

## Köprübaşı Barajının Oturma Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Hesaplanması

Nail ÜNSAL<sup>a</sup>, Erhan TEKİN<sup>a</sup>, Gözde ARSLAN<sup>\*b</sup>

<sup>a</sup> Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ANKARA, TÜRKİYE

<sup>b,\*</sup> Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, ANKARA, TÜRKİYE

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 20.03.2019  
Kabul: 22.04.2019

#### **Anahtar Kelimeler:**

Kil Çekirdek Kaya  
Dolgu Baraj, Düşey  
Deformasyon, Duncan  
– Chang Hiperbolik  
Malzeme Modeli,  
Sonlu Elemanlar  
Metodu

#### **\*Sorumlu Yazar:**

e-posta:  
[gozdeacikgoz17@gmail.com](mailto:gozdeacikgoz17@gmail.com)  
il.com

### ÖZET

Dolgu barajların gövdesinde meydana gelmesi beklenen oturmalar; temel ve dolgu malzemesi özellikleri, dolgu geometrisi, dolgunun inşaa aşamaları, rezervuar yükleme koşulları gibi faktörler tarafından kontrol edilmektedir. Sonlu elemanlar metoduyla yapılan analizlerde bu faktörlerin doğru temsil edilmesi malzemenin gerçekteki davranışına dair güvenilir tahminler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, kil çekirdek kaya dolgu tipinde inşa edilen Köprübaşı Barajı'nın inşaat sonu ve su tutma durumundaki oturma davranışı sonlu elemanlar metoduyla yapılan analizlerle incelenmiştir. Gövde dolgu malzemesinin doğrusal olmayan gerilme bağımlı ve elastik olmayan davranışını temsil etmek amacıyla Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli kullanılarak analizler yapılmıştır. Kil çekirdek malzeme için mekanik özellikler üç eksenli basınç deney sonuçlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Filtre ve kaya dolgu malzeme parametreleri literatür araştırmalarından alınmıştır. İnşaa ve rezervuar yükleme koşullarını temsil etmek amacıyla gövde dolgusu ve rezervuar seviyesi kademeli olarak modellenmiştir. İnşaat sonu ve su tutma durumları için hesaplanan deformasyon sonuçları ile baraj gövdesine yerleştirilmiş olan çapraz kolları çökme ölçerlerden elde edilen deformasyon sonuçları karşılaştırılmış ve deformasyonların uyumlu olduğu görülmüştür.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.01.10>

## Analysing the Settlement Behaviour of Köprübaşı Dam by Finite Element Method

### ARTICLE INFO

Received: 20.03.2019  
Accepted: 22.04.2019

#### **Keywords:**

Clay Core Rockfill  
Dam, Vertical  
Deformations,  
Duncan-Chang  
Hyperbolic Material  
Model, Finite  
Elements Method

#### **\*Corresponding**

#### **Authors**

e-mail:  
[gozdeacikgoz17@gmail.com](mailto:gozdeacikgoz17@gmail.com)  
il.com

### ABSTRACT

Settlements which expected to occur in the body of the embankment dams are controlled by factors such as the foundation and embankment properties, embankment geometry, construction stages of the embankment, and reservoir loading conditions. Accurate representation of these factors in finite element analysis allows reliable estimates of the actual behaviour of the material. In this study, the construction behaviour of the Köprübaşı Dam, which is constructed as a clay core rockfill type, was examined with finite element method. In order to represent the nonlinear, stress-dependent and in-elastic behaviour of the material, analyses were performed by using Duncan – Chang hyperbolic material model. Material parameters for clay core material were calculated by using triaxial compression test results. For the parameters of filter and rock fill materials, the literature has been used. In order to represent construction and reservoir loading conditions, the body embankment and the reservoir level were modelled with stages. The results of deformation calculated for end of construction and water retention were compared with the deformation results obtained from measuring instruments placed in the dam body and the deformations were found to be compatible.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.01.10>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ilk olarak 1940'lı yıllarda sayısal metotların geliştirilmesi ile birlikte Richard Courant tarafından sürekli bir sistemi üçgen elemanlara ayıran bir analiz yöntemi olarak tanıtılmıştır [1]. Karmaşık mühendislik problemlerini basite indirgeyerek kontrol edilebilir parçalarla çözümü sağlayan sonlu elemanlar metodunun dolgu barajlar için yapılan gerilme ve deformasyon analizlerinde etkili çözüm sağladığı birçok kez kanıtlanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi geoteknik mühendisliğinde ilk kez Clough ve ark. (1967) 30.5 m yüksekliğinde toprak dolgu bir barajın kademeli inşaa koşullarındaki gerilme ve deformasyon değerlerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Clough ve ark. (1967) tek aşamalı analizler ile kademeli inşaa koşullarına bağlı yapılan analizlerden elde edilen deformasyon sonuçlarını karşılaştırmış; yatay deformasyonlarda çok küçük ancak düşey deformasyonlarda ise ciddi farklar olduğunu tespit etmişlerdir. Gerçek inşaa koşullarını temsil eden kademeli analizlerde en fazla oturmanın baraj gövdesinin ortasında gerçekleştiği, krette ise çok küçük oturmaların oluştuğu sonucuna varmıştır [2].

Lefebre ve ark. (1973) baraj gövdesindeki gerilme ve deformasyonları iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizleriyle inceleyerek sonuçları karşılaştırmışlardır. İki boyutlu sonlu elemanlar analizlerinin 3/1 veya daha az vadi eğimli barajlarda üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerine yakın kabul edilebilir doğruluk derecesinde sonuçlar verdiği görülmüştür [3].

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde en önemli husus baraj dolgu malzemesi ile baraj temel zemininin yük altında gerçek davranışını temsil edilmesini sağlayan malzeme modelinin seçimidir. Özellikle kaya dolgu barajlarda malzeme özellikleri temsil edilirken lineer olmayan malzeme modellerinin kullanılması gerekmektedir. Duncan ve Chang hiperbolik malzeme modelini malzemenin doğrusal olmayan, gerilme bağımlı ve elastik olmayan davranışının temsil edilmesi amacıyla sonlu elemanlar analizlerinde kullanmak üzere geliştirilmiştir [4]. Kulwaty ve ark. (1972) Duncan - Chang hiperbolik malzeme modelini kullanarak 235 m yüksekliğinde geçirimsiz çekirdekli kaya dolgu baraj olarak inşaa edilen Oroville Barajı'nın iki

boyutlu sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçlarında yatay ve düşey deformasyonların tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Dong W. ve ark. (2013) Nuozhadu Barajı'nın, Derakhshandi M. ve ark. (2014) Vanyar Barajı'nın deformasyon analizlerini iki boyutlu sonlu elemanlar analizlerini Duncan – Chang hiperbolik malzeme modelini kullanarak gerçekleştirmiştir. Her iki araştırmada da maksimum deformasyonların gövde ortasında oluştuğu ve ölçüm sonuçlarıyla uyum içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir [5], [6].

Nailure ve ark. (1997) Portekiz'in güneyinde bulunan Beliche Barajı'nın gerilme ve deformasyon analizlerini sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirmiştir. Hesaplanan gerilme ve deformasyon değerlerinin baraj gövdesindeki ölçüm aletlerinden okunan değerlerle uyumlu olduğunu görmüştür. Ayrıca Beliche Barajı gövdesinde çekirdek ile kabuk malzemenin arasında bulunan dayanım farklılığına bağlı olarak kemerlenme etkisiyle farklı oturmaların olduğunu belirtmiştir [7]. Kemerlenme, dolgu barajlarda zemin elemanlarının kendinden daha rijit bölgeye gerilme aktarması olarak tanımlanır. Nayebzade ve Mohommadi (2011) Ghovashan Barajı üzerinde kemerlenme olayını araştırmıştır. Kemerlenmeden kaynaklı baraj kretinde deformasyon bulunmadığı maksimum deformasyonların gövde ortalarında gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Bu durumun çekirdek malzemesinin kabuk malzemesi tarafından sınırlandırılması sebebiyle serbestçe deformasyon gösteremediğinden kaynaklandığını belirtmiştir [8].

