
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KÖPRÜBAŞI BARAJININ OTURMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Gözde ARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2019

Gözde ARSLAN tarafından hazırlanan "KÖPRÜBAŞI BARAJININ OTURMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Nail ÜNSAL

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

İkinci Danışman: Öğr. Gör. Dr. Erhan TEKİN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Başkan: Doç. Dr. Berna UNUTMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Üye: Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Üye: Doç. Dr. Zeynep Huri ÖZKUL BİRGÖREN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum. .....

Tez Savunma Tarihi: 20/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Gözde ARSLAN

20/06/2019

KÖPRÜBAŞI BARAJININ OTURMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gözde ARSLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Dolgu barajların gövdesinde meydana gelmesi beklenen oturmalar; temel ve dolgu malzemesi özellikleri, dolgu geometrisi, dolgunun inşa 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 malzeme parametreleri üç eksenli basınç deney sonuçlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Filtre ve kaya dolgu malzeme parametrelerini elde etmek için literatürdeki araştırmalar kullanılmıştır. İnşa 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 kollu çökme ölçerlerden elde edilen deformasyon sonuçları karşılaştırılmış olup deformasyonların uyumlu olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91105
Anahtar Kelimeler	:	Kil çekirdek kaya dolgu baraj, düşey deformasyon, Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli, sonlu elemanlar yöntemi
Sayfa Adedi	:	89
Danışman	:	Prof. Dr. Nail ÜNSAL
İkinci Danışman	:	Öğr. Gör. Dr. Erhan TEKİN

ANALYSING THE SETTLEMENT BEHAVIOUR OF KÖPRÜBAŞI DAM BY FINITE ELEMENT METHOD

(M. Sc. Thesis)

Gözde ARSLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

Settlements expected to occur in the body of embankment dams are controlled by factors such as 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 behavior of the material. In this study, the construction behavior of the Köprübaşı Dam, constructed as a clay core rockfill type dam, was examined using the finite element method. In order to represent the nonlinear, stress-dependent and in-elastic behavior of the material, analyses were performed by using Duncan – Chang hyperbolic material model. Material parameters for clay core material were determined by using triaxial compression test results. Parameters for the filter and rock fill materials, were obtained fromthe literature. In order to represent construction and reservoir loading conditions, the body embankment and the reservoir level were modeled in stages. The calculated results of deformation for end of construction and water retention were compared with those obtained from measuring instruments placed in the dam body. The calculated and measured deformations were found to be compatible.

Science Code	:	91105
Key Words	:	Clay core rockfill dam, vertical deformations, Duncan – Chang hyperbolic material model, finite elements method
Page Number	:	89
Supervisor	:	Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Co-Supervisor	:	Dr. Lect. Erhan TEKİN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada değerli bilgi ve tecrübeleriyle her konuda yardımlarını esirgemeyen tez danışmanlarım Prof. Dr. Nail ÜNSAL ve Dr. Erhan TEKİN'e teşekkür ve saygılarımı sunarım. Köprübaşı Barajı ve HES Projesine ait tezim dahilinde kullandığım bilgileri edinmemde katkıda bulunan DSİ Barajlar ve HES Dairesi kıymetli çalışanlarına ve tecrübelerini hiç esirgemeden benimle paylaşan İnşaat Yüksek Mühendisi Yasemin ER ve İnşaat Yüksek Mühendisi Cihangir ARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte sabırla bana destek olan ERBAŞ ve ARSLAN ailelerine, annem Ülviye ERBAŞ'a, kardeşim Gaye AÇIKGÖZ'e ve kıymetli eşim Cihangir ARSLAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xv

HARİTALARIN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

2. DOLGU BARAJLAR VE DEFORMASYON DAVRANIŞLARI 3

2.1. Dolgu Barajlar 3

2.2. Dolgu Barajların Tarihsel Gelişimi 3

2.3. Dolgu Barajların Deformasyon Davranışları 5

2.3.1. Deformasyon nedenleri 5

2.4. Dolgu Barajların Deformasyon Karakteristikleri 11

2.5. Dolgu Barajlarda Kemerlenme Etkisi 15

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOLGU BARAJLARIN İNCELENMESİ 19

3.1. Malzeme Modelleri 20

3.1.1. Lineer elastik malzeme modeli 21

3.1.2. Mohr –Coulomb malzeme modeli 21

3.1.3. Modifiye Cam Clay malzeme modeli 22

3.1.4. Pekleşen zemin modeli 23

Sayfa

3.1.5. Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli 24

3.2. Hiperbolik Modelin Dolgu Baraj Analizlerinde Kullanılması 30

4. ÇALIŞMA ALANI 35

4.1. Köprübaşı Barajı ve HES Projesi 35

4.2. Proje karakteristikleri 37

4.2.1. Baraj gövdesi 37

4.2.2. Dolusavak 38

4.2.3. Derivasyon tüneli 39

4.2.4. Santral binası 39

4.2.5. Baraj yeri ve çevresinin jeolojisi 39

4.2.6.Baraj dolgusu 41

4.2.7. Ölçüm aletleri 43

4.3. Analizlerde Kullanılan Malzeme Parametrelerinin Hesaplanması ve Seçimi 49

4.3.1. Kil çekirdek dolgu malzemesi için Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli parametrelerinin hesaplanması 49

4.3.2. Filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu malzemeleri için Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli parametrelerinin seçilmesi..... 52

4.3.3. Temel kayası malzeme özellikleri 58

4.4. Model Hakkında Genel Bilgiler 63

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 69

5.1. Sonlu Eleman Sayısının Düşey Deformasyonlara Etkisi 69

5.2. Gövdenin Kademeli Olarak Modellenmesi 69

5.3. Duncan - Chang Hiperbolik Malzeme Modeli Parametrelerinin Düşey Deformasyonlar Üzerindeki Etkisi 73

5.4. Malzemenin Dayanım Parametrelerinin Düşey Deformasyonlara Etkisi 74

Sayfa

6. SONUÇLAR 83

KAYNAKLAR 85

ÖZGEÇMİŞ 88

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. İnşaat sonrası gövde yüksekliğine bağlı deformasyon miktarları..... 13

