

ARAŞTIRMA MAKALESİ

ALİBEY BARAJI TEMEL ZEMİNİ DEFORMASYON DAVRANIŞININ SAYISAL VE DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Havvanur KILIÇ

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

Geliş Tarihi: 30.10.2002

THE DETERMINATION OF DEFORMATION BEHAVIOUR OF ALİBEY DAM FOUNDATION SOIL BY MEANS OF NUMERICAL ANALYSES AND LABORATORY TESTING TECHNIQUES

SUMMARY

In this study, deformations of the Alibey dam foundation soil have been investigated by means of finite element analysis and laboratory testing techniques. During the construction of the dam embankment the changes of the stresses have'nt been measured in the field. Therefore effective stresses determined from the numerical analyses had to be in used laboratory works. Thence, Alibey dam and the natural foundation soil have been numerically modelled in plain strain condition and stress-strain-consolidation behaviour of the foundation soil have been investigated by using coupled analysis technique. In the numeric analyses material parameters were determined from the field and laboratory works. The results show that there is a good agreement between the settlements computed from analysis and the settlement obtained from the field measurements. In laboratory block samples were brought to the predicted initial field stress conditions in an extended type of Rowe Cell. The triaxial test specimens prepared from these blocks were tested under anisotropic stress increments allowing consolidation in accordance with the field conditions. The vertical and lateral effective stresses predicted from the numerical analysis were used in stress path application. In each loading stage the vertical strains predicted from numerical analyses and measured in the experimental work were compared and found to be in good agreement.

ÖZET

Bu çalışmada, Alibey barajı temel zemininde meydana gelen deformasyonlar, sonlu eleman analiz yöntemi ve laboratuarda gerilme izi deney teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Baraj dolgu inşaatı sırasında, dolgu inşaatı nedeniyle gerilmelerde meydana gelen değişmelerin arazide ölçülmemesi nedeniyle sayısal analiz sonucunda belirlenen efektif gerilmeler deneysel çalışmada kullanılmıştır. Bu amaçla Alibey barajı temel zeminini sonlu elemanlar yöntemiyle düzlem şekil değiştirme durumunda modellenerek, temel zemininin gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon davranışı coupled analize incelenmiştir. Arazi ve laboratuvar çalışmalarından belirlenen malzeme parametreleri ile yapılan sayısal analizden belirlenen oturma-zaman ilişkisi arazi ölçümleri ile uyumludur. Deneysel çalışmada örselenmemiş örnek alma olanağı olmadığı için laboratuarda yeniden yapılandırılmış, blok zemin örnekleri kullanılmıştır. Hazırlanan blok örnekten üç eksenli hücreye zemin örneği aktarılmış ve sayısal analizden aşamalı yükleme sonucunda elde edilen yan ve düşey efektif gerilmeler deney örneği üzerine anizotropik koşullarda aşama aşama etkilmiştir. Herbir yükleme aşamasında drenajsız yükleme ve konsolidasyon sırasındaki düşey yer değiştirmeler ölçülerek birim deformasyonlar belirlenmiştir. Herbir kesitte belirli kotlarda yeşil kilde ve siyah kilde ölçülen ve hesaplanan düşey birim deformasyon değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

1. GİRİŞ

Alibey Barajında olduğu gibi, kalın yumuşak zemin tabakaları üzerinde inşa olunan toprak dolgularında, temel zemininin davranışının önceden öngörülebilmesi büyük önem taşımaktadır. Yumuşak temel zemini üzerine inşa edilen dolgudan dolayı temel zemininin davranışını incelemek için arazi gözlemlerine dayanan bir yöntem geliştirilmiştir [1]. Bu yöntemde efektif gerilmelerin belirlenmesi için, toplam gerilmelerin hesaplanmasındaki uygulama, zeminin izotropik elastik bir ortam olduğu varsayımına göre yapılmakta, boşluk suyu basıncı ise arazide gerilme izinin belirleneceği bölgeye yerleştirilecek bir piezometreyle belirlenmektedir. Diğer bir yöntem de ise Cam-Clay teorisi kullanılarak aşamalı yükleme durumunda efektif gerilme analizi ile normal konsolide killerin plastik davranışı hesaba katılmakta ancak her yükleme aşaması sonunda durgun şartlara dönüş yani tam konsolidasyon noktasına kadar konsolidasyon devresinin devam edeceği kabul edilmektedir [2]. Ayrıca her iki yöntemde de gerilme eksenini dönmemesinin olmadığı merkez çizgisi üzerindeki davranış incelenebilmekte ve arazi ölçümlerine gereksinim duyulmaktadır. Bu gereklilikler yöntemlerin pratikte uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır. Genellikle arazide inşaat sırasında, temel zeminine yerleştirilen ölçüm aygıtlarının işlevini yitirmesi ve pahalı olması nedeniyle ve inşaat sırasında dolgu yüklemelerinden dolayı oluşan ek boşluk suyu basınçlarının tümüyle sönmelenmesini beklemenin olanaksız olması nedeniyle, uzun süreli davranışın incelenmesi genellikle sayısal analizlerle gerçekleştirilmektedir. Günümüzde de arazide yükleme sırasında yumuşak killerin davranışını tam olarak açıklayabilen yaklaşımlar geliştirilememiştir. Bu nedenle analizlerle belirlenen gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon davranışının arazi ölçümleriyle ve laboratuvarda yapılacak modelleme çalışmalarıyla kontrol edilmesi gerekmektedir.

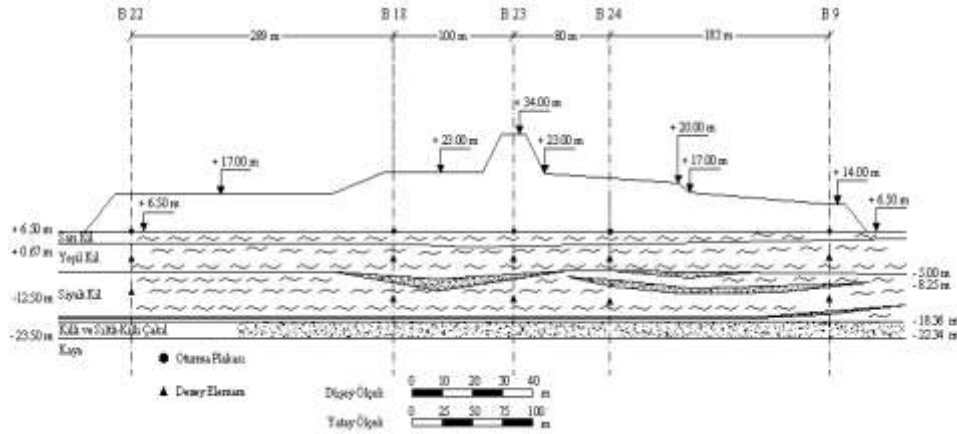
Bugüne kadar gerek yapım sırasında, gerek sonrasında değişik araştırmacılar Alibey Barajı temel zemininde meydana gelen deformasyonları incelemiştir. Baraj inşaatı sırasında ve inşaat tamamlandıktan sonra yapılan analizlerle barajın gerilme deformasyon davranışı incelenmiş ancak, konsolidasyon davranışı incelenmemiştir [3], [4]. Mercangöz (1996) 'dan alınan gerilme ve boşluk suyu basıncı değerleri kullanılarak temel zemininin konsolidasyon davranışı Terzaghi konsolidasyon teorisi kullanılarak araştırılmıştır [5],[4]. Daha sonra baraj temel zemininin davranışı coupled analizle incelenmiştir [6], [7]. Böylece, gerilme-deformasyon-konsolidasyon analizlerinin daha gerçekçi olarak yapılması olanağı doğmuş ve non-lineer gerilme-şekil değiştirme davranışı, inşaat süresince geometride ve zemin özelliklerinde meydana gelen değişimler gibi karmaşık durumlar, sonlu eleman zemin modeline aktarılabilirdiğinden sayısal analiz hesap sonuçları arazi ölçümleriyle daha uyumludur.