Bu çalışmada, temelden yüksekliği 120 m olan kil çekirdek kaya dolgu tipindeki Köprübaşı Barajı'nın sonlu elemanlar metoduyla analizleri Phase2 v8.005 yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve gövdede meydana gelmesi beklenen düşey deformasyonlar incelenmiştir. Gövde dolgusu inşaa koşullarını temsil etmek için her biri 6 m yüksekliğinde olan 20 kademe olarak modellenmiştir. Su tutma durumu için ise rezervuar seviyesindeki zamana bağlı yükselişi temsil etmek amacıyla gövdeye su yükü kademeli olarak verilmiştir. Baraj gövdesi içerisinde periyodik ölçümleri gerçekleştiren çapraz kollu oturma ölçerden okunan değerler inşaat ve su tutma durumları için hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır.

## 2. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

### 2.1. Duncan – Chang Hiperbolik Malzeme Modeli (Duncan – Chang Hyperbolic Material Model)

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan dolgu baraj analizlerinde malzemenin lineer olmayan, gerilme bağımlı ve elastik olmayan davranışının temsil edilmesi gerekmektedir. Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli zeminin doğrusal olmayan davranışını gösteren hiperbolik gerilme şekil değiştirme ilişkisi sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

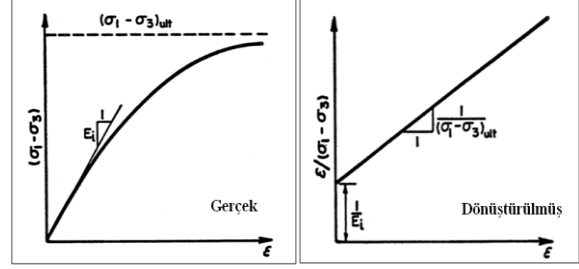
Hiperbolik modelden ilk kez Kondner (1963) bahsetmiş, model daha sonra Duncan ve Chang (1970) tarafından geliştirilmiştir. Model üç eksenli basınç deneyinde gözlenen eksenel deviyör gerilmenin birim deformasyon ile ilişkisinin hiperbole yakın bir şekilde olduğu esasına dayanmaktadır. Hiperbolik model, zeminlerdeki gerilme – şekil değiştirme davranışının lineer olmayan, gerilme bağımlı, elastik olmayan üç önemli karakteristiğini temsil etmektedir.

Kondner ve ark. (1963) birçok zeminde lineer olmayan gerilme - şekil değiştirme eğrisinin Şekil 1’de gösterilen hiperbolle temsil edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Hiperbole ait denklem Eş.(1)’de gösterilmiştir.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \quad (1)$$

Burada  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ : Deviyör gerilme,  $E_i$ : Elastisite modülü ve  $\varepsilon$ : Birim deformasyondur. Hiperbolu temsil eden değerlerin fiziksel değerler olması ve  $E_i$  ve  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  değerlerinin kolayca belirlenebilir olması modeli kullanışlı hale getirmiştir. Eğer hiperbol Eş.(2)’deki gibi ifade edilirse  $\varepsilon/(\sigma_1 - \sigma_3)$  ve  $\varepsilon$  arasındaki ilişki lineer olarak temsil edilmiş olur:

$$\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (2)$$

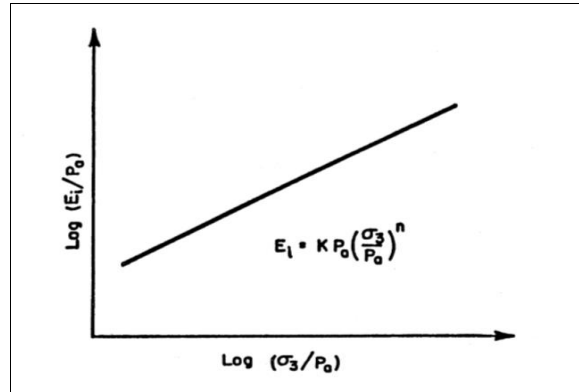


Şekil 1. Gerilme şekil değiştirme eğrisinin hiperbolle temsil edilmesi (Stress – strain curves represented by hyperbolas) [4]

Hiperbolik modelde gerilme bağımlı gerilme-şekil değiştirme ilişkisi çevre basıncıyla birlikte değişen  $E_i$  ve  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  tarafından temsil edilmektedir. Doymun zeminler hariç tüm zeminlerde konsolidasyonsuz drenajsız koşullar altında yapılan tüm testlerde çevre basıncındaki artış gerilme-deformasyon eğrisinin dikleşmesi ve dayanımda artış ile sonuçlanacaktır.  $E_i$  ve  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  değerleri çevre basıncındaki artışla birlikte artmaktadır.

Başlangıç elastisite modülü  $E_i$  ile çevre basıncı  $\sigma_3$  arasındaki bağıntıyı Jambu (1963) Eş.(3) ile açıklamıştır. Burada  $K$ : Modül sayısı,  $n$ : Modül üssü,  $\sigma_3$ : Çevre basıncı ve  $P_a$ : Atmosfer basıncıdır. Şekil 2 ile tanjant modülünün çevre basıncıyla değişimi görülmektedir.

$$E_i = KP_a \frac{\sigma_3^n}{P_a^n} \quad (3)$$

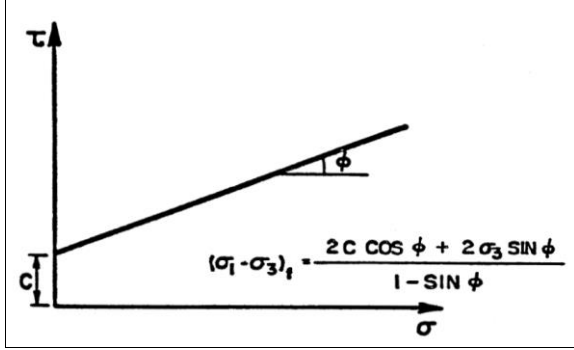


Şekil 2. Çevre basıncı ile birlikte başlangıç tanjant modülünün değişimi (Variation of initial tangent modulus with confining pressure) [4]

$\sigma_3$  ile  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  değerindeki değişim Şekil 3'te açıklanmaktadır. Burada deviyör gerilmenin nihai değeri  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  ile göçme anındaki değeri  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  arasındaki ilişki Eş. (4) ile temsil edilmektedir.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (4)$$

Bu eşitlikte  $R_f$  göçme oranıdır.  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  daima  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  değerinden küçüktür.  $R_f$ , 0.5 ile 0.9 arasında değişmektedir [4].

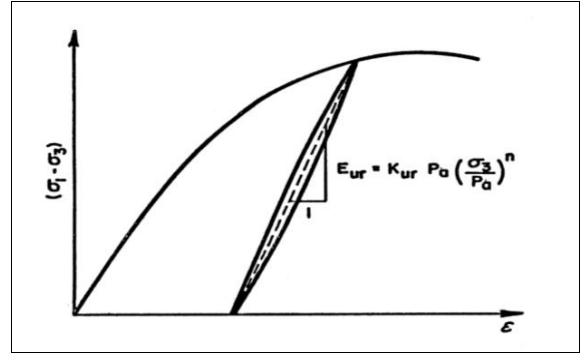


Şekil 3. Çevre Basıncı - Dayanım ilişkisi (Variation of strength with confining pressure) [4]

Gerilme - şekil değiştirme eğrisinin anlık eğimi tanjant modülüdür ( $E_t$ ).  $E_t$  yukarıda verilen eşitliklerin düzenlenmesiyle Eş. (5) ile ifade edilir. Eğer  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  ve  $\sigma_3$  gerilme koşulları için  $K$ ,  $n$ ,  $c$ ,  $\phi$  ve  $R_f$  değerleri biliniyorsa tanjant modülü değeri hesaplanabilir.

$$E_t = \left(1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}\right)^2 K \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \quad (5)$$

Elastik olmayan davranış yüklemeye - boşaltma durumları için farklı modül değerleri tarafından temsil edilmektedir. Eğer üç eksenli gerilme altındaki numune yük boşaltma durumuna maruz bırakılırsa gerilme - şekil değiştirme eğrisi boşaltma esnasında ilk yüklemeye göre daha diktir. Bu durum Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Boşaltma ve yeniden yüklemeye eğrisi (Unloading - reloading modulus) [4]

Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde  $E_{ur}$  boşaltma ve geri yüklemeye durumlarında aynıdır. Bu değer çevre basıncıyla ilişkisi Eş. (6) ile verilmiştir.