Çizelge 3.1. Zemin bünye modelleri 21

Çizelge 3.2. Gerilme – şekil değiştirme ilişkisi için hiperbolik parametrelerin özeti.. 29

Çizelge 3.3. Nuozhadu Barajı model parametreleri 33

Çizelge 3.4. Vanyar Barajı model parametreleri 34

Çizelge 4.1. Dolgu malzemesi alınan malzeme ocakları 41

Çizelge 4.2. Çökme röperlerinin yerleşimi 45

Çizelge 4.3. Çapraz kollu çökme ölçerin gövde içerisinde yerleştirilme kotları 47

Çizelge 4.4. Köprübaşı Barajı geçirimsiz malzemesinin dönüştürülmüş gerilme şekil değiştirme değerlerinin hesaplanması..... 50

Çizelge 4.5. E_i/P_a ve σ_3/P_a Değerlerinin Hesaplanması..... 51

Çizelge 4.6. Kil malzeme için analizlerde kullanılan malzeme parametreleri 52

Çizelge 4.7. Duncan ve Wong (1984) tarafından GW - GP zemin grubu için derlenen hiperbolik model parametreleri..... 53

Çizelge 4.8. Köprübaşı Barajı filtre malzemesi ve Casagrande (1965), Marsal (1967) tarafından kötü derecelenmiş çakıl malzemede yapılan deneylerden alınan dane boyutları..... 55

Çizelge 4.9. Analizde kullanılan filtre malzemesi parametreleri..... 55

Çizelge 4.10. Köprübaşı Barajı filtre malzemesi ve Marsal ve ark. (1965) tarafından iyi derecelenmiş çakıl malzemede yapılan deneylerden alınan dane boyutları 56

Çizelge 4.11. Analizde kullanılan kaya ufağı malzemesi parametreleri..... 57

Çizelge 4.12. Kaya dolgu malzemesi için karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar..... 57

Çizelge 4.13. Kaya dolgu malzeme için sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan hiperbolik model parametre değerleri..... 58

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.14. Kayaç malzemesi için m_i sabitinin değerleri 60

Çizelge 5.1. Kohezyon ve içsel sürtünme açısının değiştirilmesiyle elde edilen düşey deformasyonlar 75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Sadd-el Kafara Barajı (M.Ö. 2600) 4

Şekil 2.2. Farklı su muhtevalarında deformasyonların zamana bağlı değişimi 6

Şekil 2.3. Rezervuar dolumunun zonlu barajlardaki etkileri 7

Şekil 2.4. Dolgu barajlardaki çatlak sistemleri 9

Şekil 2.5. Dolgu barajlarda değişik yük aktarımı şekilleri..... 10

Şekil 2.6. Baraj tipik en kesit geometrisi 11

Şekil 2.7. Dolgu barajlarda inşaat sonrası düşey deformasyon örnekleri 12

Şekil 2.8. Merkez çekirdekli barajlarda oturma miktarı 13

Şekil 2.9. Kinda Barajı'nın inşaat sonu düşey deformasyon davranışı..... 14

Şekil 2.10. Dolgu barajlarda genel yatay deformasyon davranış karakteristiği 15

Şekil 2.11. Ghovashan Barajı enkesiti, düşey gerilme ve düşey deformasyon değişimi 16

Şekil 2.12. Farklı çekirdek eğimlerinde kemerlenme oranının değişimi 17

Şekil 3.1. Standart bir barajın tek kademeli ve 10 kademeli deformasyon analiz sonuçları 20

Şekil 3.2. Mohr – Coulomb malzeme modeli gerilme şekil değiştirme eğrisi 22

Şekil 3.3. Konsolidasyon karakterinin e - ln (p) diyagramında gösterimi 23

Şekil 3.4. Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi 23

Şekil 3.5. Gerilme - şekil değiştirme eğrisinin hiperbolle temsil edilmesi 25

Şekil 3.6. Çevre basıncı ile birlikte başlangıç tanjant modülünün değişimi 26

Şekil 3.7. Çevre basınç - dayanım ilişkisi..... 27

Şekil 3.8. Boşaltma ve yeniden yükleme eğrisi 28

Şekil 3.9. Oroville Barajı enkesiti 30

Şekil 3.10. Oroville Barajı gerilme şekil değiştirme eğrisi ve dönüştürülmüş hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi 30

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.11. Oroville Barajı kaya dolgu malzemesi E_i/E_a ile σ_3/P_a grafiği 31

Şekil 3.12. Oroville Barajı düşey deformasyon miktarı 31

Şekil 3.13. Oroville Barajı hesaplanan ve ölçülen deformasyon sonuçların karşılaştırılması 32

Şekil 3.14. Nuozhadu Barajı düşey deformasyon grafiği 33

Şekil 4.1. Köprübaşı Barajı yeri tipik enkesiti 36

Şekil 4.2. Köprübaşı Barajı tipik gövde enkesiti 36

Şekil 4.3. Köprübaşı Barajı genel yerleşim planı 37

Şekil 4.4. Köprübaşı Barajı gövde yeri jeolojik boykesiti 40

Şekil 4.5. Köprübaşı Barajı jeolojik sütunu 40

Şekil 4.6. Kaya malzeme alanı ve laboratuvar sonuçları 43

Şekil 4.7. Sabit ve çökme röperlerine ait şematik şekil 44

Şekil 4.8. Kret ve şev tipi harici çökme röperler 44

Şekil 4.9. Baraj gövdesinde bulunan çapraz kollu çökme ölçerler (0+650 Km) 48

Şekil 4.10. Kil malzemesi üç eksenli deney sonucu gerilme şekil değiştirme grafiği 50

Şekil 4.11. Dönüştürülmüş gerilme – şekil değiştirme grafiği 51

Şekil 4.12. Köprübaşı Barajı için K ve n değerlerinin belirlenmesi 52

Şekil 4.13. Köprübaşı Barajı filtre malzemesi elek analizi deney sonucu 54

Şekil 4.14. Köprübaşı Barajı geçirimli malzeme elek analizi deney sonucu 56

Şekil 4.15. Oroville Barajı dolgu malzemelerine ait gronülometri eğrisi 58

Şekil 4.16. Örselenme faktörü (D) rehberi 61

Şekil 4.17. Genelleştirilmiş Hoek – Brown yenilme ölçütü için tahmin edilen mb/mi, s, a deformasyon modülü E ve Poisson oranı ν 62

