolidasyonu neticesinde grafiklerden de anlaşılacağı gibi 2007 yılının sonunda önceki yıllara göre en büyük oturma değerine ulaşmıştır. Bu maksimum değer baraj yüksekliğinin yaklaşık ortasında ortaya çıkmaktadır. Gözlenen bu davranış, Ünsever [19] tarafından incelenen Muratlı Barajı, Özkuzukıran vd. [14] tarafından incelenen Kürtün Barajı ve Kyrou vd [20] tarafından incelenen Lefkara Barajlarıyla kıyaslandığında maksimum oturmanın gerçekleştiği yer açısından benzerlik göstermektedir. Araziden alınan çapraz kollu çökme ölçer okumaları (Ö) ve sonlu eleman model sonuçları karşılaştırıldığında, baraj dolgusunda oluşan düşey yer değiştirmeler bakımından genel bir uyum gözlenmektedir. Özellikle oluşan en büyük oturma miktarının tahmini konusunda oldukça başarılı olan sayısal modelde, hesaplanan ve



Şekil 9. 2003, 2004 ve 2005 Yılları İtibarı ile Ölçülen (Ö) ve Hesaplanan (H) Oturmalar

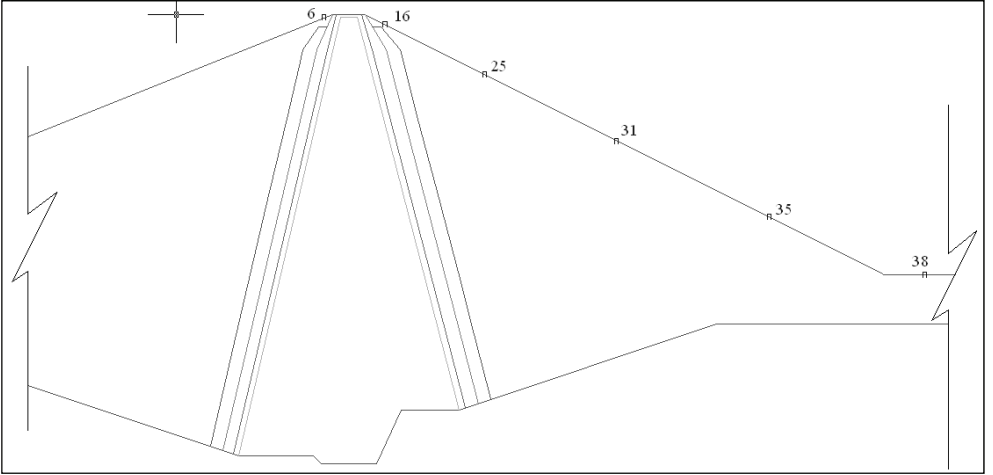


Şekil 10. 2006 ve 2007 Yılları İtibarı ile Ölçülen (Ö) ve Hesaplanan (H) Oturmalar

Oluşturulan sonlu eleman modelinin baraj davranışını ne kadar iyi temsil ettiğini bir başka açıdan incelemek üzere, araziden alınan harici çökme röperlerine ait okumalar da incelenmiştir. Akköprü Barajı gövde enkesiti km: 0+370'te 6 adet harici çökme röperi bulunmaktadır (Şekil 11). Harici çökme röperleri gövde dolgusu bittikten sonra projedeki

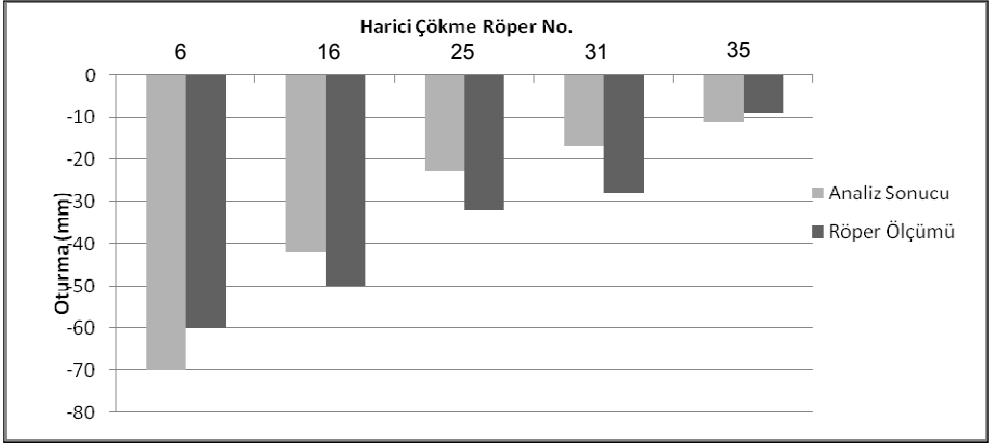
yerlerine yerleştirilmiştir. Harici çökme röperlerine ait ilk okumalar 06.05.2008 tarihinde alınmıştır.