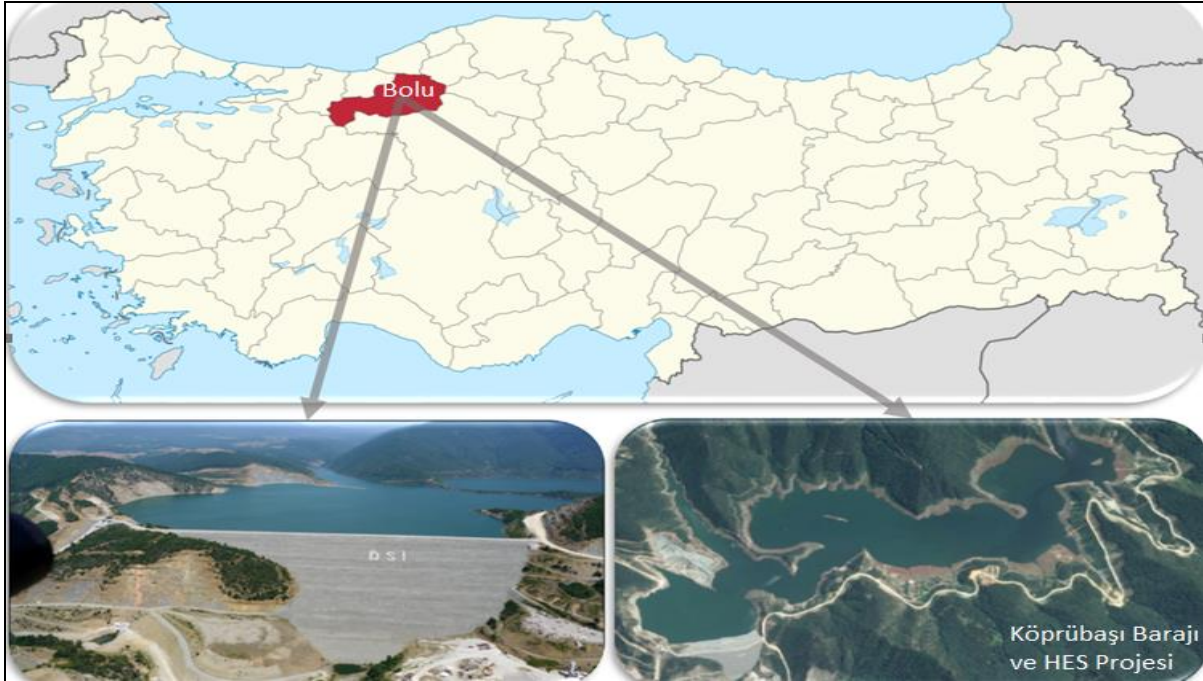
$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \quad (6)$$

Boşaltma ve geri yüklemeye modülü  $K_{ur}$ 'un ilk yüklemeye modülü olan  $K$  değeriyle olan ilişkisi sert zeminlerde  $K_{ur} \approx 1.2 K$ , yumuşak zeminlerde  $K_{ur} \approx 3 K$  aralığında değişmektedir [4].

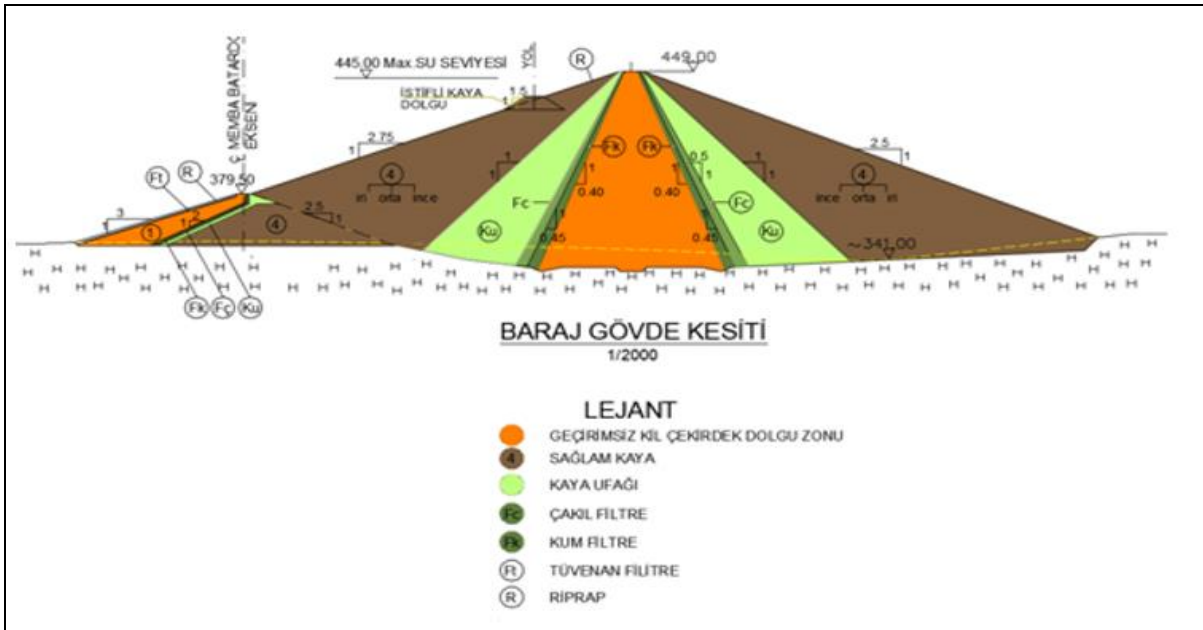
Hesaplanan bu değerler zemin özellikleri olmayıp sadece zemin davranışını temsil eden ampirik katsayılarıdır. Bu değerler zemin yoğunluğuna, su içeriğine, testlerde kullanılan basınca ve drenaj koşullarına bağlıdır [4].

### 3. ÇALIŞMA ALANI (STUDIED AREA)

Köprübaşı Barajı ve HES Bolu il sınırlarında Filyos Çayı'nın önemli bir kolu olan, Bolu Çayı üzerinde, Mengen ilçe merkezine 29 km, Devrek ilçe merkezine, 25 km ve Bolu il merkezine 70 km uzaklıkta yer almaktadır. Köprübaşı Barajı konumu Şekil 5'te gösterilmektedir. Enerji ve taşkın koruma maksadıyla 2002 yılında inşaatına başlanmış olan Köprübaşı Barajı 80.88 MW kurulu güç ve 203.12 GWh/yıl üretime sahiptir. Aynı zamanda Köprübaşı Barajı ile bölgede sık sık görülen taşkınlarında önüne geçilmiştir. Baraj kil çekirdek kaya dolgu tipindedir. Gövde hacmi 7.330.000 m<sup>3</sup>, akarsu yatağından yüksekliği 108 m, temelden yüksekliği 120 m, kret uzunluğu 841.194 m, kret genişliği 12 m'dir. Barajın mansap şevi 2.5 Yatay / 1 Düşey eğimle, memba şevi 2.75 Yatay / 1 Düşey eğimle inşa edilmiştir. Baraj 02.07.2011'de su tutmaya başlamıştır [9]. Köprübaşı Barajı gövdesi tip en kesiti Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Köprübaşı Barajı'nın Türkiye haritası üzerindeki konumu (Location on the Turkey map of Köprübaşı Dam)



Şekil 6. Baraj gövdesi tip enkesiti (Dam body typical cross section)

### 3.1. Ölçüm Aletleri (Measurement Instruments)

Baraj gövdesindeki x, y, z yönlerindeki deformasyonları ölçmek amacıyla baraj gövdesine, memba ve mansap şevlerine ölçüm cihazları yerleştirilmiştir. Baraj gövdesi üzerine memba krete yakın bir sıra halinde ve mansap yüzeyinde krete paralel çeşitli kotlarda harici çökme ölçüm röperleri ve Şekil 7'de enkesiti gösterilen kretin

0+650 km'de kil çekirdek içerisindeki deplasmanları ölçmek amacıyla 39 adet çapraz kollu çökme ölçer yerleştirilmiştir. Köprübaşı Barajı gövdesine yerleştirilen ölçüm aletlerinin 10.09.2009 tarihinde sıfır okuması yapılarak ölçümler alınmaya başlanmıştır. Bu tarihten itibaren okumalar belirli periyotlarda yapılmaya devam etmektedir [9].