Şekil 5.1. Sonlu eleman adedinin artışının düşey deformasyonlara etkisi 69

Şekil 5.2. Aşama sayısına bağlı olarak düşey deformasyonun değişimi 73

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.3. Kil çekirdek malzemede farklı Duncan - Chang hiperbolik malzeme modeli parametreleri kullanılarak düşey deformasyonların hesaplanması 74

Şekil 5.4. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen düşey deformasyon grafiği 76

Şekil 5.5. Km 0+650'de bulunan çapraz kollu çökme ölçerlerden ölçülen düşey deformasyonlar 79

Şekil 5.6. Ölçülen ve hesaplanan düşey deformasyon..... 80

Şekil 5.7. Baraj gövdesinde ölçülen düşey deformasyon miktarının zamana göre değişimi..... 80

Şekil 5.8. Harici çökme ölçerden okunan baraj kreti oturması..... 81

Şekil 5.9. Harici çökme ölçerden okunan baraj mansap şevi oturması 82

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Gövde mansaptan görünüş 38

Resim 4.2. Köprübaşı Barajı dolusavak yapısı 38

Resim 4.3. Köprübaşı Barajı santral binası 39

Resim 4.4. Köprübaşı Barajında bulunan harici çökme röperi ve ölçüm odası 46

Resim 4.6. Köprübaşı Barajı genel görünüşü ve sonlu elemanlar ağı – inşaat sonu 64

Resim 4.7.(a). Kil çekirdek malzeme özellikleri 65

Resim 4.7.(b). Filtre malzeme özellikleri 65

Resim 4.7.(c). Kaya Ufağı malzeme özellikleri 66

Resim 4.7.(d). Kaya dolgu malzeme özellikleri 66

Resim 4.8. Dolgunun kademeli inşası (10. Kademe) 67

Resim 4.9. Köprübaşı Barajı sonlu elemanlar ağı - su tutma durumu 67

Resim 5.1.(a). Tek kademeli modelde düşey deformasyon 70

Resim 5.1.(b). 4 kademeli modelde düşey deformasyon 70

Resim 5.1. (c). 6 kademeli modelde düşey deformasyon 71

Resim 5.1. (d). 10 kademeli model modelde düşey deformasyon 71

Resim 5.1. (e). 20 kademeli modelde düşey deformasyon 72

Resim 5.1. (f). 39 kademeli modelde düşey deformasyon 72

Resim 5.2. Sonlu elemanlar analizi sonucu baraj gövdesinde hesaplanan düşey deformasyon 76

Resim 5.3. Köprübaşı Barajı düşey gerilmeleri 77

Resim 5.4. Midas NTS NX sonlu elemanlar yazılımı ile gövdenin modellenmesi 77

Resim 5.5. Midas NTS NX sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan düşey deformasyon 78

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 4.1. Köprübaşı Barajı'nın Türkiye üzerindeki konumu 35

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a	Kaya kütlesi özelliğine bağlı sabit
c	Kohezyon
D	Örselenme faktörü
e	Boşluk oranı
E	Elastisite modülü
E_t	Tanjant elastisite modülü
GSI	Jeolojik dayanım indeksi
H	Baraj gövde yüksekliği
K	Modül sayısı
K_{ur}	Boşaltma - geri yükleme modülü
m	metre
m_b	Kaya kütlesini temsil eden sabit değer
n	Modül üssü
P_a	Atmosfer basıncı
R_L	Kemerlenme sayısı
s	Kaya kütlesi özelliğine bağlı sabit
ε	Birim deformasyon
γ	Birim hacim ağırlık
v	Poison oranı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
σ_1	En büyük asal gerilme
σ_3	Çevre basıncı
σ_{ci}	Kayanın tek eksenli basınç dayanımı
σ_1-σ_3	Deviatör gerilme
$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$	Deviotör gerilmenin nihai değeri
$(\sigma_1-\sigma_3)_f$	Deviotör gerilmenin göçme anındaki değeri
p'	Efektif gerilme

Kısaltmalar	Açıklamalar
CCER	Merkez çekirdekli toprak ve kaya dolgu baraj
CFRD	Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu baraj
ICOLD	Internatıonal Commıssıon On Large Dams
MÖ	Milattan önce
yy.	Yüzyıl

1. GİRİŞ

Dolgu barajlar tarihin en eski mühendislik yapılarından olup 20. yy başlarında zemin mekaniği ve inşaat tekniklerinin gelişmesiyle bilimsel kurallarla inşa edilmeye başlanan yapılardır. Dolgu baraj tasarımlarında statik ve dinamik stabilite, yapım ve işletmedeki baraj deformasyonları ve baraj güvenliği konuları son yıllarda daha çok önem kazanmıştır.

Dolgu barajlarda deformasyonlar baraj inşası sırasında başlar ve su tutma sonrasında da devam eder. Deformasyonların başlıca sebepleri baraj gövdesinin kendi ağırlığı ve su basıncıdır. Baraj gövdesinde meydana gelen bu deformasyonlar bize baraj güvenliği açısından ciddi sinyaller vermektedir. Bu sebeple gövde içerisine yerleştirilen ölçüm cihazlarıyla meydana gelen hareketler takip edilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu ile baraj tasarımı aşamasında deformasyonların karakterleri ve büyüklükleri tahmin edilebilmektedir. Ancak sonlu elemanlar analizleri ile yapılan tasarımlarda güvenilir sonuçlara ulaşmak için malzeme özelliklerinin gerçeğe en yakın temsil edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple malzemelerin geoteknik özelliklerini sonlu elemanlar analizlerine entegre etmek amacıyla malzeme modelleri geliştirilmiştir.