Bu çalışmada, Alibey barajı temel zemininde meydana gelen deformasyonlar, sonlu eleman analiz yöntemi ve laboratuvarda gerilme izi deney teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada Alibey barajı temel zemini sonlu elemanlar yöntemiyle düzlem şekil değiştirme durumunda modellenerek, temel zemininin gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon davranışı coupled analizle incelenmiştir. Baraj temel zemininin sayısal olarak modellenmesi ve modelleme sonuçları [7] ve [8] 'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. İkinci aşamada, analizlerden belirlenen efektif gerilmelerle deneysel çalışma yürütülmüştür. Deneysel çalışmada Rowe hücresi ile arazide başlangıç gerilme durumuna göre gerilme tarihçesi belirli blok örnekler hazırlanmış ve bu blok örnekten üç eksenli hücreye zemin örneği aktarılmıştır. Şekil 1 'de gösterildiği gibi B22, B18, B23, B24 ve B9 akslarının her birinde farklı iki derinliğe (-1.0 m ve -12.5 m kotlarına) karşılık gelen zemin örnekleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylece zemin örneği belirli bir gerilme izinde anizotrop gerilme sisteminde yüklenerek meydana gelen birim deformasyonlar laboratuvarda belirlenmiştir.

2. ALİBEY BARAJI VE TEMEL ZEMİNİ

İstanbul şehrinin su gereksinimini karşılamak üzere Alibey Deresi üzerinde inşa edilen Alibey Barajı, Alibeyköy Deresi üzerinde inşa edilmiş toprak dolgu bir barajdır. Barajın kret genişliği 15 m, yüksekliği 28 m, taban genişliği 304 m, uzunluğu ise 550 m dir. Toprak dolgu hacmi 2 milyon m³ civarında olan Alibey Barajı'nda tipik bir kesit kil çekirdek yanında çakıllı ve kumlu filtre malzemeleri ve en dışta kaya dolgudan oluşmaktadır. Genel olarak Alibey Barajı menba batardosu (B22 aksı), ana gövde (B23 aksı), mansap batardosu (B9 aksı) ve aralarda yer alan geniş ara dolgularadan (B18 ve B24 aksları) oluşmuştur. Ana gövde ile mansap batardosu aynı doğrultuda, menba batardosu farklı doğrultuda tasarlanmıştır. Alışılmışın dışında bir en kesite sahip olan bu toprak dolgu baraj temel zemini üzerine aşamalı olarak yerleştirilmiştir.

Baraj aks yeri ve çevresi yayvan "V" tipini oluşturan bir vadide yer almakta olup akarsu vadisi düzlüğü ortalama 300 m genişliktedir. Vadi tabanında grovak kayaları Alibey Deresi'nin değişik dönemlerde taşıdığı kalın bir alüvyon tabakası ile örtülmektedir. Vadi talveg'inde ortalama 30-33 m 'yi bulan alüvyal çökeller, mevcut sondajlardan elde edilen verilere göre ana kayayı oluşturan grovacklara kadar endeks özellikleri farklı 4 ana zondan meydana gelmiştir. Bu zonlar yüzeyden itibaren sarı kil, yeşil kil, siyah kil (gri kil) ve killi-kumlu çakıl tabakalarıdır. Yeraltı suyu zemin yüzünden 1.5m aşağıdadır. Toprak dolgu inşası sırasında temel zemininde drenajsız göçmeye karşı güvenliğin sağlanması ve zemin hareketlerinin kontrol altında tutulabilmesi için geniş kapsamlı arazi ölçümleri yapılmıştır. İnşaatın tamamlanmasından sonrada devam eden 25 yıllık oturma-zaman ölçümleriyle, barajın üzerine yerleştirildiği alüvyon zeminin uzun süreli davranışı hakkında bilgi edinilmiştir. [5], [6] ve [7] 'de Alibey Barajı yerleşim planı, geometrisi ve teknik özellikleri hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Şekil 1'de baraj dolgusu, temel zemini kesiti, temel zeminine yerleştirilen oturma plakalarının yerleri ve yeşil ve siyah kilde -1.0 m ve -12.50 m kotlarında yapılan gerilme izi deney örneklerinin yerleri belirtilmiştir.



Şekil 1. Baraj temel zemini kesiti

2.1. Baraj Temel Zemininin Geoteknik Özellikleri

Barajın inşasına başlamadan önce 1966 ve 1967 yıllarında ve baraj inşaatı tamamlandıktan sonra 1996 yılında arazi ve laboratuvar incelemeleri yapılmıştır. Bu kapsamda arazide 1968 yılında veyn deneyleri, 1996 yılında da Standart Penetrasyon

Deneyi (SPT) ve Presyometre deneyleri (PM) yapılmıştır. 1966 yılında DSİ laboratuvarlarında ve ABD Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) laboratuvarlarında ve 1996 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Zemin Mekanik Laboratuvarlarında temel zemininden alınan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde yapılan deneylerle temel zemininin mukavemet, gerilme-şekil değiştirme ve yük altında sıkışabilirlik özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla standart ve çevrimli ödometre deneyleri ve CRS konsolidasyon ve kriş deneyleri ile mukavemet ve yükleme altında boşluk suyu basıncı artış karakterlerinin belirlenmesi için anizotropik konsolidasyonlu-drenajsız (CK_0U) ve izotropik konsolidasyonlu-drenajsız (CIU) tipi üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

Dolgu inşaatının başlamasından önce ve sonra yapılan bu incelemelere göre, baraj yapımından önce benzer başlangıç koşullarında olması beklenen alüvyal çökellerin, farklı yüklemeler altında ulaştıkları durumlar incelenerek sayısal çalışmalar için gerekli zemin parametreleri saptanmıştır. Analizlerde temel zemininin başlangıç koşulları ve başlangıç malzeme parametreleri barajın inşaatına başlanılmadan önce yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarından [3], sıkışma ve mukavemet parametreleri ise [6], [7] ve [9]’dan alınmıştır. Baraj temel zemini malzeme parametreleri özetlenerek analizlerde kullanılan parametreler verilmiştir [10]. Arazi zemin etüdü ve laboratuvar araştırmalarından temel zemini profili ve zemin özellikleri belirlenmiştir. Tablo 1 de baraj temel zemininin özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Baraj temel zemini özellikleri

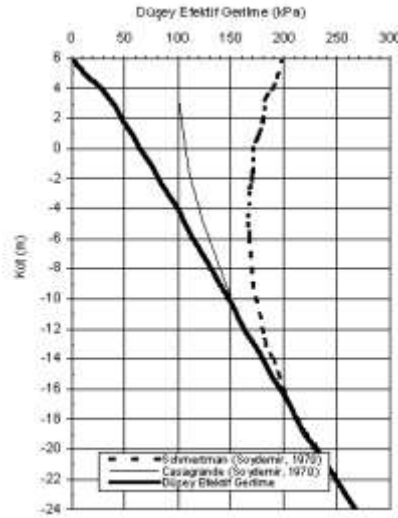
Zemin Özelliği	Sarı Kil	Yeşil Kil	Siyah Kil	Killi kumlu çakıl	Kum bantı
Kot (m)	+6.5-+3.0	+3.0- -4.0	-4.0- -18.0	-18.0- -23.0	-
Likit Limit (%)	20-40	40-60	55-70	-	-
Plastik Limit (%)	15-35	15-40	15-40	-	-
Su İçeriği (%)	20-40	25-40	40-60	-	-
Birim Hacim Ağırlık kN/m^3	20	19	17	19	18
Zemin Sınıfı (USCS)	ML	CH	CH	GM , GC	SM, SW
SPT (N) Sayısı	-	6-31	6-31	20-30	10-20
İçsel sürtünme açısı $\phi' ^0$	16-20	10-26	11-18	35	32