Şekil 7. Baraj gövdesinde bulunan çapraz kollu çökme ölçerler (0+650 km) (Magnetic ekstensometer in dam body)

#### 4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (FINITE ELEMENTS ANALYSIS)

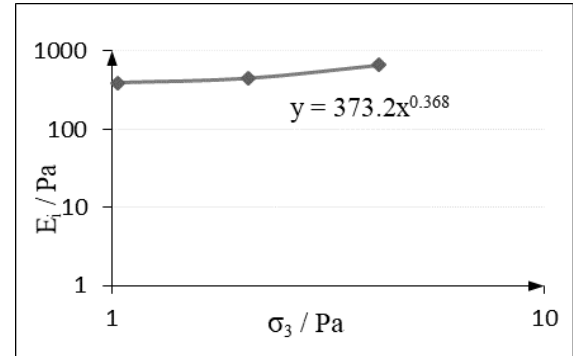
##### 4.1. Analizlerde Kullanılan Malzeme Parametrelerinin Hesaplanması ve Seçimi (Calculation and Selection of Material Parameters Used in Analysis)

Sonlu elemanlar analizlerinde malzeme özellikleri Phase2 8.005 yazılımında mevcut olan Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli kullanılarak temsil edilmiştir. DSİ Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Köprübaşı Barajı ve HES Projesi Doğal Yapı Gereçleri Raporu'nda geçirimsiz malzemeler için alınan numunelerin üç eksenli basınç deney sonuçları ile parametre değerleri hesaplanmıştır. Kaya ufağı ve filtre malzemeleri için laboratuvar deney sonuçları mevcut olmadığından analizlerde Duncan ve Wong (1984) tarafından benzer zemin özellikleri için belirlenen parametre değerleri kullanılmıştır. Kaya dolgu için ise daha önce yapılan araştırmalarda kullanılan malzeme parametrelerinden yararlanılmıştır.

##### 4.1.1. Kil çekirdek dolgu malzemesi için Duncan–Chang hiperbolik malzeme modeli parametrelerinin hesaplanması (Calculation of Duncan–Chang hyperbolic material model parameters for clay core filling material)

Kil çekirdek malzemeye ait dönüştürülmüş gerilme-şekil değiştirme değerleri yukarıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanarak Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1'deki değerlerden hesaplanan  $E_t/P_a$  ve  $\sigma_3/P_a$  değerlerine ait logaritmik grafik Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Köprübaşı Barajı için K ve n değerlerinin belirlenmesi (Determination of K and n values for Köprübaşı Dam)

Çizelge 1. Köprübaşı Barajı geçirimsiz malzemesinin dönüştürülmüş gerilme şekil değiştirme değerlerinin hesaplanması (Calculation of transformed stress – strain data of Köprübaşı Dam impermeable material)

	$\sigma_3$ (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_t$ (kPa)	70 % Gerilme Değeri			95 % Gerilme Değeri		
			$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon_a(\%)$	$\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa) <sup>-1</sup>	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa)	$\epsilon_a(\%)$	$\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kPa) <sup>-1</sup>
1	105.0	186.0	130.2	0.009	0.000069	176.70	0.033	0.00019
2	210.0	222.0	155.4	0.009	0.000058	210.90	0.030	0.00014
3	420.0	294.0	205.8	0.008	0.000039	279.30	0.027	0.00010

Kil malzemesi için analizlerde kullanılmak üzere hesaplanan modül sayısı  $K= 373$ , modül üssü,  $n=0.36$ , boşaltma-geri yükleme modülü  $K_{ur}= 1119$  ve göçme oranı  $R_f= 0.89$ 'dur.

#### 4.1.2. Filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu malzemeleri için Duncan–Chang hiperbolik malzeme modeli parametrelerinin seçilmesi (*Selection of Duncan–Chang hyperbolic material model parameters for filter, cobbles and rock fill materials*)

Köprübaşı Barajı'nda kullanılan filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu malzemesi için üç eksenli basınç deneyleri yapılmadığından bu malzemelere ait model parametreleri hesaplanamamıştır. Bu sebeple Duncan ve Wong (1984) tarafından genişletilerek derlenen hiperbolik model parametreleri içerisinde benzer granülometrik özelliklere sahip zeminlere ait hesaplanmış değerler kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu malzemelerine ait hiperbolik malzeme modeli parametreleri Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Analizlerde kullanılan filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu malzemelerine ait hiperbolik malzeme modeli parametreleri (*The parameters of Duncan–Chang hyperbolic material model parameters for filter, cobbles and rock fill materials*)

Malzeme	K	n	$K_{ur}$	$R_f$
<b>Filtre</b> (Casagrande (1965), Marsal)	450	0.37	945	0.61
<b>Kaya Ufağı</b> (Marsal ve ark.)	690	0.45	1449	0.51
<b>Kaya Dolgu</b> (Duncan – Wong)	1320	0.40	2772	0.72

#### 4.1.3. Baraj yeri jeolojisi ve baraj temeli malzeme özellikleri (*Geology of dam site and material properties of foundation*)

Baraj gövdesine ait 0+650 km'den geçen jeolojik kesit incelenmiş olup en yaygın jeolojik birimin alt jura yaşlı granitoidler olduğu görülmüştür. Yer yer sık çatlaklı, çatlakları kuvars, kalsit, klorit, limonit dolguludur. Vadi tabanında kalınlıkları 9.00 - 10.00 m olan alüvyon mevcuttur. Alüvyon gövde dolgu inşasına başlamadan önce kaldırılmıştır [10].

Köprübaşı Barajı temel kayası dayanım parametrelerini belirlemek için Hoek – Brown

yenilme kriteri kullanılmıştır. Kaya kütlelerinin davranışı, kayanın litolojik özellikleri, süreksizliklerin konumu, ayrışma durumu ve pürüzlülüğüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Laboratuvarında elde edilen kayma dayanımı parametreleri, yekpare sağlam kaya numunelere aittir. Sonuçlar kaya kütlelerine ait gerçek davranışı temsil etmekte yetersiz kalmaktadır. Hoek ve Brown (1980) kayalar için yenilme kriterini ampirik olarak tanımlamış ve Eş.(7)'de görülen hali Hoek vd. (2002) tarafından güncellenmiştir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right)^a \quad (7)$$

Burada;  $m_b$ : Kaya kütlelerini temsil eden m sabitinin değeri,  $s$ ,  $a$ : Kaya kütlelerinin özelliklerine bağlı sabitler,  $\sigma'_{ci}$ : Kayanın tek eksenli basınç dayanımı,  $\sigma'_1$ : Yenilme anındaki en büyük asal gerilme,  $\sigma'_3$ : Yenilme anındaki en küçük asal gerilmedir. Bu eşitliğin içerisinde yer alan  $m_b$  parametresi jeolojik dayanım indeksinin (GSI) belirlenmesini gerektirir. Ayrıca yaklaşımın kullanılması için D: örselenme faktörü,  $m_i$ : kaya sabiti değerlerinin saptanması gerekmektedir.