Bu çalışmada temelden yüksekliği 120 m olan kil çekirdek kaya dolgu tipinde inşa edilen Köprübaşı Barajı ve HES Projesinin baraj gövdesine ait düşey deformasyon davranışı sonlu elemanlar methoduyla incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizleri Phase2 v8.005 yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Dolgu malzemelerinin geoteknik özellikleri Phase2 v8.005 yazılımı içerisinde bulunan, malzemenin gerilme bağımlı, nonlineer ve inelastik özelliklerini temsil eden Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli kullanılarak temsil edilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen düşey deformasyonlar ölçüm aletlerinden elde edilen okumalarla karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2'de dolgu barajlarda meydana gelen deformasyonların nedenleri ve meydana gelen deformasyonların karakterleri anlatılacaktır.

Bölüm 3'te sonlu elemanlar yönteminin dolgu barajlarda kullanılması ve sonlu elemanlar yönteminde malzeme davranışını temsil eden malzeme modelleri anlatılacaktır. Bu malzeme

modelleri içerisinde bu çalışmada kullanılan Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli detaylı özetlenecektir.

Bölüm 4'te Köprübaşı Barajı ve HES projesi özellikleri ve bu proje kapsamında kullanılmış olan baraj ölçüm aletleri özetlenecektir. Ayrıca sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan dolgu malzeme parametrelerinin belirlenmesi anlatılacaktır.

Bölüm 5'te Köprübaşı Baraj gövdesinin, sonlu elemanlar analizleri gerçekleştiren Phase2 v8.005 yazılımıyla deformasyon analizleri yapılacak ve bu sonuçlar baraj gövdesinde bulunan ölçüm aleti okumalarıyla karşılaştırılacaktır. Ayrıca sonlu elemanlar analizlerinde malzeme parametreleri, eleman adedi vb. özellikler değiştirilerek deformasyonlar üzerindeki etkileri irdelenecektir.

2. DOLGU BARAJLAR VE DEFORMASYON DAVRANIŞLARI

2.1. Dolgu Barajlar

Barajlar; akarsuların depolanarak ihtiyacı karşılayacak şekilde kullanıma sunulmasını ve çevre ile insan yaşamına verebileceği zararları önleyen yapılardır [1]. Dünyada ve ülkemizde çok sık kullanılan baraj türlerinden olan dolgu barajlar ise yapı yerinin yakınından alınan veya kazılarak sağlanan tabi malzemenin sıkıştırılarak kullanılmasıyla inşa edilen baraj türüdür [2].

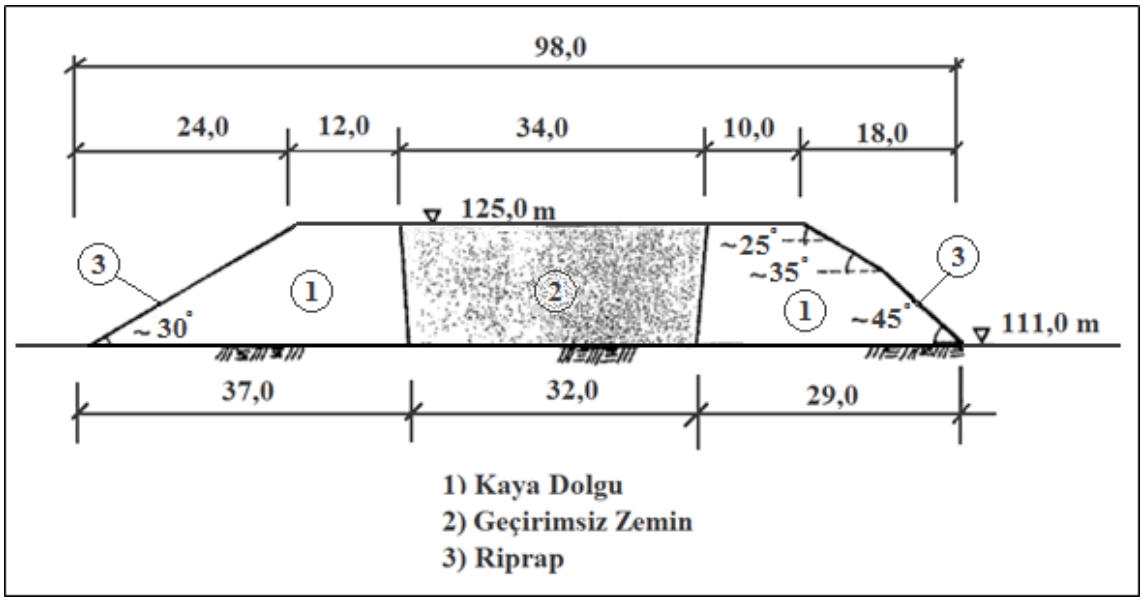
Dolgu barajlar dar vadiden geniş vadiye kadar her vadi şekline uygun olması, dolgu malzemesinin barajın yapılacağı yerden kolaylıkla elde edilebilir olması, dolgu malzemesinin kolay işlenebilir olması, ekonomik olması, oluşacak farklı deformasyonlardan ve depremden diğer baraj türlerine göre daha az etkilenmesi gibi sebeplerden dolayı sıkça tercih edilmektedir. Dolgu barajlar rezervuardaki su basıncını dolu gövdelerinin ağırlığı ile temele aktarmaktadır [3].

Dolgu barajlar; kil çekirdekli toprak dolgu barajlar, kil çekirdekli kaya dolgu barajlar, önyüzü beton kaplı dolgu barajlar, önyüzü asfaltik beton kaplı dolgu barajlar, asfaltik beton çekirdekli dolgu barajlar olarak sınıflandırılabilir [3].