2.1.1. Konsolidasyon ve Permeabilite Özellikleri

Şekil 2’de standart ödometre deneyinden belirlenen arazi ön konsolidasyon basıncı profili gösterilmiştir. Casagrande ve Schmertman ön konsolidasyon basıncı belirleme yöntemlerine göre saptanan ön konsolidasyon profillerinde Schmertman yöntemine göre belirlenen profile sarı kil tabakası aşırı konsolide, yeşil kil ve siyah kil tabakaları hafif aşırı konsolide olarak görülmektedir. Casagrande yöntemine göre belirlenen profile ise sarı kil aşırı konsolide (OCR 3-6), yeşil kil hafif aşırı konsolide (OCR 1.5-3) ve siyah kil tabakası normal konsolide (OCR 1-1.5) olarak görülmektedir [3].

Standart ödometre deneyi sonuçlarından, normal konsolidasyon çizgisinin eğiminden λ sıkışma indeksi ve boşaltma-tekrar yükleme çizgisinin eğiminden κ şişme indeksi belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler konsolidasyon deneyindeki ortalama boşluk oranı değerlerine bölünerek modifiye edilmiş sıkışma ve şişme indeksi λ^* ve κ^* değerleri belirlenmiştir [7]. λ^* ve κ^* değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 3’de gösterilmiştir. Standart konsolidasyon ve sabit hızlı konsolidasyon (CRS) deneylerinden sıkışabilirlik ve permeabilite karakteristikleri belirlenmiştir. Bu deneylerden belirlenen parametreler Tablo 2 de sunulmuştur. Permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişiminin yaklaşık

lineer bir e -log k_v dağılımı şeklinde olduğu görülmüş ve permeabilite değişim katsayısı C_k (e -log k_v nin eğimi) ile boşluk oranı e_0 arasında $C_k=(0.3-0.5)e_0$ ilişkisi ve C_k ile sıkışma indisi C_c arasında $C_c=0.80C_k$ ilişkileri belirlenmiştir [11]. Yapılan ödometre deneylerinden, c_v değerlerinin doğal zemindeki yüklemeye öncesi efektif düşey gerilmeler ve yüklemeye karşılık gelen gerilme artış değerleri civarında belirli bir dağılım göstermemesi nedeni ile bütün ödometre deneylerinden elde edilen c_v değerleri incelenmiş ve bütün tabakalar için ortalama zemin karakterini örneklediği varsayılan ortalama bir değer olarak $c_v=4.8 \times 10^{-8}$ m²/s olarak belirlenmiştir [3].

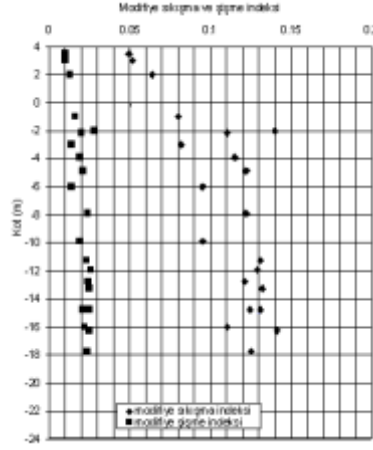


Şekil 2. Arazi ön konsolidasyon basıncı (Soydemir, 1970)

Tablo 2. Laboratuvar deneylerinden belirlenen sıkışabilirlik ve permeabilite karakteristikleri

	Sıkışabilirlik ve permeabilite karakteristikleri	
	Yeşil kil	Siyah kil
Boşluk oranı (e) %	0.55-1.10	0.85-1.82
Sıkışma katsayısı C_c	0.15-0.55	0.30-0.681
Konsolidasyon katsayısı (ödometre) (c_v) m ² /s	5×10^{-8} - 4×10^{-9}	
Konsolidasyon katsayısı (CRS) (c_v) m ² /s	1×10^{-5} - 8×10^{-8}	
Permeabilite katsayısı (ödometre) (k) m/s	1×10^{-9} - 1×10^{-10}	
Permeabilite katsayısı (CRS) (k) m/s	8×10^{-9} - 2×10^{-11}	
Permeabilite değişim katsayısı (C_k)	0.244-0.823	
Hacimsal sıkışma katsayısı (ödometre) (kPa) ⁻¹	1×10^{-3} - 8.23×10^{-5}	

Arazi boşluk suyu basıncı ölçümleri sönümlenmesinden çift yönlü drenaj durumunda $t=100$ gün ve konsolidasyon yüzdesi $U=\%30$ için c_v değeri 1.2×10^{-6} m²/s olarak belirlenmiştir. Menba batardosuna yerleştirilen yeşil kil tabakası ve siyah kil tabakası içinde kalan hidrolik piezometrelerden ölçülen permeabilite katsayısı sırasıyla 2×10^{-8} m/s ve 3×10^{-9} m/s olarak belirlenmiştir [3].



Şekil 3. Modifiye sıkışma ve şişme indeksi

2.1.2. Mukavemet Özellikleri

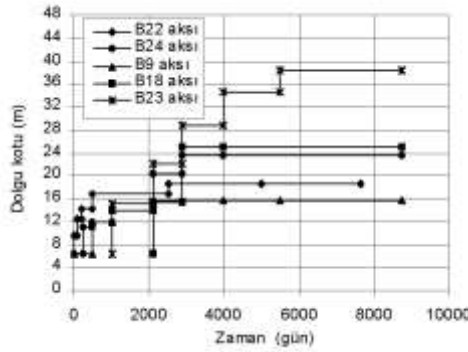
Kil tabakaların mukavemet parametrelerini belirlemek için laboratuarda çok sayıda izotropik konsolidasyonlu drenajsız (CIU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler baraj inşaatı tamamlandıktan sonra alınan zemin örnekleri üzerinde yapıldığı için, üzerlerindeki mevcut dolgu yükü de gözönünde bulundurularak çevre basınçları uygulanmış zeminlerin normal konsolide olduğu belirlenmiştir [9]. Bu deneylerden belirlenen içsel sürtünme açısı değerleri Tablo 1 de verilmiştir. Yapılan CK₀U tipi deneylerden siyah ve yeşil killer için yanıl zemin basıncı katsayısı K₀ değerinin [13] tarafından önerilen K₀=0.95-Sinφ amprik değerlendirmesine yakın olduğu saptanmıştır [3]. Kum bantlarının ve killi kumlu çakıl tabakalarının Elastisite modülünü belirlemek için (1) eşitliği kullanılmıştır [12].