2007 yılının son çeyreğinde bitirilen gövde dolgusu imalatı ile son okumanın alındığı tarih arasındaki süre olan yaklaşık iki yıl, sonlu eleman programında simüle edilerek, sonuçlar araziden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Dolgu imalatı bitiminden yaklaşık iki yıl sonra ölçülen ve sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan düşey yer değiştirmeler, Şekil 12'de karşılaştırılmaktadır. Şekil 12 incelendiğinde, baraj yüzeyinin farklı yüksekliklerinde bulunan harici çökme röperlerinden elde edilen oturma değerleri ile hesaplanan oturmaların birbiri ile uyumlu olduğu ve en yüksek hatanın ortaya çıktığı 31 numaralı röperde bile farkın yaklaşık 10 mm değerini aldığı görülmektedir. Bu sonuçlar sonlu eleman programının hem zamana bağlı deformasyonlar hem de kil çekirdek bölgesi dışında oluşan oturmaların tahmininde başarılı bir performans gösterdiğini işaret etmektedir.

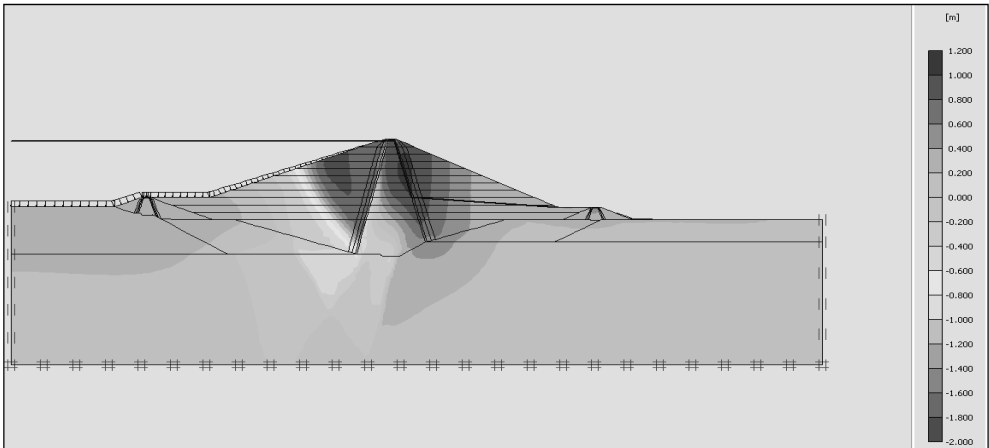


Şekil 11. Gövde Enkesiti km:0+370'deki Harici Çökme Röperleri

Su seviyesi yükseldikçe artan yatay ve düşey yer değiştirmeler baraj davranışını önemli derecede etkilemektedir. Sonlu eleman modelinin barajın oturma davranışını yeterli derecede iyi temsil ettiği anlaşıldığından, barajın su tutma aşamasında oluşacak düşey deformasyonlar hakkında tahminde bulunulmasına yönelik bir analiz de bu çalışmaya dahil edilmiştir. Önceden de belirtildiği gibi, bu çalışma gerçekleştirildiği sırada, Akköprü Barajı'nda henüz su tutulmaya başlanmamıştır. Modele su yükü de dahil edilerek su tutulması sonrasında dair oturma tahminleri yapılmıştır. Analizde, inşaat sonrası oluşan deformasyonlar dikkate alınmamış, sadece su tutulması sonrasında meydana gelmesi beklenen deformasyonlar incelenmiştir.



Şekil 12. Harici Çökme Röper Okumaları ile Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 13. Rezervuar Dolumu Sonrası Oluşması Beklenen Nihai Düşey Deformasyonlar