2.2. Dolgu Barajların Tarihsel Gelişimi

Dolgu barajlar M.Ö. 3000 yılında ilk örnekleri inşa edilmeye başlanan en eski mühendislik yapılarındandır. Dünyanın en eski barajı olarak kabul edilen 14 m yüksekliğindeki Sadd-el Kafara Barajı (M.Ö. 2600) kaya dolgu tipinde taşkın kontrol amacıyla Mısır'da inşa edilmiştir. Sadd-el Kafara Barajı'nın kesiti Şekil 2.1'de verilmiştir [4]. Antik çağda barajlar su temini veya sulama maksadıyla tek bir amaç için inşa edilmiştir ve bu dönemde inşa edilmiş çoğunun yüksekliği 30 m den fazla olan 34 adet baraj olduğu öne sürülmektedir [4], [5]. Uygarlığın gelişmesiyle birlikte su temini, sulama, taşkın kontrol, su kalitesi kontrolü ve enerji ihtiyacı artmıştır [5]. 16. yy. sonlarına doğru bu liste çoğu su depolamak amacıyla kullanılan aynı zamanda su temini, arazi sulama ve taşkın koruma amaçlarına hizmet eden 300 barajı içermekteydi. 17. yy.'da maden endüstrisindeki gelişmeleri takiben Almanya'da 60 adet dolgu baraj inşa edilmiştir. Bu inşalardaki önemli gelişme geçirimsizliği sağlayan

önceleri memba yüzünde kullanılan kohezyonlu malzemelerin gövde merkezinde kullanılmaya başlanması olmuştur [4]. 2019 yılı itibariyle sayıları tüm baraj tiplerinde dünya genelinde 58000 adet, ülkemizde ise 727 adet baraj bulunmaktadır [5] .



Şekil 2.1. Sadd-el Kafara Barajı (M.Ö. 2600) [4]

Baraj mühendisliğinde 20. yy. başlarına kadar bilimsel kurallardan çok sezgisel ve deneyime dayalı yöntemler izlenmiş olup zemin mekaniği ve inşaat tekniklerinin gelişmesiyle bilimsel kurallar geçerlilik kazanmıştır. Tasarımlarda esas olarak statik ve dinamik stabilite, yapım ve işletmedeki baraj deformasyonları ve baraj güvenliği konularına yoğunlaştırılmıştır [5].

Sonlu elemanlar methodunun gelişmesiyle dolgu malzemesinin lineer olmayan davranışının temsil edildiği gerilme- şekil değiştirme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu alandaki en geniş kapsamlı çalışma Duncan (1980) ve Seed (1979) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmaların paralelinde gerilme ve şekil değiştirme ölçüm ve takiplerinin yapıldığı ölçüm aletleri gelişmiştir. Ölçüm aletlerinin barajlarda kullanımının yaygınlaşmasıyla tüm barajlarda ölçüm aletleriyle çeşitli ölçümler alınarak değerlendirmeler yapılmaktadır [6].

2.3. Dolgu Barajların Deformasyon Davranışları

2.3.1. Deformasyon nedenleri

Statik yükler altında dolgu barajların deformasyonu; malzemenin hacimsel değişikliği, yatay yayılma veya temel ile dolgu malzemelerinde meydana gelen kayma şekil değiştirmesi kaynaklı olmaktadır. Hacimsel değişiklikler normal gerilmelerin artmasıyla malzemenin boşluk hacminin azalması ile oluşur. Bu deformasyonların meydana gelme hızı boşluk oranlarına ve sızıntı durumunun gelişme hızına bağlıdır.

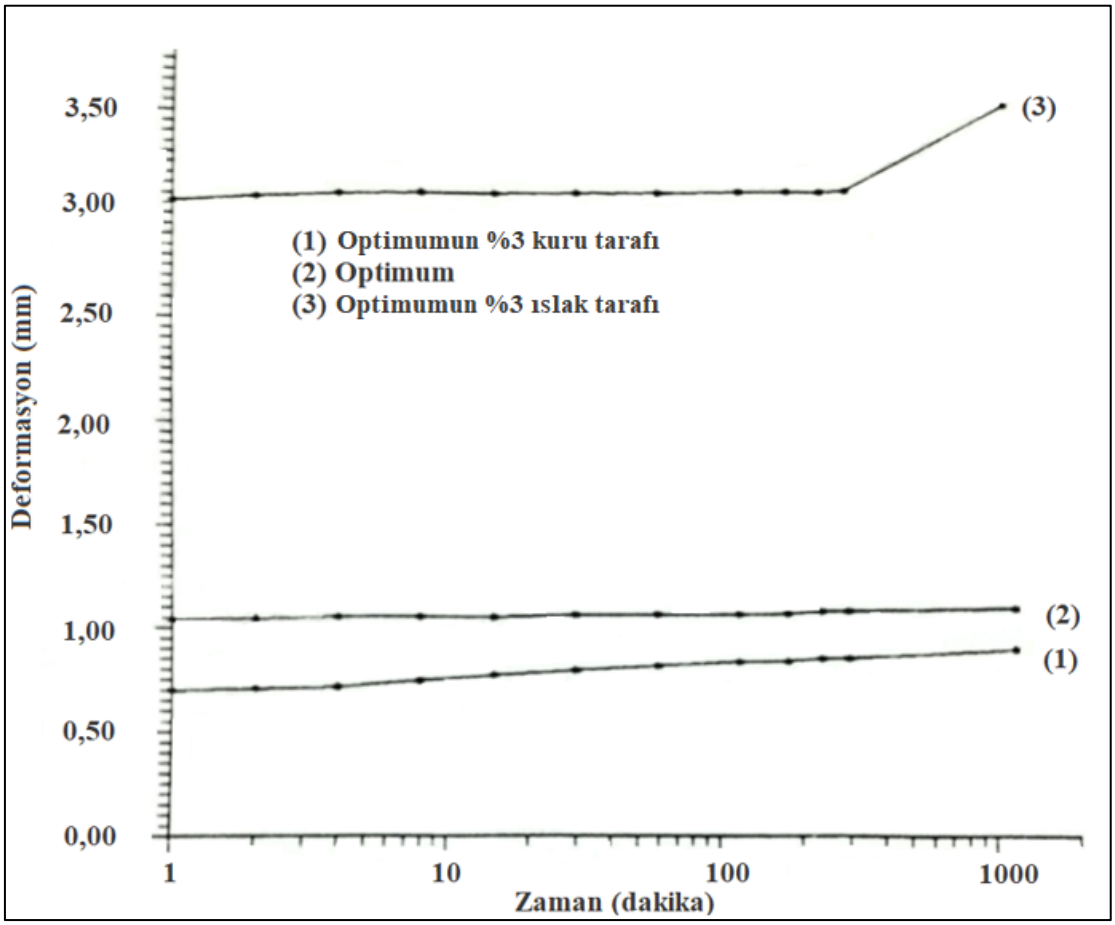
Deformasyonların büyüklükleri ve yönleri; temel ve dolgu malzemesi mekanik özellikleri, dolgu geometrisi, sıkıştırmada kullanılan ekipmanın özellikleri, rezervuar yükleme koşulları, temel ile dolgu zon farklılıkları ve dolgu tabakalarında oluşan gerilme farklılıkları tarafından kontrol edilmektedir [7].