$$E=(0.6-3.0)N \text{ (MPa biriminde)} \quad (1)$$

2.2. İnşaat Programı

Baraj dolgusunun yerleştirilmesi sırasında duraylılık sorunlarına yol açmamak ve meydana gelmesi beklenen büyük oturmaları en aza indirmek için, dolgu inşaatı aşamalı olarak yapılmıştır. Baraj dolgusu +6.50 m kotundan başlamış, B22 aksında (menba batardosu) +17.00 m, B18 (menba tarafı ara dolgu) aksında +23.00 m, B23 aksında (ana gövde) +34.00 m, B24 aksında (mansap tarafı ara dolgu) +21.50 m ve B9 aksında (mansap batardosu) +14.00 m kotuna kadar yükselmiştir. Baraj dolgusunun inşasına menba batardosu ile başlandığından 1968 yılında öncelikle dolgu +14m kotuna, daha sonra yan dolgusuyla beraber +17m kotuna kadar çıkarılmıştır. İnşaat öncesi yapılmış olan geoteknik araştırmaların ve arazi ölçümlerinin değerlendirilmesi sonucu belirlenen baraj yapım programı 15 yıllık bir süre ortaya koymuştur. Aşamalı olarak sürdürülen baraj inşaatı 1968 yılında başlayıp 1983 yılında tamamlanmıştır. Bu süreç içerisinde dolgu inşa programı kayıtlarının düzenli olarak arşivlenmemesi nedeniyle düzenli bir dolgu inşa programına ulaşılamamıştır. Dolgu inşası sonucunda menba batardosunun, baraj gövdesinin, ara dolguların ve mansap batardosunun belirli kotlara yükselmesi hedeflenmiştir. Ancak yapım süresinde meydana gelen oturmalar nedeniyle

başlangıçta hedeflenen dolgu hacminden daha fazla dolgu yerleştirilmesi gereği ortaya çıkmıştır. Sayısal analiz için oturma plakalarının oturma-zaman kayıtları incelenerek baraj dolgu programı çıkarılmıştır. Baraj dolgusunun 15 yıl sürmesi ve yapım sırasında da oturmalar meydana gelmesi nedeniyle, istenilen dolgu yüksekliğine ulaşabilmek için her bir yükleme adımında ölçülen oturma kadar dolgu yüksekliği sonlu eleman modeline eklenmiştir. Bu nedenle dolgudan dolayı meydana gelen gerilmeler hesaplanırken bu değerler gözönünde bulundurulmuştur. Şekil 4’de analizlerde kullanılan dolgu inşa programı gösterilmiştir.



Şekil 4. Dolgu inşa programı

3. SAYISAL ANALİZLER

PLAXIS programı geoteknik mühendisliği problemlerinin analizi için geliştirilmiş bir sonlu elemanlar programıdır. Program, analizlerde gerilme artışları ve ani oturmaların hesaplanmasında elasto-plastik davranışı, konsolidasyon oturmalarının hesaplanmasında ise gerilme artışları sonucu oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesini modelleyebilen Biot konsolidasyon teorisini esas almaktadır. Programda zemin ortamı iki fazlı (katı ve sıvı), olarak göz önüne alınmakta ve drenajlı veya drenajsız çözümler yapılabilmektedir [14].

Bu çalışmada, geoteknik problemlerin analizinde sıkça kullanılan Modifiye Cam-Clay modeli kullanılmıştır. Bu modelde göçme Mohr-Coulomb kriterine göre tanımlanmış ve Plaxis’de bu model “Soft-Soil model (SS)” olarak adlandırılmıştır. Modeli tanımlamak için toplam 7 zemin parametresine gereksinim vardır. Bunlar kohezyon c' , içsel sürtünme açısı ϕ' , genleşme açısı ψ ve modifiye sıkışma indisi λ^* , modifiye şişme indisi κ^* , M parametresi ve v_{ur} boşaltma-tekrar yükleme Poisson oranıdır. (2), (3) ve (4) eşitliklerinde bu değerler gösterilmiştir.

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{(1+e)} \quad \kappa^* = \left(\frac{\kappa}{1+e} \right) \quad (2)$$

$$M = 3 \sqrt{\frac{(1-K_0^{nc})^2}{(1+2K_0^{nc})^2} + \frac{(1-K_0^{nc})(1-2v_{ur})(\lambda^*/\kappa^*-1)}{(1+2K_0^{nc})(1-2v_{ur})\lambda^*/\kappa^* - (1-K_0^{nc})(1-2v_{ur})}} \quad (3)$$

$$\frac{v'_{ur}}{1-v'_{ur}} = \frac{\Delta\sigma'_{xx}}{\Delta\sigma'_{yy}} \quad (4)$$

(4) eşitliğindeki $\Delta\sigma'_{xx}$ ve $\Delta\sigma'_{yy}$ sırasıyla yanal ve düşey efektif gerilmelerdeki artışı göstermektedir. v'_{ur} değerinin 0.10 - 0.20 aralığında alınabileceği ve kohezyonlu zeminler için ortalama bir değer olarak 0.15, kohezyonsuz zeminler için 0.20 önerilmiştir [14]. M normal konsolide durumda yanal zemin basıncı katsayısı K_0 ye bağlı olarak değişmekte olup anlamı orjinal Cam-clay teorisindeki M 'den farklıdır. Kum, çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerin davranışını analiz etmek için Hard-Soil (HS) model kullanılmıştır. Eksenel şekil değiştirme ve deviatorik gerilme arasında m üstel değerine göre tanımlanan ilişki hiperbolik modele benzemekte olup model, plastisite teorisine göre geliştirilmiş bir bünye modelidir [15]. Modellerin ayrıntıları [14] de belirtilmiştir.

3.1. Malzeme Parametrelerinin Seçimi

Başlangıç koşullarındaki gerilme durumu için sükunetteki zemin basıncı katsayısı normal konsolide zeminler için $K_0=1-\sin\phi'$, aşırı konsolide zeminler için ise $K_0=(1-\sin\phi')(OCR)^{\sin\phi'}$, eşitliğinden belirlenmiştir [16], [17]. Kil tabakalar için, permeabilite katsayısının boşluk oranı ile olan değişiminin yaklaşık lineer bir e-log k_v dağılımı şeklinde olduğu belirlenmiş ve (5) eşitliği kullanılmıştır.

$$\log\left[\frac{k}{k_0}\right] = \frac{\Delta_e}{c_k} \quad (5)$$

Burada, Δ_e boşluk oranındaki değişim, k_0 başlangıç permeabilite ve C_k permeabilite değişim katsayısı (e-log k_v nin eğimi) dir. Kil tabakaların başlangıç permeabilite katsayıları barajın inşasına başlamadan önce yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarından belirlenmiştir. Laboratuvar c_v değerleri, arazide belirlenen c_v değerinden 25 kat küçük olarak bulunmuştur [3]. Bu nedenle düşey permeabilite katsayısı k_v arazide ölçülen boşluk suyu basıncının sönmülmesinden belirlenen ortalama konsolidasyon katsayısı c_{vort} ve laboratuvar deneylerinden belirlenen ortalama hacimsel sıkışma katsayısı m_{vort} 'ya göre

$$k_{vort} = c_{vort} m_{vort} \gamma_w \quad (6)$$

eşitliği ile belirlenmiştir. Başlangıç düşey permeabilite katsayısı $k_0 c_{vort} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ve $m_{vort} = 0.0005 \text{ kPa}^{-1}$ olarak alınarak hesaplanmıştır [3], [7]. Kil tabakalarının başlangıç permeabilite katsayıları aynı seçilmiş, gerilme artışıdaki değişimle birlikte permeabilite katsayısındaki değişim C_k katsayısı ile gözönüne alınmıştır. Yapılan parametrik çalışmalar sonucunda yanal permeabilite katsayısı k_h ile düşey permeabilite katsayısı k_v arasındaki ilişki $k_h=4k_v$ olarak belirlenmiştir. Tablo 3a da model parametreleri verilmiştir. Kum bantlarının ve killi-kumlu çakıllı tabakanın davranışı HS model ile modellenmiş ve başlangıç gerilme durumu için malzeme parametreleri SPT (N) sayılarına göre belirlenmiştir. Tablo 3b de model parametreleri verilmiştir.