Buna göre, analizlerde kullanılmak üzere mevcut deney sonuçları ve literatürden elde edilen Hoek – Brown yenilme kriteri parametreleri GSI= 50,  $m_i= 32$ ,  $D= 0$ ,  $\sigma'_{ci}= 100$  MPa'dır [12]. Bu parametreler yardımıyla belirlenen malzeme sabitleri  $m_b= 5.36$ ,  $s= 0.0039$ ,  $a= 0.506$ 'dır. Temel kayasına ait dayanım parametreleri Hoek vd. (2002) tarafından güncellenen Eş. (8) ve Eş. (9) kullanılarak  $c=7.062$  GPa,  $\phi = 40.60^\circ$  olarak belirlenmiştir [11].

$$\phi' = \sin^{-1} \left( \frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right) \quad (8)$$

$$c' = \frac{\sigma'_{ci} [(1+a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}]^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})}/((1+a)(2+a))} \quad (9)$$

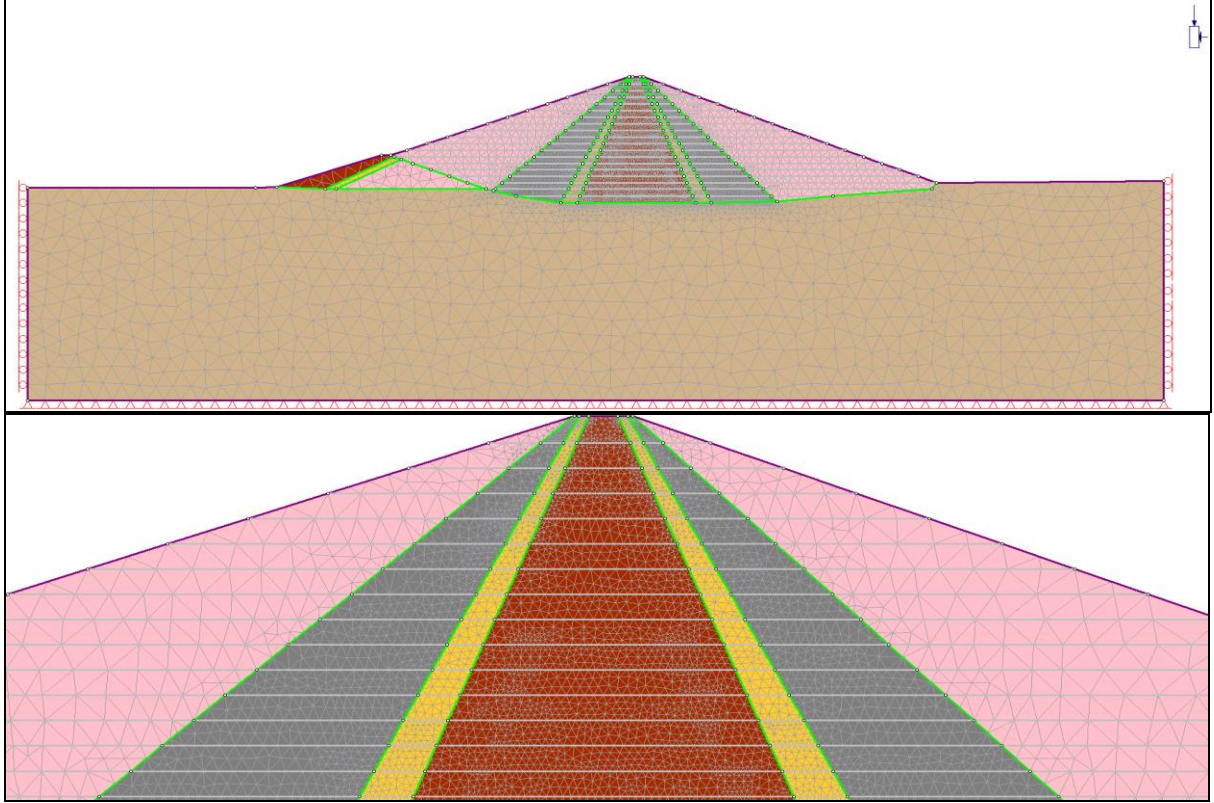
#### 4.2. Model Hakkında Genel Bilgiler (*General Information About Modeling*)

Sonlu elemanlar analizi gövdedeki gerilme ve deformasyonların belirlenmesi amacıyla Phase2 v8.005 yazılımı ile yapılmıştır. Gövde 15080 adet üç düğüm noktalı üçgen eleman ağlarla modellenmiştir. Gerilme yığılmasının oluşması beklenen bölgede eleman ağı yoğunluğu artırılmıştır. İnşaat sonrası ve su tutma sonrası için

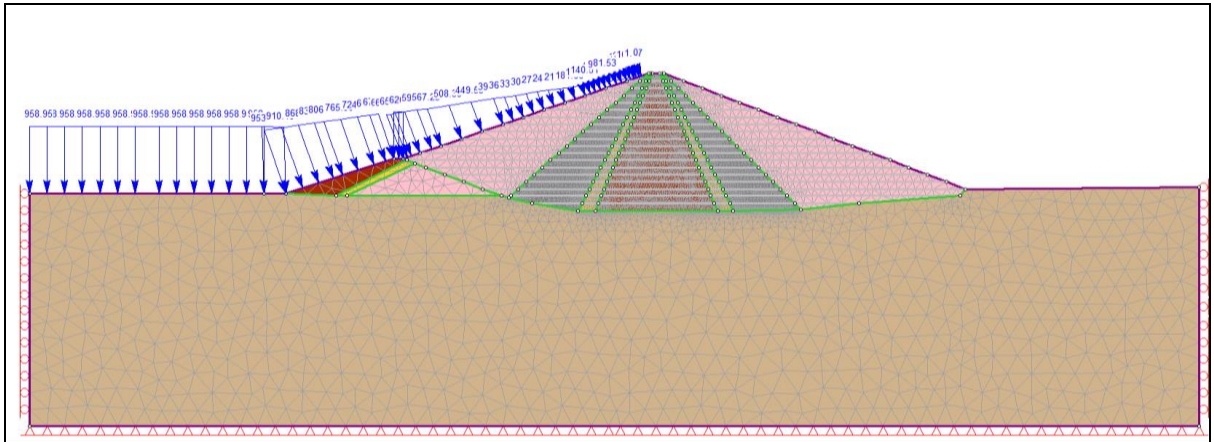
iki farklı değerlendirme yapılmıştır. Köprübaşı Barajı gövde modeli genel görünümü ve sonlu elemanlar ağı Şekil 9’da görülmektedir.

Baraj gövdesi gerçek inşa koşullarında kademe kademe serilip sıkıştırılmaktadır. Bu davranışı temsil etmek amacıyla analizlerde gövde her biri 6.0 m yüksekliğinde olan 20 kademede inşa edilmiştir.

Su tutmadan sonraki durumu temsil etmek amacıyla su gerçekte olduğu gibi kademeli olarak doldurulmuştur. Köprübaşı Barajı su tutma durumu sonlu elemanlar ağı Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 9. Köprübaşı Barajı genel görünüşü ve sonlu elemanlar ağı (General type and finite elements network of Köprübaşı Dam - end of the construction)



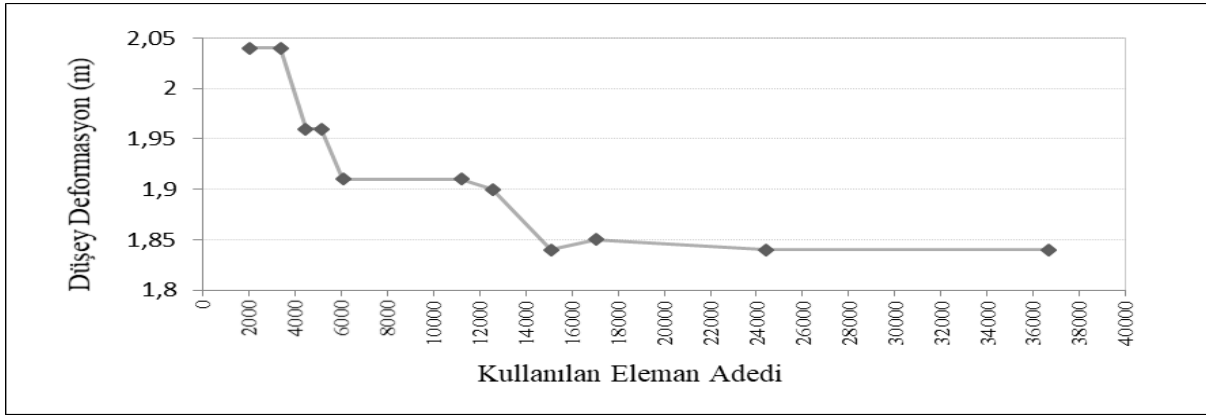
Şekil 10. Köprübaşı Barajı sonlu elemanlar ağı su tutma (Finite elements network of Köprübaşı Dam – reservoir impoundment)