Sıkıştırma su muhtevasının dolgu barajlardaki oturmalara etkisi

Deformasyonların büyüklükleri ve yönlerini kontrol eden dolgu malzemesi özelliklerinden biri sıkıştırılma su muhtevasıdır. Dolgu barajların inşasında dolgu malzemesinin sıkıştırma su muhtevası stabilite, permeabilite ve oturma miktarları açısından çok önemlidir. Baraj gölü arkasında su birikmeye başlamasından sonra dolgu suya doygun hale gelmekte ve bu bazı zemin tiplerinde ani oturmalara sebep olmaktadır. Mukavemetin optimum su miktarının kuru tarafından yaş tarafına doğru azaldığı düşey deformasyonlarında bu yönde arttığı belirtilmektedir [8, 9]. Ayrıca kohezyonlu zeminlerde zeminin suya doymasıyla düşük basınçlarda zeminde şişme veya az miktarda oturma, yüksek basınçlarda ise önemli oturmalar olduğu ifade edilmiştir [10].

Güler E. ve ark. (1993) sıkıştırma su muhtevasının dolgu barajlardaki oturmalara etkisini incelemiştir. Kaolin kili üzerinde gerçekleştirilen odeometre deneylerinde sıkıştırma su muhtevasının, optimum su muhtevasının %3 kuru tarafında, optimum su muhtevasında ve optimum su muhtevasının %3 ıslak tarafında olmasının deformasyonlar üzerindeki etkisi araştırmıştır. Meydana gelen deformasyonların miktarında, zeminin sıkıştırma suyunun çok önemli bir rol oynadığını belirtilmiştir. Optimum su muhtevasının ıslak tarafında sıkıştırılan numunede meydan gelen deformasyonun optimum su muhtevasında ve optimum su

muhtevasının kuru tarafında sıkıştırılan numunelerdeki deformasyonların yaklaşık 3 katı olduğu görülmüştür. Deformasyonların su muhtevalarına göre zamana bağlı değişimleri Şekil 2.2'de görülmektedir. Deformasyonları minimuma indirmek için sıkıştırma su muhtevasının optimum su muhtevasının kuru tarafında seçilmesi önerilmiştir [11].

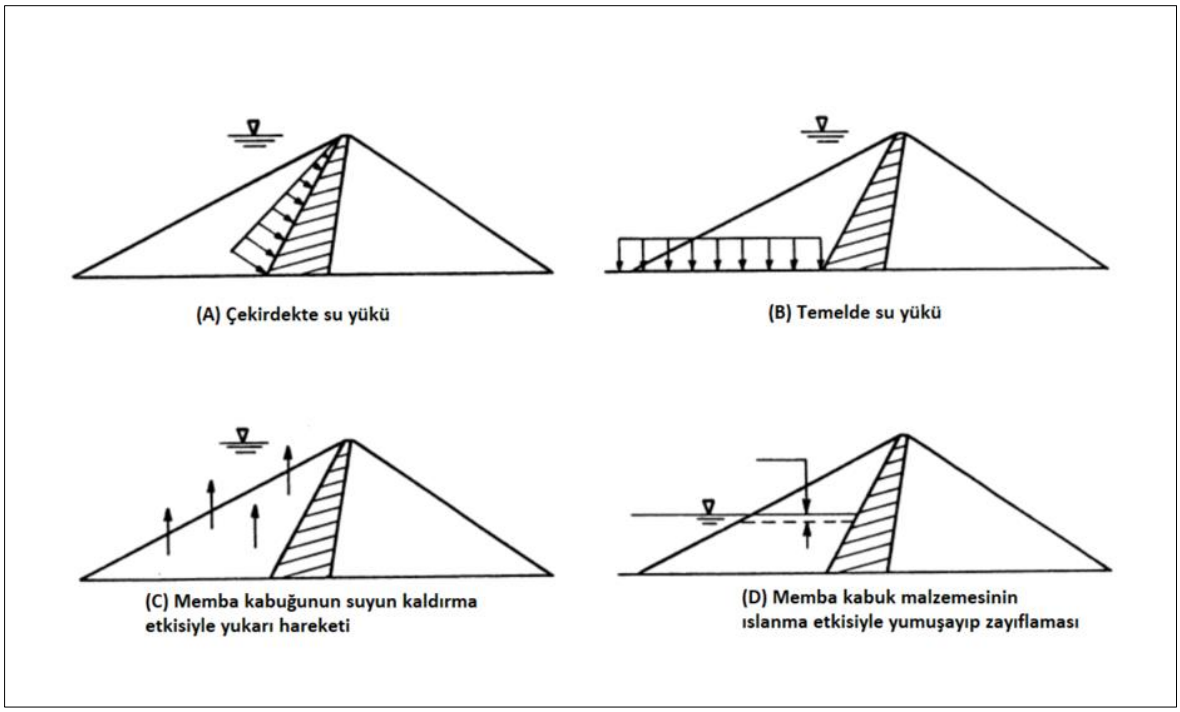


Şekil 2.2. Farklı su muhtevalarında deformasyonların zamana bağlı değişimi [11]

Bu laboratuvar deneyinde ayrıca barajın su dolmasıyla dolgunun doygun hale gelmesi durumu temsil edilmeye çalışılmıştır. Zaman içerisinde suya doygun hale gelecek olan dolguda ani oturmalar olabileceği belirtilmiştir. Kaolin kili için yapılan deneylerde ıslanma sonrası meydana gelen ilave deformasyonların toplam deformasyonların %10 u kadar olduğu görülmüştür. Buradan ıslanmadan dolayı meydana gelen oturmaların önemli mertebede olmadığı sonucuna varılmıştır [11].