Baraj temel zemininin en üstündeki aşırı konsolide katı sarı kil tabakasından çok sınırlı sayıda numune alındığından bu kil tabakasına ait parametreler bu mevcut arazi ve laboratuvar deney sonuçlarından belirlenmiştir. Baraj dolgusundan, kum bantları ve killi-kumlu çakıllı tabakalardan örselenmemiş örnek alınamadığı için bu zeminlerin mukavemet ve deformasyon özellikleri laboratuvar da belirlenememiştir. Bu nedenle dolgu lineer elastik (LE) malzeme olarak Elastisite modülü 8000 kPa ve Poisson oranı 0.40 ve dolgu birim hacim ağırlığı $\gamma_{dolgu}=20 \text{ kN/m}^3$ olarak alınmıştır.

Tablo 3a. Soft-Soil model parametreleri

Zemin	Model	γ_k kN/m ³	γ_d kN/m ³	ϕ' ($^\circ$)	k_x m/gün	k_y m/gün	λ^*	κ^*	OCR	c_k
Siyah kil	SS	11.3	17	17	0.002	0.0005	0.13	0.025	1.0	0.72
Yeşil kil	SS	14	19	18	0.002	0.0005	0.12	0.023	1.5	0.51
Sarı kil	SS	15.4	20	20	0.002	0.0005	0.05	0.010	4	0.26
Dolgu	LE	20	20	20	0.01	0.01	-	-	-	-

Tablo 3b. Hard-Soil model parametreleri

Zemin	Model	γ_k kN/m ³	γ_d kN/m ³	ϕ' ($^\circ$)	k_x m/gün	k_y m/gün	E kPa)	m
Kum-çakıl	HS	16	19	35	1.1	1.1	30000	0.5
Kum bantı	HS	16	18	32	1.1	1.1	10000	0.5
Kum şilte	HS	16	18	32	1.1	1.1	8000	0.5

3.2. Analizler

Barajın sonlu eleman analizinde Plaxis 7.2 programı kullanılmıştır. Baraj dolgu kesiti Şekil 1'de gösterildiği gibi antisimetrik. Dolgu geometrinin düzgün olmayışı, baraj uzunluğunun ve dolgu yüksekliğinin oldukça fazla olması, baraj inşasının yaklaşık 15 yıl sürmesi ve inşaat sırasında da oturmaların devam etmesi ve yaklaşık 30 m' lik temel zemininin de oldukça heterojen bir yapıya sahip olması nedeniyle barajın sonlu eleman modeli oluşturulurken güçlüklerle karşılaşmıştır. Menba batardosu aksı barajın diğer aksları ile aynı doğrultuda olmadığından ve aralarında yeterli uzaklık olduğundan, barajın diğer bölümlerinden ayrı olarak modellenmiştir. Öncelikle menba batardosu sayısal olarak analiz edilmiş, analiz sonuçlarının arazi verileri ile deformasyonlar yönünden uyumu sağlandıktan sonra analizler tüm baraj için tekrarlanmıştır. Menba batardosu ve yan dolgusu 6 aşama, baraj 7 aşama dolgu ile inşa edilmiştir. Modeller baraj temel zeminini ve dolgusunu birlikte kapsamaktadır. Aşamalı dolgu, dolgu sonlu elemanlar ağına eleman ekleyerek uygulanmıştır. Yüksek sıkışabilirliği olan temel zeminini altında 3.5-5 m kalınlığında killi-kumlu çakıl tabakasından sonra rijitliği yüksek ve geçirimsiz grovak olduğu için ağın alt sınırının rijit olduğu varsayılmıştır. Coupled analizlerde dolgu yükünün uygulanması sırasında drenajsız durum gözönüne alındığından malzeme parametreleri (deformasyon modülü, kayma modülü, Poisson oranı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı) efektif parametreler olarak alınmıştır. Analizlerin ayrıntıları [7], [8] de belirtilmiştir.

Temel zemininde hiç yükleme yapılmadan önce bir gerilme-şekil değiştirme analizi yapılarak jeolojik ortamın kendi ağırlığından dolayı mevcut gerilmeleri bulunmuş ve meydana gelen yer değiştirmeler belirlenmiştir. Aşamalı yükleme analizlerine geçmeden önce bu yer değiştirme değerleri sıfırlanmış ve diğer analiz adımına geçilmiştir. Drenajsız koşullarda yapılan bu ilk aşama dolgu yükünden meydana gelen gerilme artışları ve yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Daha sonra bu gerilme artışları esas alınarak konsolidasyon analizine geçilmiştir. Konsolidasyon analizi için kabul edilen konsolidasyon süresi, inşaat sırasında bu ilk aşama dolgu yapıldıktan sonra ikinci aşama dolgu yapılıncaya kadarki bekleme süresidir. Bu işlemler baraj dolgu inşası tamamlanıncaya kadar devam etmiştir.

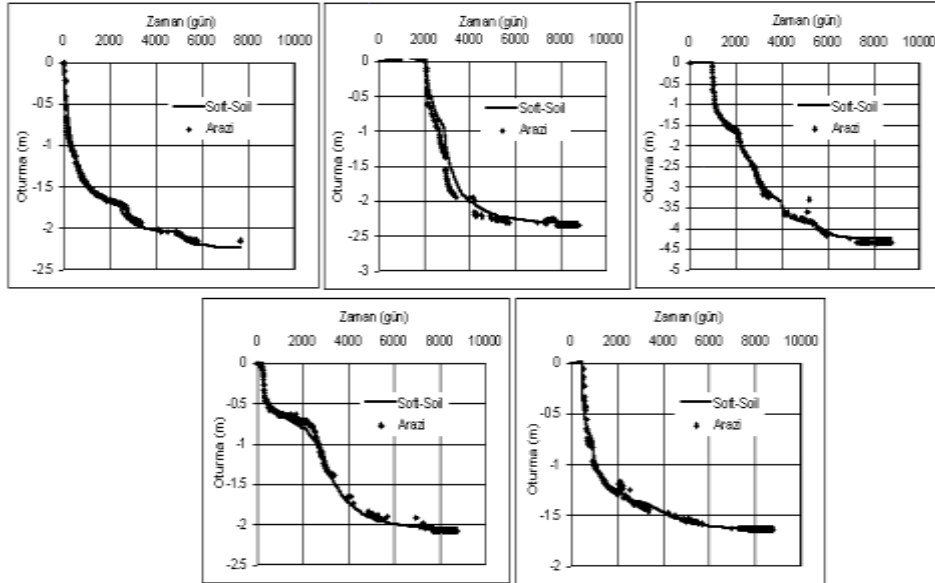
3.3. Analiz Sonuçları

Analizlerde, dolgu ile kum bantlarının mukavemet ve rijitlik parametrelerindeki değişimlerin sonuçları çok fazla etkilemediği ancak özellikle killi-kumlu çakıllı tabakanın permeabilite özelliklerinin bilinmemesinin belirsizliklerin kaynağını oluşturduğu

anlaşılmıştır. Eğer temel zemininin en altında bulunan grovak kayaları nedeniyle modelin alt sınırı drenaja kapalı varsayarak analizler yapılırsa, boşluk suyu basıncının derinlikle değişim eğrilerinin biçimi tek yönlü drenaj koşullarındaki gibi oluşmaktadır. Killi-kumlu çakıllı tabakada fazla boşluk suyu basınçları sönmülmemiş, kil tabakalarındaki fazla boşluk suyu basıncı aynı değerde bu tabakada da oluşmuştur. Bu tabakaya yerleştirilen piezometrelerin dolgu yüklemesi sırasında reaksiyon göstermediği ve bu tabakanın doğal olarak drene olduğu ve boşluk suyu basıncının dağılımının çift yönlü drenajla uyum sağladığı belirtilmiştir [3], [4] ve [5]. Bu nedenle 30 m'lik temel zemininin alt kısmı serbest drenajlı olarak alınmıştır. Bu genel gözlemler, klasik tek boyutlu konsolidasyon teorisindeki çift yönlü drenajla uyum sağlayarak boşluk suyu basıncı dağılımının aşağı ve yukarı drenaj yüzeylerine doğru olduğunu göstermiştir. Analizler Şekil 2 de gösterilen iki ön konsolidasyon profiline göre yapılmış ve siyah kilin normal konsolide olarak alındığı analiz sonuçlarının arazi ölçümleri ile daha uyumlu olduğu görülmüştür.