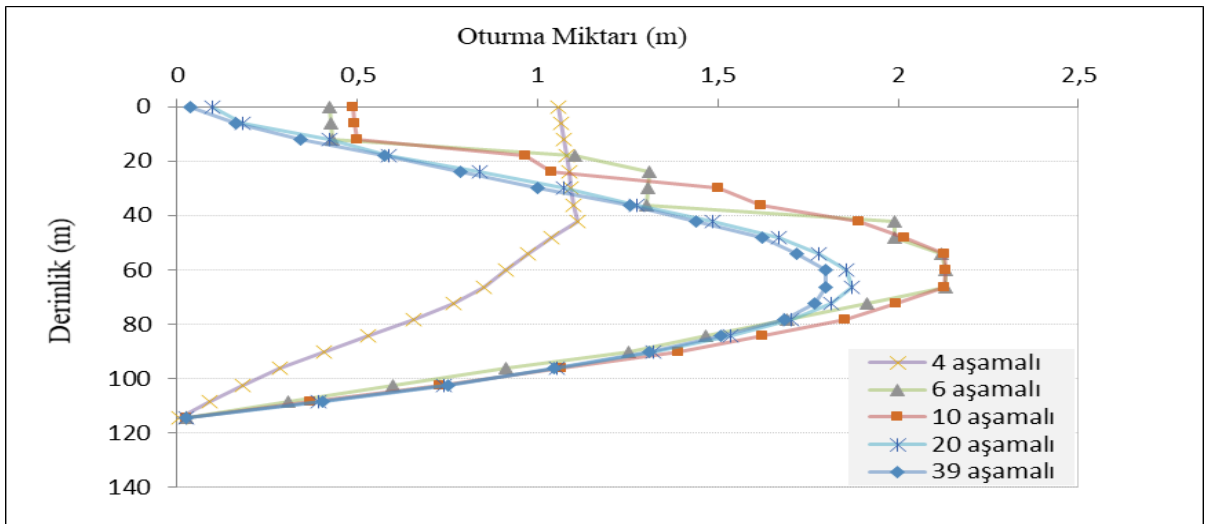
## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Gövde üzerindeki sonlu eleman sayısındaki artışın deformasyonlarda meydana getireceği değişimi incelemek amacıyla eleman adedi değiştirilerek deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde Köprübaşı Barajı modeli için en optimum sonlu eleman sayısını tespit etmek amaçlanmıştır. Şekil 11’de sonlu eleman adedi artışının deformasyonlarda meydana getirdiği değişim görülmektedir. 15080 sonlu eleman adedi ile yapılan analizlerden sonraki eleman artışlarının deformasyonları çok küçük miktarda etkilediği görülmüştür.

Analizlerde gövde kademeli olarak modellenmiştir. Kademeli dolgunun deformasyon miktarına etkisi gözlemek amacıyla 4, 6, 10, 20, 39 aşamalı analizler gerçekleştirilmiştir. Kademe sayısının artırılmasının hesaplanan düşey deformasyon miktarında meydana getirdiği değişim Şekil 12’de gösterilmektedir. Gövdenin 3 m yerleştirilip sıkıştırılması durumu (39 aşama) ile 6 m yerleştirilip sıkıştırılması durumunda (20 aşama) sonuçların birbirine çok yakın çıktığı görülmüştür. Aşama sayısı arttıkça maksimum deformasyon gövde ortasında meydana gelmektedir. Dolgunun birden yüklendiği durumda ise maksimum deformasyon krette meydana gelmektedir.

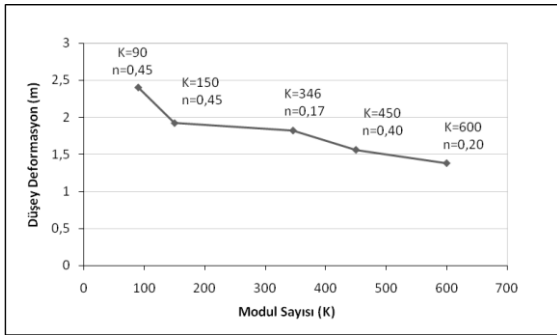


Şekil 11. Sonlu eleman adedinin artışının düşey deformasyonlara etkisi (The effect of the increase of the number of finite element on vertical deformation)



Şekil 12. Aşama sayısına bağlı olarak düşey deformasyonun değişimi (Variation of vertical deformation depending on the number of stages)

Duncan - Chang hiperbolik malzeme modeli parametrelerinin düşey deformasyonlar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla kil çekirdek malzemenin parametre değerleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Analizlerde kil malzemesi için Duncan ve ark. tarafından önerilen temsili hiperbolik parametre değerleri  $K=150$ ,  $n=0.45$ ,  $R_f=0.7$  ve  $K=90$ ,  $n=0.45$ ,  $R_f=0.7$ , Köprübaşı Barajı kil malzemesi için bu çalışmada hesaplanan hiperbolik parametre değerleri  $K=346$ ,  $n=0.17$ ,  $R_f=0.84$  ve literatürde kullanılmış olan kil malzemesi parametre değerleri kullanılarak düşey deformasyonlar hesaplanmıştır [12]. Malzeme parametrelerinin düşey deformasyonlarda meydana getirdiği değişim Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 13. Kil çekirdek malzeme için farklı Duncan - Chang hiperbolik malzeme modeli parametreleri kullanılarak düşey deformasyonların hesaplanması (Calculation of vertical deformations using different Duncan - Chang hyperbolic material model parameters in clay core material)

Literatürden alınan ve Köprübaşı Barajı için üç eksenli deney sonuçlarından hesaplanan değerler ile yapılan analizler karşılaştırılmıştır. Duncan - Chang hiperbolik malzeme modeli parametreleri değişiminin düşey deformasyonları %60'a varan oranda etkilediği görülmüştür. Modül sayısı K'nin artması ile düşey deformasyonların azaldığı görülmüştür.

Değerlendirilen diğer bir husus ise kil çekirdek malzemenin dayanım parametrelerinde meydana gelen değişimin deformasyonlara olan etkisidir. Literatürde CL zemin sınıfı için ortalama olarak önerilen kohezyon değeri  $c=90$  kPa, içsel sürtünme açısı değeri  $\phi=25^\circ$ 'dir [13]. Önerilen dayanım parametreleri esas alınarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. İlk olarak ortalama kohezyon değeri sabit tutularak ( $c=90$  kPa), içsel sürtünme açısı  $15^\circ$  ve  $30^\circ$  ile deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak ortalama içsel sürtünme açısı değeri

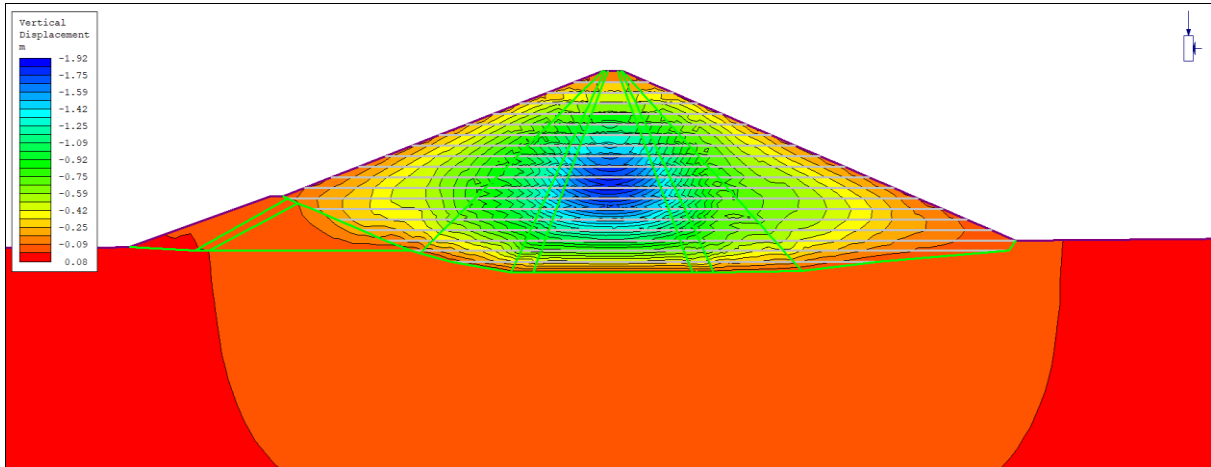
( $\phi=25^\circ$ ) sabit tutularak kohezyon değeri 70 kPa ve 80 kPa alınarak deformasyon analizleri yapılmıştır. Son olarak kil çekirdek malzemesi üç eksenli deney sonuçlarından elde edilen  $c=100$  kPa ve  $\phi=10^\circ$  değerleriyle deformasyon analizi yapılmıştır. Çizelge 3'te kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin değiştirilmesiyle elde edilen düşey deformasyon değerleri özetlenmiştir.