Dolgu malzemesinin su ile etkileşiminin deformasyonlara etkisi

Dolgu barajlarda rezervuar seviyesinin yükselmesi sonucu gövde üzerine etkiyen su yükü, granüler malzemenin (kum, çakıl, kaya dolgu gibi) su ile etkileşime girmesi sonucunda dayanım, sıkışabilirlik ve gerilme - şekil değiştirme karakterlerinde değişime neden olmaktadır. Bunun sonucunda da baraj gövdesinde deformasyonlar meydana gelmektedir. Su seviyesinin yükselmesinin dört ayrı etkisi bulunmaktadır. Şekil 2.3a'da görüldüğü üzere çekirdek üzerine etkiyen su yükü ve Şekil 2.3b'de görüldüğü üzere memba tarafında temel üzerine etkiyen su yükü düşey deformasyonlara sebep olabilmektedir. Şekil 2.3c'de görüldüğü üzere memba tarafında kabuk elemanın suya doygun hale gelmesiyle oluşacak kaldırma kuvvetinin sebep olduğu yukarı yönlü deformasyonlar ve Şekil 2.3d'de görüldüğü üzere memba kaya dolgusunun ıslanmasıyla malzemenin yumuşaması ve zayıflamasından kaynaklanan dane ayrışmasıyla birlikte düşey deformasyonlar oluşabilmektedir [12]. Yüksek basınçlar altında kalan granüler malzemelerin dane dağılımı değişmekte buda memba dolgusunda kayma mukavemetinin azalmasına ve yer değiştirmelere yol açabilmektedir [13].



Şekil 2.3. Rezervuar dolumunun zonlu barajlardaki etkileri [12]

Marsal ve ark. (1967) Meksika'da bulunan El İnfiernillo barajında kaya dolgularda inşaat sonrası ve su tutma durumunda oturmaların önemli mertebelere çıkabileceği görmüştür.

Danelerin yüksek basınçlar ve su etkisi ile kırılması ve buna bağlı olarak denge durumunun sürekli değişmesinin deformasyonların sebebi olduğunu bildirmiştir [13].

Sıkışabilirliğin ve buna bağlı olarak geçirgenliğin izotropik olmaması oluşacak oturmaların, boşluk suyu basıncı ve oturma-zaman davranışlarının çok büyük farklılıklar göstermesine neden olurken, farklı zonlar arasındaki oturma farklılıkları büyük lokal gerilme yığılmalarına yol açabilmektedir [14].

Squire (1967) Cougar Barajı (135 m) rezervuarın doldurulması sırasında çekirdek ve mansap tarafında görülen hareketlerin ve krette oluşan enine çatlakların tamamen gerilme aktarılması olayı ile ilişkili olduğunu belirtmiş ve gerilme aktarımının baraj gövdesinde yer alan farklı zonların birbirlerine göre yer değiştirmeleri sonucunda ortaya çıktığını ileri sürmüştür [15].

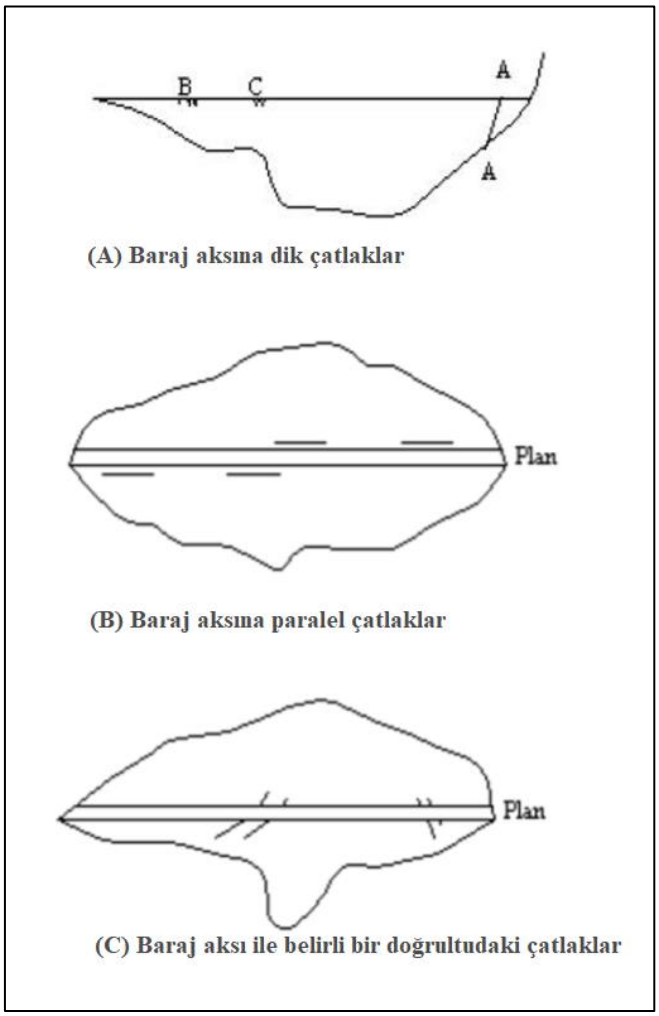
Penman ve ark. (1970) Scammonden Barajında kil çekirdeğin kaya dolguya göre daha fazla oturması ile oluşan kayma yer değiştirmelerinin büyük bir kısmının kil çekirdekten çok filtrelerde ve kaya dolguda olduğu gözlemlenmiştir. Kil çekirdekte oluşan yatay gerilmeler filtrede ve kaya dolguda lokal deformasyonlara neden olabilmekte, bu da kil çekirdeğin yatay yönde genişlemesi sonucunu doğurmaktadır [16].

Zonlu barajlarda çatlak sistemlerinin deformasyonlara etkisi

Toprak ve kaya dolgu barajlarda, çatlak sistemlerinin oluşumu ve yük transferi gövdede oluşacak gerilme ve deformasyonları dolayısıyla gövde davranışını kontrol etmektedir. Dolgu barajların çekirdeğinde meydana gelen çatlaklar Justo (1973) ve Thomas (1976) tarafından dört grupta sınıflandırılmıştır. Dolgu barajlardaki çatlak sistemleri Şekil 2.4'te verilmiştir.