3.3.1. Oturmalar

Şekil 5' de B22, B18, B23, B24 ve B9 akslarında SS zemin modeli kullanılarak hesaplanan düşey yer değiştirmelerin (oturmaların) zamanla değişimi belirlenerek arazi plaka yüklemeye ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

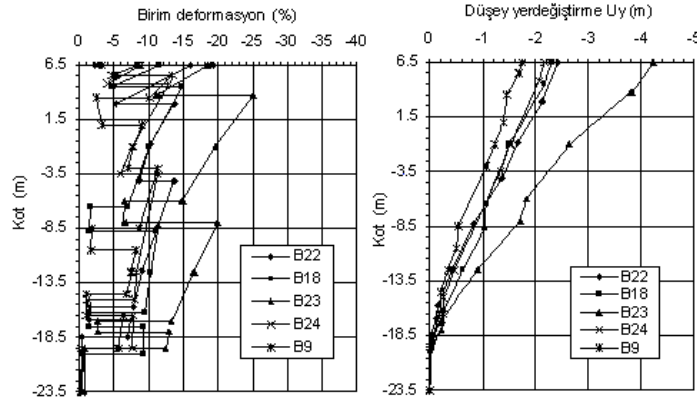


Şekil 5. B22, B18, B23, B24 ve B9 akslarında ölçülen ve hesaplanan oturmaların karşılaştırılması

Baraj sonlu elemanlar modelinin geometrisi, temel zemininin oldukça heterojen yapısı ve barajın inşası sırasındaki inşaa programı kayıtlarının tam olmaması nedeniyle genel bir karşılaştırma yapılırsa analiz sonuçlarının arazi ölçümleriyle uyumlu olduğu gözlenmektedir.

3.3.2. Düşey Yer Değiştirme ve Birim Deformasyonlar

Şekil 6'da B22, B18, B23, B24 ve B9 akslarında sayısal analizden derinlik boyunca belirlenen düşey yer değiştirme ve birim deformasyon değerleri gösterilmiştir. Akslarda zemin profilleri oldukça değişken olduğu için derinlik boyunca birim deformasyonlardaki değişimler de değişkendir. Şekil 6a'da görüldüğü gibi kum bantlarının ve killi kumlu çakıl tabakaları seviyelerinde birim deformasyon değerlerinin kil tabakalarına göre oldukça küçük değerlerde olduğu dolayısıyla bu tabakaların oturmalarının toplam oturmaya çok fazla etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca temel zemini içerisinde yer alan ve sayısal analizlerde dikkate alınan kum bantlarının varlığının, zemine rijitlik kazandırdığı ve dolgu yükü altında yumuşak zeminde oluşan düşey yer değiştirmeleri azalttığı görülmüştür.



Şekil 6. B22, B18, B23, B24 ve B9 akslarında derinlik boyunca belirlenen birim deformasyon ve düşey yer değiştirme değerleri

4. DEFORMASYONLARIN GERİLME İZİ DENEY TEKNİKLERİ İLE BELİRLENMESİ

“Gerilme izi yöntemi” stabilite ve deformasyon problemlerinin çözümünde sistematik bir yaklaşım olarak tanımlanmıştır [18]. Bir zemin örneği üzerinde laboratuvar deneyi sırasında veya temel zemininde zemin kütlesi yüklenirken her bir zemin elemanı üzerindeki gerilme durumu değişir. Gerilme izi, tanımlanan noktada değişen gerilme bileşenleri arasındaki devam eden ilişkiyi tanımlar. Laboratuvar deneylerinde gerilme izi yönteminin kullanılması arazideki gerilme değişimlerinin geçmişteki, şimdiki ve gelecekteki durumunu geleneksel deney yöntemlerine göre daha gerçekçi olarak modellemektedir. Bu çalışmada, deformasyonların deneysel olarak belirlenebilmesi için gerilme izi deney tekniği uygulanmıştır. Bu yöntemde incelenen zemin yapısı altındaki kritik bir zemin elemanı tanımlanarak, yapım sırasında uygulanan yüklemeye programına göre oluşan gerilme izleri tahmin edilir ve bu gerilme izleri laboratuvar deney örneğine uygulanarak, laboratuvar deney sonuçlarına göre, geoteknik yapıda oluşan deformasyonlar tahmin edilebilir. Uygulamanın başarısı ise arazide meydana gelen gerilme izinin laboratuvar deneyleriyle tam olarak örneklenebilmesine bağlıdır.

4.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Zemin Örnekleri

Baraj temel zeminini oluşturan yaklaşık olarak 5-10 m kalınlığındaki siyah kil ve 6-11 m kalınlığındaki yeşil kil tabakalarından alınan zemin örnekleri üzerinde deneysel çalışma yürütülmüştür. Baraj temel zemininin en üst tabakasını oluşturan yaklaşık 1-3.6 m

kalınlıktaki sarı kil'e ait zemin örneği olmadığından bu kil üzerinde deney yapılamamıştır. Araziden örselenmemiş zemin örnekleri alma olanağı olmadığı için, deneysel çalışmada yeniden yapılandırılmış zemin örnekleri kullanılmıştır. Bu amaçla çapı 25 cm ve gövde yüksekliği 10 cm olan Standart Rowe hücresi gövdesine ek bir gövde üretilerek, bu gövde yüksekliği artırılmış Rowe hücresi ile yaklaşık 13-17 cm boyunda blok zemin örnekleri elde edilmiştir. Şekil 7a da Rowe hücresi gösterilmiştir. Yeşil kil için -1.0 m, siyah kil için ise -12.50 m kotu düzleminde sırasıyla 77 kPa ve 170 kPa başlangıç düşey efektif gerilme değerlerinde hazırlanan blok zemin örnekleri, üç eksenli deneyler için örnek hazırlanabilecek parçalara ayrılarak geçirimsiz kağıtlara sarılmış ve deneyler yapılmaya kadar % 95-%100 aralığında nem sağlayabilen nem kabininde bekletilmiştir. Üç eksenli deney örnekleri traşlama aygıtı ile fiziksel örselenmeye izin verilmeden 5cm çapında 10-12cm boyunda silindirik olarak hazırlanmıştır. Tüm deneylerde benzer tekniklerle hazırlanmış deney örnekleri kullanılmıştır, blok zemin örneklerinin hazırlanması, saklanması ve gerilme tarihesi konusunda daha geniş bilgi verilmiştir [7].