Çizelge 3. Kohezyon ve içsel sürtünme açısının değiştirilmesiyle elde edilen düşey deformasyon değerleri (Vertical deformation values obtained by changing cohesion and internal friction angle)

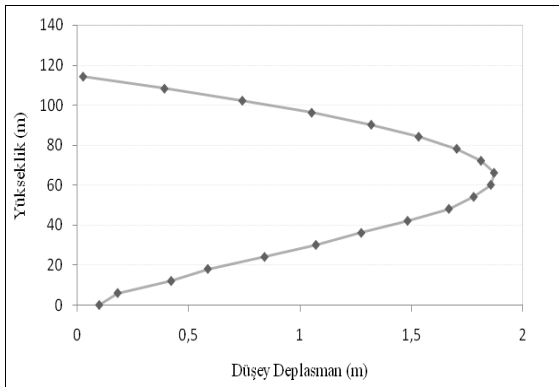
Kohezyon (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı ( $^\circ$ )	Düşey Deformasyonlar (m)
90	15	2,07
90	25	1,85
90	30	1,81
80	25	1,87
70	25	1,90
100	10	2,18

Kohezyon değeri sabit tutularak ( $c = 90$  kPa) içsel sürtünme açısının %40 azaltılması düşey deformasyon miktarını %11 artırmıştır, içsel sürtünme açısının %20 artırılması düşey deformasyon miktarını %2 azalmıştır. İçsel sürtünme açısı değerinin sabit tutularak ( $\phi=25^\circ$ ) kohezyon değerinin %22 artırılması düşey deformasyon miktarını %2 artırmıştır. Buradan görüleceği üzere dayanım parametrelerindeki değişimler düşey deformasyon miktarını sınırlı miktarda etkilememektedir.

Yukarıdaki parametrik çalışmaların değerlendirilmesiyle nihai olarak 15080 adet üçgen ağ elemana bölünen ve 20 kademede inşa edilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarında maksimum düşey deplasman 1.85 m olarak hesaplanmıştır. Deformasyon analizlerinde en fazla deformasyonun baraj gövdenin ortasında gerçekleştiği baraj kretinde ise deformasyonların çok küçük olduğu Şekil 14'ten gözlemlenmiştir. Şekil 15'te düşey deformasyonların kil çekirdek içerisindeki değişim grafiği verilmektedir.



Şekil 14. Sonlu elemanlar analizi sonucu baraj gövdesinde hesaplanan düşey deplasman (Vertical displacement calculated on the dam body as a result of finite element analysis)



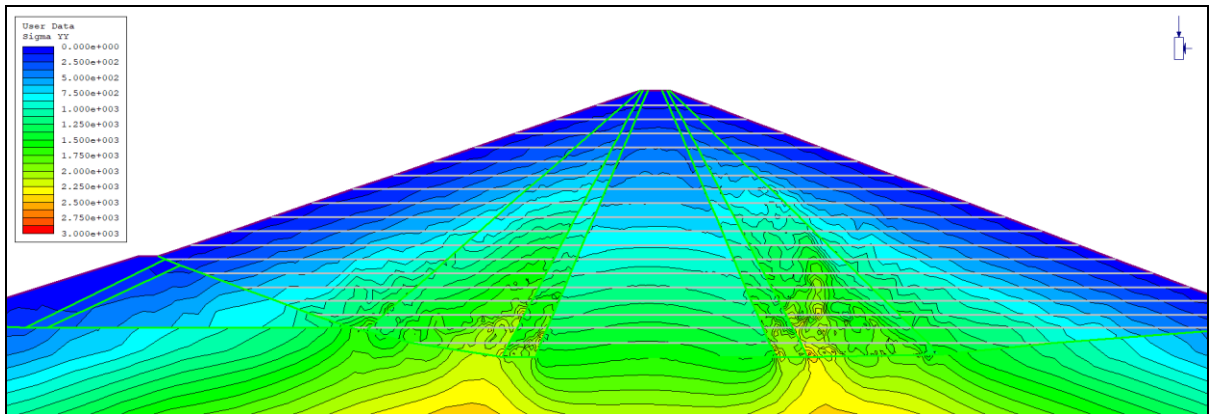
Şekil 15. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen düşey deplasman grafiği (Obtained from finite element analysis of vertical displacement graph)

Köprübaşı Barajında kil çekirdek ile kabuk malzemesinin farklı deformasyon modüllerine sahip olmasından dolayı (kilin daha çok oturma eğiliminde olması) aralarında farklı oturma

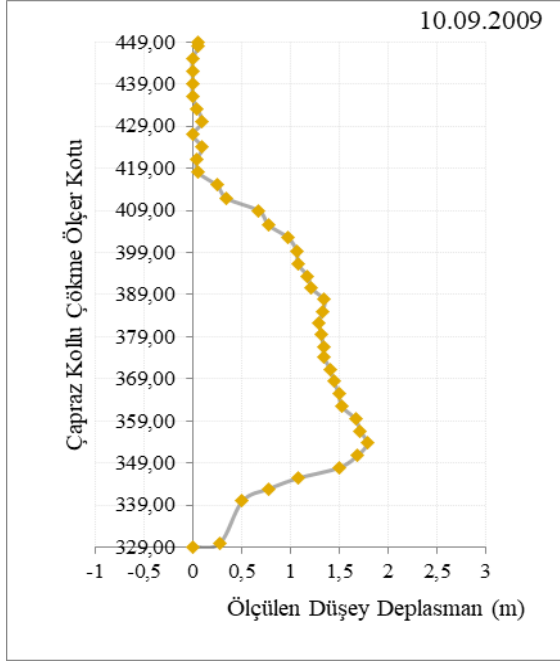
davranışı olmasına sebep olmuştur. Bu farklılık çekirdekten kabuğa bir yük transferine sebep olmaktadır. Köprübaşı Barajında kemerlenme etkisi olduğu Şekil 16'da görülmektedir.

Su tutmadan sonraki durum için yapılan analizlerde gövdede meydana gelen düşey deformasyon 1.96 m olarak hesaplanmıştır. Su tutma durumunda inşaat sonu durumuna göre oturma miktarında çok büyük değişim gözlemlenmemiştir.

Baraj gövdesi km 0+650'de bulunan 39 adet manyetik halka ile gövdede oluşan oturmalar belirli periyotlarla izlenmiştir. 10 Eylül 2009 tarihinde çapraz kollu çökme ölçerlerden okumalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 17'de düşey deplasmanın gövde içerisindeki kotlardaki değişimi gösterilmektedir. Yapılan okumalarda gövdede maksimum oturmanın 1.91 m olduğu ölçülmüştür.

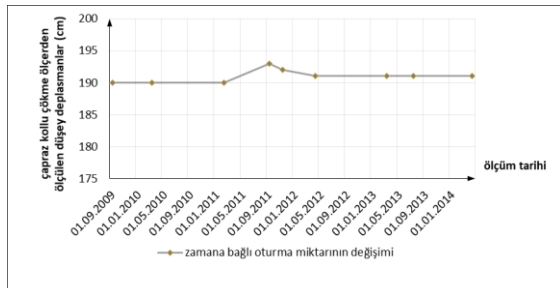


Şekil 16. Köprübaşı Barajı düşey gerilmeleri (Köprübaşı Dam vertical stresses)



Şekil 17. Km 0+650'de bulunan çapraz kollu çökme ölçerlerden ölçülen düşey deplasmanlar (Measured from the cross-arm settlement device vertical displacement in km 0+650)

Çapraz kollu çökme ölçerlerde ilk inşaat sonu okumasından su tutma işlemine kadarki periyotta yapılan ölçümlerde düşey deformasyon miktarında kayda değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Çapraz kollu çökme ölçerlerden 02.07.2011 yılında başlanan su tutma işleminden sonra ölçülen düşey deformasyonlar incelendiğinde yine ciddi bir artışın olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 18'de çapraz kollu çökme ölçerlerden belirli periyotlarda okunan maksimum düşey deplasman değerleri grafiği verilmiştir. Bu durum inşaat sonu ve su tutma durumları için hesaplanan ve ölçülen oturma miktarlarının uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 18. Çapraz kollu çökme ölçerlerden belirli periyotlarda okunan oturma değerleri (Settlement values of readings periodically from the cross-arm settlement device)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Temelden yüksekliği 120 m olan kil çekirdek kaya dolgu tipindeki Köprübaşı Barajı sonlu elemanlar metoduyla analizleri Phase2 v8.005 yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve gövdede meydana gelmesi beklenen düşey deformasyonlar incelenmiştir. Malzemenin doğrusal olmayan, gerilme bağımlı ve elastik olmayan davranışını temsil etmek amacıyla Duncan – Chang malzeme modeli kullanılmıştır. Geçirimsiz çekirdek malzeme için mevcut olan üç eksenli deney sonuçlarından Duncan - Chang hiperbolik malzeme modeli parametreleri hesaplanmış olup filtre, kaya dolgu ve temel kayası için literatürden alınan değerlerle analiz gerçekleştirilmiştir.