Yapılan sonlu eleman analizi sonrasında rezervuar dolum sonrası durum incelendiğinde, önemli düşey oturmaların barajın memba tarafında, özellikle üst kotlarda gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 13). Barajın mansap kısmı üst kotlarında ise, ters yönde kabarma davranışı gözlenmektedir. Rezervuar dolum sonrası hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme 1860 mm, krette gözlenen oturma ise yaklaşık 800 mm'dir. 162.5 m yüksekliğinde bir barajın, Lawton ve Lester [21]'in 1925 ve 1964 yılları arasında inşa edilen 11 barajı inceleyerek oluşturdukları eşitliğe göre, inşa sonrası yaklaşık 2.1 m toplam oturma yapması beklenebilir. Akköprü Barajı için inşa sonrası oturmanın bir miktar daha düşük olduğu görülmektedir. Kaya dolgu barajlarda kret oturması ise Sowers vd. [22] ve ICOLD [23] yaklaşımlarına göre yüksekliğin (H) yüzde 0.2'si ile 1.0'i arasında değerler

alabilir. Akköprü Barajında inşa sonrası kret oturmasının yaklaşık %0.5 H değerine ulaşması beklenmektedir. Bu değer, Sherard vd. [26] tarafından ıslatılmış kaya dolgu kullanılarak yüksek kalitede işçilik ile inşa edilmiş barajlar için önerilen sınır olan %0.4 H değerini az da olsa aşmaktadır.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

162.5 m yükseklikte, kil çekirdekli kaya dolgu tipteki Akköprü Barajının oturma davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenerek, sonuçlar sahadan alınan ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Bundan sonra gerçekleştirilecek benzer çalışmalara ışık tutması amacı ile, özellikle sonlu eleman model parametrelerinin seçimi üzerinde detaylı olarak durulmuştur.

Sertleşen zemin modeli ve daha önce gerçekleştirilen çalışmalardan alınan malzeme parametreleri ile tanımlanan kaya dolgu ve üç eksenli basınç ile ödometre deneyleri kullanılarak Mohr-Coulomb yenilme modeli yardımıyla sayısallaştırılan kil malzemedeki oluşan sonlu eleman modelinin, barajın gövdesinde ve yüzeyinde oluşan inşa aşamasındaki oturmaları büyüklük ve zamanla değişim açısından yeterli doğrulukta belirleyebildiği görülmüştür.

Hesaplanan ve ölçülen yer değiştirme değerleri arasındaki önemli farklar barajın tepe noktasına yaklaşıldıkça ortaya çıkmaktadır. Bu farklılığın, barajın üst kısmında baraj dolgusunun sıkıştırılması için harcanan enerjinin dolgu kesiti küçüldükçe dolgunun diğer kısımlarına harcanan enerjiye oranla daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

İki boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle inşa sonrası durum için yapılan analizin ardından elde edilen sonuçlar ile ölçümlerin ortaya koyduğu davranış arasındaki benzerlikler, su tutma gibi diğer koşullarda da sonlu eleman yönteminin oluşacak yer değiştirme ve gerilmelerin tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu noktadan hareketle, rezervuar dolum sonrası meydana gelmesi beklenen düşey yer değiştirmeler de incelenmiştir. Barajın yaklaşık 1.9 m oturma yapacağı öngörülmektedir. Maksimum düşey yer değiştirmenin, su ile temas halinde bulunan barajın memba üst kısmında ortaya çıkması beklenmektedir. Barajın mansap alt kısmının su yüklemesinden çok fazla etkilenmeyeceği analiz sonucundan anlaşılmaktadır.

Semboller

- c : Kohezyon
- c_v : Konsolidasyon katsayısı
- CFRD : Beton yüzü kaya dolgu baraj
- D : Düşey
- E : Young Modülü
- E_{50} : Yükleme esnasında çevre basıncına bağlı modül
- E_{50}^{ref} : Referans çevre basıncındaki modül

H	: Baraj yüksekliği
k	: Permeabilite katsayısı
K_B	: Dane boyutunun zemin rijitliği üzerindeki etkisini ifade eden parametre
K_E	: Dane boyutunun zemin rijitliği üzerindeki etkisini ifade eden parametre
m	: Modül gerilme bağımlılığı katsayısı
M	: Ödometrik modül
m_v	: Hacimsel değişim katsayısı
p^{ref}	: Referans çevre basıncı
q	: Deviatorik gerilme
q_f	: Nihai deviatorik gerilme
q_a	: Deviatorik gerilmenin asimptotik değeri
R_f	: Göçme oranı
Y	: Yatay
$\Delta\phi$: hücre basıncının on kat artırılmasına karşılık gelen içsel sürtünme açısındaki azalma miktarı
ε	: Eksenel birim deformasyon
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
γ_{doymun}	: Doygun birim hacim ağırlık
γ_{kuru}	: Kuru birim hacim ağırlık
ν	: Poisson Oranı
σ_3'	: Çevre Basıncı

Teşekkür

Yazarlar, saha ölçüm sonuçlarını bu araştırma çalışması kapsamında kendilerine sunan Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- [1] Marachi, D., Chan, C., Seed, R.B., Duncan, J.M., Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials, Report TE-069-5, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1969.
- [2] Duncan, J.M., Byrne, P.M., Wang, K.S., Mabry, P., Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses, Geotechnical Engineering Research Report, N.UGH/GT/80-01., Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1980.