(a)



(b)

Şekil 7. Rowe hücresi genel görünümü ve kullanılan üç eksenli deney hücresi ile anizotropik yük uygulama sistemi

4.2. Aşamalı Anizotropik Yüklemeli - Konsolidasyonlu Deneyler

Aşamalı yükleme nedeniyle, arazide belirli bir derinlikteki zemin elemanı üzerinde etkili olan gerilme izinin ve yükleme koşullarının laboratuvar ortamında örneklenebilmesi için aşamalı anizotropik yüklemeli - konsolidasyonlu deney yöntemi uygulanmıştır. Böylece, laboratuvar ortamında bir zemin elemanı belirli bir gerilme izinde yüklenerek konsolide edilmiş ve hem drenajsız yükleme hemde konsolidasyon aşamasında oluşan düşey yer değiştirmeler belirlenmiştir. Deneylerin uygulanması sırasında [19] da anizotropik konsolidasyon için belirtilen kurallara uyulmuştur. Şekil 7b de deneylerde kullanılan üç eksenli deney hücresi ve anizotropik yük uygulama sistemi gösterilmiştir. Deneylerde doymuluk kontrolü yapılmış ve doymuluğun %92-%97 arasında değiştiği belirlenmiştir. Çalışmada uygulanan yöntem ve gözönünde bulundurulan özellikler aşağıda belirtilmiştir.

- Zemin örneği üç eksenli hücreye yerleştirildikten sonra K_0 koşullarındaki efektif yanal ve düşey jeolojik gerilmeler uygulanmış ve örnek anizotropik olarak konsolide edilmiştir.
- Daha sonra sayısal analizden belirlenen Tablo 4a ve Tablo 4b de gösterilen efektif düşey σ_v' ve yanal gerilmeler σ_h' değerleri adım adım zemin örneğine uygulanmıştır.

- Sayısal analizin konsolidasyon aşamasının sonucuna göre herbir yükleme aşamasının sonunda, yüklemeyen dolayı meydana gelen fazla boşluk suyu basıncının tamamen sönümlenmediği bilinmektedir. Böylece sayısal analizden belirlenen efektif gerilmeler deney örneğine etkilmiştir.
- Deneilerde yükleme yapılırken izotropik gerilmeyle birlikte aynı anda düşey gerilme de uygulanmıştır. Bu durumda, önce uygulanan yük altında drenaj vanası kapalıyken oluşan boşluk suyu basıncı ve eksenel deformasyon ölçülmüştür. Boşluk suyu basıncı ve eksenel deformasyonda artış meydana gelmiyorsa konsolidasyon aşamasına geçilmiştir.
- Konsolidasyon aşamasında da boşluk suyu basıncında ve eksenel deformasyonda meydana gelen değişimler ölçülmüştür. Üst başlıktan su çıkışına izin verilmiş ve çıkan su miktarı her bir yükleme aşamasında ölçülmüştür.
- Herbir deney yaklaşık olarak 25 ile 45 gün içinde tamamlanmıştır. Drenajsız yükleme aşaması 3-5 gün, konsolidasyon aşaması ise 2-4 gün aralığında gerçekleşmiştir.

Tablo 4a. Yeşil kilde –1.00 m kotunda belirlenen efektif gerilmeler

Yükleme aşaması	B22 aksı		B18 aksı		B23 aksı		B24 aksı		B9 aksı	
	σ_v' kPa	σ_h' kPa	σ_v' kPa	σ_h' kPa	σ_v' kPa	σ_h' kPa	σ_v' kPa	σ_h' kPa	σ_v' kPa	σ_h' kPa
K_0	77	60	77	60	77	60	77	60	77	60
Yük 1	91.5	50	91	74	92.5	76.44	146	83	90	72.5
Yük 2	107	55	91.5	74	92	76	161	97	174	108
Yük 3	139	82	90	77	254	158	166	115	214	117
Yük 4	222	147	200	137	354	218	187	136	225	143
Yük 5	265	171	351	236	499	322	313	200	238	153
Yük 6	288	183	409	278	620	384	364	254	243	165
Yük 7	-	-	434	296	676	412	382	267	261	173

Tablo 4b. Siyahı kilde –12.50 m kotunda belirlenen efektif gerilmeler

Yükleme aşaması	B22 aksı		B18 aksı		B23 aksı		B24 aksı		B9 aksı	
	σ_v' kPa	σ_h' kPa	σ_v' kPa	σ_h' kPa	σ_v' kPa	σ_h' kPa	σ_v' kPa	σ_h' kPa	σ_v' kPa	σ_h' kPa
K_0	170	120	170	120	170	120	170	120	170	120
Yük 1	182	124	184	133	181	133.5	200	129	172	127
Yük 2	215	144	183.5	133	181	133	222	152	226	154
Yük 3	258	175	180	136	322	220	242	172	280	189
Yük 4	314	216	279	197	412	278	277	195	286	202
Yük 5	348	235	437	307	565	389.5	383	265	296	215
Yük 6	369	249	498	350.5	681	470	452	313	326	234
Yük 7	-	-	525	369	740	511	471	330	342	244

4.3. Deney Sonuçları

Aşamalı anizotropik yüklemeli-konsolidasyonlu üç eksenli deneylerden düşey yer değiştirme (U_y) değerlerinden belirlenen birim deformasyon (ε) değerleri ölçülen, sayısal analizden belirlenen birim deformasyon değerleri ise hesaplanan olarak Tablo 5a ve Tablo 5b'de sunulmuştur.

Tablo 5a. –1.00 m kotunda ölçülen ve hesaplanan birim deformasyonlar

Aks No	Uy (mm)	Örnek boyu (mm)	Ölçülen ε (%)	Hesaplanan ε (%)
B22	9.690	107.16	9.042	10.22
B18	9.11	107.81	8.45	10.00
B23	19.40	105.68	18.36	19.59
B24	8.020	109.74	7.308	7.61
B9	7.25	105.74	6.86	7.77

Tablo 5b. –12.50 m kotunda ölçülen ve hesaplanan birim deformasyonlar

Aks No	Uy (mm)	Örnek boyu (mm)	Ölçülen ε (%)	Hesaplanan ε (%)
B22	9.35	108.63	8.607	9.09
B18	10.24	106.20	9.642	10.24
B23	15.50	103.29	15.006	16.32
B24	8.45	113.35	7.455	8.25
B9	7.68	107.44	7.148	7.47

Deneylelerden ölçülen birim deformasyon değerleri ile sayısal analizlerden hesaplanan birim deformasyon değerleri birbirine oranlanarak karşılaştırıldığında ve birinci değer yeşil kile, ikinci değer siyah kile ait olarak sunulduğunda, B22 aksında %87.8-%95, B18 aksında %84.5-%93.5, B23 aksında %93.7-%92.4, B24 aksında %94.7-%89.7, B9 aksında %87-%93.3 oranlarında yaklaşım sağlanmıştır. Deneylelerden ölçülen birim deformasyon ε (%), değerleri ile kil zeminin tabaka kalınlığı L(m), çarpılarak oturma tahmini ρ (m) yapılmıştır. Bu hesaplamada birim deformasyonların belirlendiği derinliklerdeki kil tabaka kalınlıkları kullanılmıştır. Sonuçlar Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Yeşil ve siyah kilde deneylelerden ve analizden belirlenen oturmalar

Aks No	Yeşil kil L (m)	ρ (m)		Siyah Kil L (m)	ρ (m)	
		Deney	Analiz		Deney	Analiz
B22	6.44	0.58	0.66	6.4	0.55	0.58
B18	11.0	0.93	1.10	7.5	0.72	0.77
B23	9.75	1.79	1.91	9.0	1.35	1.46
B24	5.0	0.36	0.38	4.75	0.35	0.39
B9	4.0	0.27	0.31	4.0	0.28	0.30