Gövde üç düğüm noktalı üçgen eleman ağlarla modellenmiştir. Deformasyonların beklendiği bölgelerde eleman sayısı artırılmıştır. Gövde üzerinde sonlu eleman sayısının artırılmasıyla gerçekleştirilen analizlerde deformasyonların daha gerçekçi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Gövde inşaa koşullarını temsil etmek amacıyla baraj kademeli olarak modellenmiştir. 4, 6, 10, 20, 39 aşamalı yapılan analizlerde, aşama sayısının artmasıyla deformasyonların gövdenin orta yüksekliklerinde meydana geldiği görülmüş olup 3 m (39 aşama) dolgu yüksekliğiyle analiz yapılması ile 6 m (20 aşama) dolgu yüksekliği ile analiz yapılması durumlarında oturma miktar ve bölgesinde bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Baraj gövdesinin tipik en kesitinde 6 m dolgu yüksekliğiyle yapılan analizlerde (20 aşamalı) baraj yüksekliğinin yaklaşık %1,55 civarı deformasyon olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum baraj gövdesine yerleştirilmiş olan çapraz kollu çökme ölçerlerden okunan deformasyonlarla karşılaştırılmış olup miktar olarak uyumlu olduğu görülmüştür.

Gövde geçirimsiz çekirdeğine ait Duncan – Chang modül parametrelerindeki değişimin deformasyon miktarına olan etkisinin incelenmesi amacıyla  $K_v$ ,  $n$  ve  $R_f$  değerleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Modül parametrelerindeki değişimin düşey deformasyon miktarını önemli oranda değiştirdiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde geçirimsiz çekirdeğine ait dayanım parametrelerindeki değişimin deformasyon miktarına olan etkisinin incelenmesi amacıyla

kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Dayanım parametrelerindeki değişimin düşey deformasyon miktarını önemli oranda arttırmadığı görülmüştür.

Su tutma durumu için ise rezervuar dolumunu temsil etmek amacıyla gövdeye su yükü kademeli olarak verilmiştir. Analizlerde su tutma durumunda gövdede meydana gelen oturmada ciddi bir artışın olmadığı en fazla oturmanın inşaat sonunda gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumun baraj gövdesine yerleştirilmiş olan çapraz kollu çökme ölçerlerden okunan deformasyonlarla karşılaştırılmış olup miktar olarak uyumlu olduğu görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Bostancı, "Eğri Eksenli Çubukların Titreşimlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi ve Deneysel Sonuçlarla Karşılaştırılması," M. S. thesis, İstanbul Technical University, İstanbul, Turkey, 2002.
- [2] R. W. Clough and R. J. Woodward "Analysis of Embankment Stresses and Deformations", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, Vol 93, No SM4, Jul., pp 529-549, 1967.
- [3] R. S. Özkuzukıran, "Settlement Behaviour of Concrete Face Rockfill Dams: A Case Study" M. S. thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2005.
- [4] J. M. Duncan and K.S. Wong, Hyperbolic Stres – Strain Parameters for Nonlinear Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses. California: University of California, 1984.
- [5] W. Dong, L. Hu, Y. Z. Yu and H. Lv " Comparison between Duncan and Chang's EB Model and the Generalized Plasticity Model in the Analysis of a High Earth-Rockfill Dam" Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics, Vol 2013, Article ID 709430, Aug. 2013.
- [6] M. Derakhshandi, H. R. Pourbagherian, M. H. Baziar, N. Shariatmadari and A. H. Sadeghpour "Numerical Analysis And Monitoring Of A Rockfill Dam At The End Of Construction (Case Study: Vanyar Dam)" *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 4, Dec. 2014.
- [7] D. J. Naylor, J. R. Maranha, E. Maranha Das Neves and A. A. V. Pinto " A back-analysis of Beliche Dam" *Geotechnique*, Vol. 47, No. 2, Jan., pp. 221-233, 1996.
- [8] R. Nayebyzadeh and M. Mohammadi "The Effect of Impervious Clay Core Shape on the Stability of Embankment Dams" *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 29, Mar., pp. 627–635, 2011.
- [9] "Köprübaşı Barajı ve Hidroelektrik Santrali Projesi - Baraj Gözlemlerinin Değerlendirilmesi Raporu-1," Dolsar Mühendislik, Ankara, Turkey, Tech. Report. 2011.
- [10] "Filyos Projesi Köprübaşı Barajı ve HES Kesin Proje Aşaması - Doğal Yapı Gereçleri Raporu, " Devlet Su İşleri 23. Bölge Müdürlüğü, Kastamonu, Turkey, Tech. Report. 1999.
- [11] "Geoteknik Tasarım Esasları," Yüksel Proje, Ankara, Turkey, Tech. Report. 2007.
- [12] T. Yetimoğlu "Modifiye Duncan Hiperbolik Zemin Modeli Kullanılarak Sıkı Kumların Gerilme-Deformasyon-Hacim Değişimi Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi, Vol. 8, Sayı:37 Mar., 1997.
- [13] "Earth Manuel," U.S. Department Of The Interior Bureau Of Reclamation Colorado, USA, 1998 Tech. Report. 1998.

#### ÖZGEÇMİŞ

##### **Nail ÜNSAL**

Prof. Dr. Nail Ünsal, 1960 yılında Nevşehir'de doğdu. 1982 yılında Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesinden mezun oldu. 1984 yılında yüksek lisansını, 1991 yılında doktorasını aynı üniversitede tamamladı. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde 1991 yılında yardımcı doçent, 1997 yılında doçent ve 2003 yılında profesörlük ünvanını aldı. Ünsal'ın 35'in üzerinde yurtiçi ve yurtdışı bilimsel yayını bulunmaktadır. SCI indexte taranan dergilerde yayımlanan makalesiyle 1996 yılında Erguvanlı Mühendislik Jeolojisi Ödülünü aldı. Ünsal, 2001-2004 yılları arasında Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesinde Dekan Yardımcılığı ve 2008-2010 yılları arasında da Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü görevinde bulunmuştur. Prof. Dr. Ünsal 2010-2013 tarihleri arasında Gazi

Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığını yapmıştır.

#### **Erhan TEKİN**

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden lisans, yüksek lisans ve doktora derecelerini almıştır. Aynı bölümde 2002 yılında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamış olan Dr. Tekin, 2012 yılında öğretim görevlisi kadrosunda aynı bölümde görevine devam etmektedir. Lisans seviyesinde zemin mekaniği, temel mühendisliği, yüksek lisans seviyesinde ise geoteknik sayısal modelleme derslerini vermektedir. İlgi alanları temellerin güvenilirliğe dayalı tasarımı, zemin yapı etkileşimi ve sonlu elemanlar analizidir. Geoteknik etüt raporu, sığ/derin temel tasarımı, derin kazı, istinat duvarı, zemin iyileştirme, şev stabilitesi ve ıslahı konularında akademik danışmanlıkları bulunmaktadır.

#### **Gözde ARSLAN\***

Gözde Arslan, Ankara doğumludur. 2013 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği (Mühendislik Fakültesi) Anabilim Dalında yüksek lisansına devam etmektedir. Dolgu barajlar ve içmesuyu sistemleri üzerine çalışmalar yapmaktadır.