- [3] Clough, R.W., Woodward, R.J., Analysis of Embankment Stresses and Deformations, J. of Soil Mech. And Found. Div., 93, SM4, 529-549, 1967.
- [4] Zomorodian, A., Sahebzadeh, K., Ooria, A., Effect of Number of Layers on Incremental Construction Analysis of Earth Dams, The Electronic J. of Geotech. Engn., 11, C, 2006.
- [5] Szostak-Chrzanowski, A., Massiera, M., Relation Between Monitoring and Design Aspects of Large Earth Dams, 12th Int. Symp. On Deformation Measurements and Analysis, Baden, Austria, 2006.
- [6] Lefebvre, G., Duncan, J.M., Wilson, E.L., Three-Dimensional Finite Element Analysis of Dams, J. of Soil Mech. And Found. Div., 99, SM7, 495-507, 1973.
- [7] Hunter, G., Fell, R., Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams, J. of Geotech. And Geoenv. Eng., 129, 10, 909-917, 2003.
- [8] Duncan, J.M., Chang, C.Y., Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil, J. of Soil Mech. And Found. Div., 96, SM5, 1629-1653, 1970.
- [9] Marsal, R.J., Mechanical Properties of Rockfill, Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume, Ed. Hirschfeld, R.C., Poulos, S.J., New York, 1973.
- [10] Saboya, F., Byrne, P.M., Parameters for Stress and Deformation Analysis of Rockfill Dams, Can. Geotech. J., 30, 690-701, 1993.
- [11] Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., The Hardening Soil Model : Formulation and Verification, Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of Plaxis, Rotterdam, 5-17, 1999.
- [12] Lollina, P., Cottechia, F., Zdravkovic, L., Numerical Analysis and Monitoring of Pappadai Dam, Can. Geotech. J., 42, 1631-1643, 2005.
- [13] Aflaki, E., Comparing Numerical Analysis Predictions and Experimental Data for Shirindarreh Embankment Earth Dam, Asian J. Applied Sci., 2, 50-62, 2009.
- [14] Özkuzukıran, S., Özkan, M.Y., Özyazıcıoğlu, M., Yıldız, G.S., Settlement Behavior of a Concrete Faced Rock-Fill Dam, Geotech. Geological Eng., 24, 1665-1678, 2006.
- [15] Straubhaar, R., Malla, S., Atatürk Dam and Hydroelectric Power Plant Analysis of Dam Displacements, Complementary Study Report, 200034.50.51, Pöyry Energy Ltd., Zurich, 2007.
- [16] Gikas, V., Sakellariou, M., Settlement Analysis of the Mornos Earth Dam (Greece) : Evidence from Numerical Modeling and Geodetic Monitoring, Engineering Structures, 30, 3074-3081, 2008.
- [17] Xing, H., Gong, X., Zhou, X., Fu, H., Construction of Concrete-Faced Rockfill Dams with Weak Rocks, J. of Geotech. Geoenv. Eng., 132(6), 778-785, 2006.
- [18] Kulhawy, F.H., Duncan, J.M., Stresses and Movements in Oroville Dam, J. of Soil Mech. and Found. Div., 98(SM7), 653-665, 1972.

- [19] Ünsever, Y.S., Ön Yüzü Asfalt kaplı Muratlı Kaya Dolgu Barajı'nın Deformasyon Davranışı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [20] Kyrou, K., Penman, A., Artemis, C., The First 30 Years of Lefkara Dam, Geotechnical Engineering, 158(GE2), 113-122, 2005.
- [21] Lawton, F.L., Lester, M.D., Settlement of Rockfill Dams, Eighth International Congress on Large Dams, Edinburgh, 1964.
- [22] Sowers, G.F., Williams, R.C., Wallace, T.S., Compressibility of Broken Rock and the Settlement of Rockfills, Sixth International Conference on Soil Mech. Found. Eng., Toronto, 1965.
- [23] ICOLD, Selecting Parameters for Large Dams – Guidelines and Recommendations, Bulletin 72, ICOLD Committee on Seismic Aspects of Large Dams, 1985.
- [24] Sherard, J.L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F., Clevenges, W.A., Earth and Earth-Rock Dams, New York, 1963.