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmanın birinci aşamasında Alibey Barajı ve temel zeminini modellenerek gerilme-şekil değiştirme-konsolidasyon davranışı "coupled analizle" incelenmiştir. Modellemede kullanılan malzeme parametreleri barajın yapımına başlanılmadan önce 1967 yılında ve baraj inşası tamamlandıktan sonra 1996 yılında yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarından belirlenmiştir. Barajın inşası sırasında yerleştirilen ölçüm aletleriyle alınan kayıtların düzenli saklanamaması sonucu bu kayıtlardan yeterince yararlanılamamıştır. Arazideki yükleme ve drenaj koşulları sayısal modelde birbir modellenerek aşamalı dolgu yüklemesinin gözönüne alındığı analizlerde, elde edilen ani ve konsolidasyon oturmalarının arazi ölçümleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

İkinci aşamada, temel zemininde meydana gelen deformasyonlar gerilme izi deney tekniği kullanılarak, deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla sayısal analizden herbir yükleme aşamasında B22, B18, B23, B24 ve B9 akslarında –1.00 m ve –12.50 m kotlarındaki düşey ve yatay efektif gerilmeler belirlenerek (Tablo 4a ve Tablo 4b) deneysel çalışmada kullanılmıştır. Her aksta iki adet olmak üzere toplam 10 adet deney

yapılmıştır. Akslarda ölçülen ve hesaplanan düşey birim deformasyon değerlerinin (Tablo 5a ve Tablo 5b) birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Belirlenen bu birim deformasyonlarla zemin tabaka kalınlığı çarpılarak toplam oturmalar tahmin edilmiştir. Ölçümlerden belirlenen düşey birim deformasyon değerleri ile hesaplardan belirlenenler arasında %0.302-%1.55 kadar bir farklılık olduğu belirlenmiştir. Ölçülen birim deformasyonlar ile akslarda yeşil ve siyah kil tabakalarının toplam kalınlıkları gözönüne alınarak oturmalar hesaplandığında B22, B18, B23, B24 ve B9 akslarında sırasıyla 1.768(m), 1.8937(m), 3.36(m), 1.678(m) ve 1.30(m) olarak bulunmuştur. Bu değerler arazide ölçülen toplam oturmalar oranlarıysa sırasıyla, %82.35, %80.80, %77.60, %80.29 ve %79.87 oranlarında uyum sağlanmıştır. Bu çalışmada örselenmemiş zemin örneği kullanma şansı olmamasına karşın yeniden yapılandırılan örnekler üzerinde %95'e varan bir oranda sayısal analize, yaklaşık %80 oranında gerçekte ölçülen deformasyonlara ulaşılmış olması yöntemin pratik problemlere uygulanabilirliği konusunda umut verici olarak değerlendirilmektedir.

Deneyisel çalışmada yalnızca düşey boy kısalması ölçülerek düşey birim deformasyonlar belirlenmiş, yanal yer değiştirmeler ölçülebilmiştir. Yanal yer değiştirmelerin ölçülebildiği bir deney sistemiyle yanal deformasyonların yaklaşık tahmini olanaklı olacaktır. Deneylerin çok uzun sürmesi nedeniyle bu çalışmada her aksda yeşil ve siyah kil tabakalarının her birinde yalnızca birer adet zemin örneğinde deney uygulanmıştır. Bu bakımdan akslarda farklı derinliklerdeki zemin örnekleri üzerinde deney çalışmaları tekrarlanarak elde edilen birim deformasyonlar da karşılaştırılmalıdır. 500 m uzunluğundaki bir baraj dolgusu altında kalınlığı 6-11m arasında değişen yeşil kil tabakasında ve kalınlığı 10-15m değişen siyah kil tabakasında birer adet deney yapılarak bir genelleme yapılması oldukça zordur. Ancak farklı uygulamalarda da deneyerek yöntemin uygulanabilirliği araştırılabilir.

Uygulamalarda özen gösterilmesi gereken hususların başında laboratuvarda deformasyonların belirlenmesi için yapılacak çalışmalarda, deformasyon tahmini yapılacak zemin tabakasının gerilme tarihçesi çok iyi bilinmesidir. Yapım sırasında uygulanan yükleme programına göre oluşan gerilme izlerinin tahmini ve bu gerilme izinin laboratuvar deney örneğine uygulanması yöntemin uygulanabilirliğini sağlayan koşulların başında geldiği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Folkes, D.J. ve Crooks, J.H.A., (1985), "Effective Stress Paths and Yielding in Soft Clays Below Embankment", Canadian Geotechnical Journal, 22, 357-374.
- [2] Çinicioğlu, S.F. and Toğrol, E. (1991) "Embankment design on soft clays" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117(11)1691-1705.
- [3] Soydemir, Ç., "Alibey Toprak Barajı Menba Batardosu Oturma ve Stabilité Etüdü", İnş. Müh. Odası Türkiye İnşaat Mühendisliği V. Teknik Kongresi, 1970, Ankara.
- [4] Mercangöz, B.B., "Yumuşak Kohezyonlu Zeminlerin Kademeli Yükleme Altında Davranışının Sayısal Analizi", Yüksek Lisans Tezi, YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.

- [5] Özçoban, M. Ş., "Yumuşak Zeminlere Oturan Dolgu Barajların Analizi", Doktora Tezi, YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
- [6] Özaydın, K., Yıldırım, S., Uzel, T., Özçoban, M. Ş., Berilgen, M. M., Hoşbaş, G. ve Kılıç, H., "Yumuşak Zeminlere Oturan Dolguların Davranışı", DPT Araştırma Projesi, İstanbul, 1998.
- [7] Kılıç, H., "Yumuşak Zeminler Üzerine Oturan Dolgu Barajlarda Deformasyonların Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi", Doktora Tezi, YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.
- [8] Kılıç, H. ve Yıldırım, S., "Dogu Altı Zeminlerde Deformasyonların Sayısal Olarak Belirlenmesi" Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, İstanbul, Ekim, 2000b.
- [9] Koç, S.A., "Normal Konsolide Killerde Geoteknik Parametrelerin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996.
- [10] Kılıç, H. ve Yıldırım, S. "Alibey Barajı Temel Zemini Parametrelerinin Belirlenmesi" Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, İstanbul, Ekim, 2000a.
- [11] Kılıç H., Tohumcu P., Tonoroğlu M., Özaydın K., "Determining the Compressibility and Permeability Characteristics of Foundation Layers of Alibey Dam" Advances in Civil Engineering 5th International Congress, İstanbul, Turkey, Volume 2, , 973-982. September 2002.
- [12] Burland, J. B., Broms, B. B. ve De Mello, V. F. B., "Behaviour of Foundations and Structures", Proc. 9th International Conference SMFE, Tokyo, Vol.2., 1977.
- [13] Brooker, E.W and Ireland, H.O, "Earth Pressure at Rest Related to Stress History", Canadian Geotechnical Journal, Vol.2, No.1, Feb.,1965, pp1-15.
- [14] Plaxis 7, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, User Manual, 1998.
- [15] Duncan, J. M. ve Chang, C. Y., "Non-Linear Analysis of Stress and Strain in Soils", Journal of Soil Mech. Foundation Div. ASCE, 96, (SM5), 1970, pp 1629-1653.
- [16] Jacky, J., "The Coefficient of Earth Pressure at Rest", J. of Society of Hungarian Architects and Engineers, 1944, pp355-358.
- [17] Simith, I. M. ve Griffith, D. V., Programming the Finite Element Method, Second Edition, John Willey and Sons, Chisester, U.K., 1982.
- [18] Lambe, T.W. ,"Stress Path Method", Proc. ASCE, Journal of the Soil mechanics and Foundations Division, 93 (SM6), 1967, pp 309-331.
- [19] Head, K. H., Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 3, Effective Stress Tests, Second Edition, John Wiley&Sons,NewYork, 1998.