Şekil 2.4a'da görülen enine ilk tip çatlak sistemi baraj eksenine dik doğrultuda ve baraj üst seviyelerinde rastlanır. Şekil 2.4b'de görülen ikinci tip çatlak sistemi çekirdek ile kaya dolgu arasında meydana gelen farklı düşey deformasyonlardan dolayı çekme çatlağı olarak çekirdeğin her iki tarafında ve geçiş bölgelerinde baraj eksenine paralel olarak oluşur. Şekil 2.4c'de görülen üçüncü tip çatlak sistemi baraj eksenine göre simetrik olmayan belirli bir açıyla oluşan çekme çatlaklarıdır. Şekil 2.4a'da A-A kesitinde görülen dördüncü tip çatlak

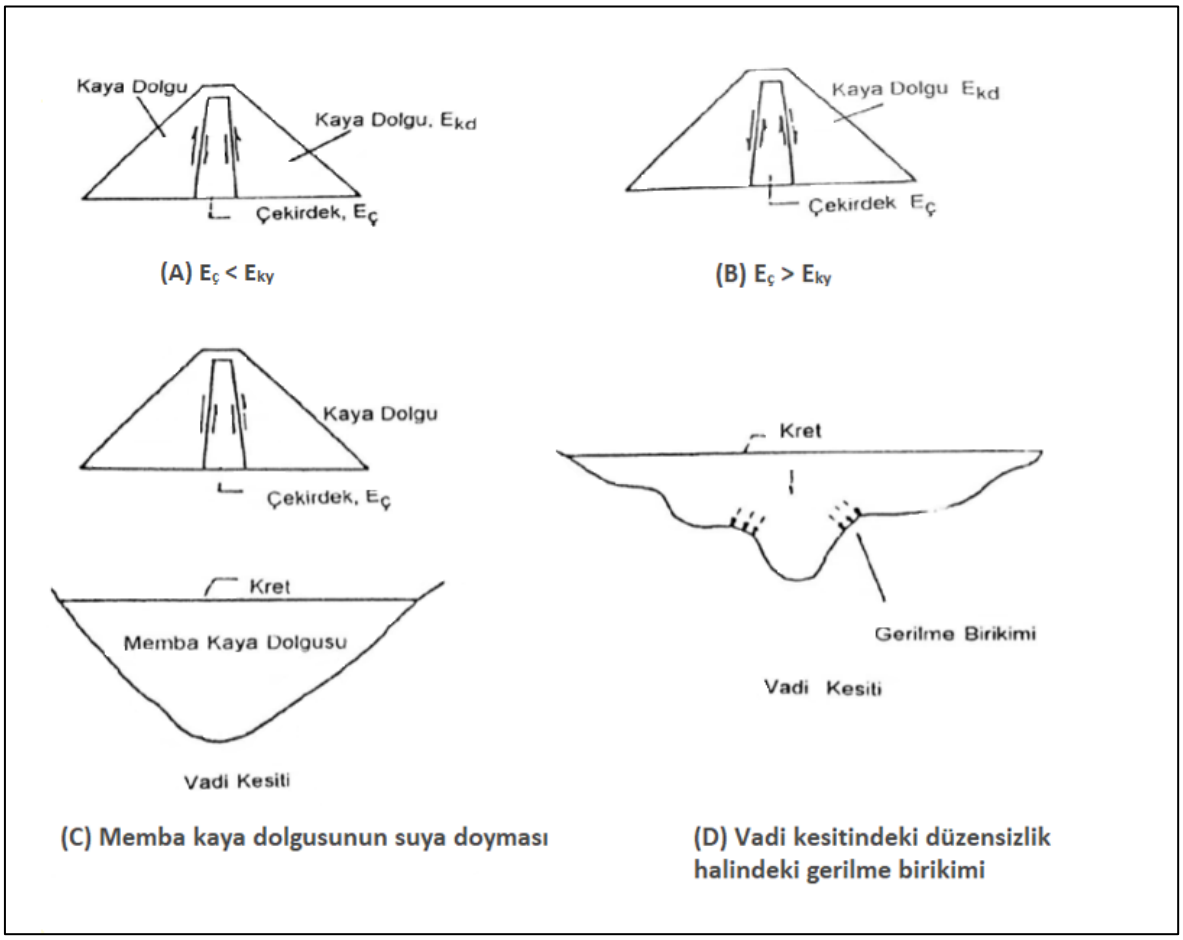
sistemi baraj ve kil çekirdeğin doygun hale gelmesiyle çekirdek ile kaya dolgu arasındaki farklı oturmalardan kaynaklanan gövdenin dayandığı dik yamaç üzerinde oluşan çekme çatlaklarıdır [17].



Şekil 2.4. Dolgu barajlardaki çatlak sistemleri [17]

Squire (1970) çekirdek ile kaya dolgu arasında oluşan deformasyonlar farklılıklarından dolayı gövde zonları arasında yük aktarımları meydana geleceğini belirtmiştir ve bu yük aktarımlarını özetlemiştir. Çekirdekte kaya dolguya göre daha fazla düşey deformasyon meydana gelirse Şekil 2.5a'da görüldüğü üzere yük çekirdekten kaya dolguya aktarılacaktır. Çekirdeğin katı kil olması durumunda Şekil 2.5b'de görüldüğü üzere kaya dolgu çekirdeğe göre daha çok düşey deformasyonlar gerçekleştireceğinden yük kaya dolgudan çekirdeğe aktarılacaktır. Baraj gölünün dolmasıyla beraber memba tarafındaki kaya dolgu suya doygun hale geleceğinden kil çekirdeğe nazaran daha fazla düşey deformasyon göstereceğinden Şekil 2.5c 'de görüldüğü üzere memba kaya dolgudan çekirdeğe yük aktarımı olacaktır. Vadi

tabanında meydana gelebilecek ani değişikliklerden dolayı kil çekirdekte diğer zonlara göre farklı düşey deformasyonlar meydana gelmesi durumunda çekirdek ile Şekil 2.5d'de görüldüğü üzere vadi tabanında gerilme yığılmaları oluşabilecektir [17].

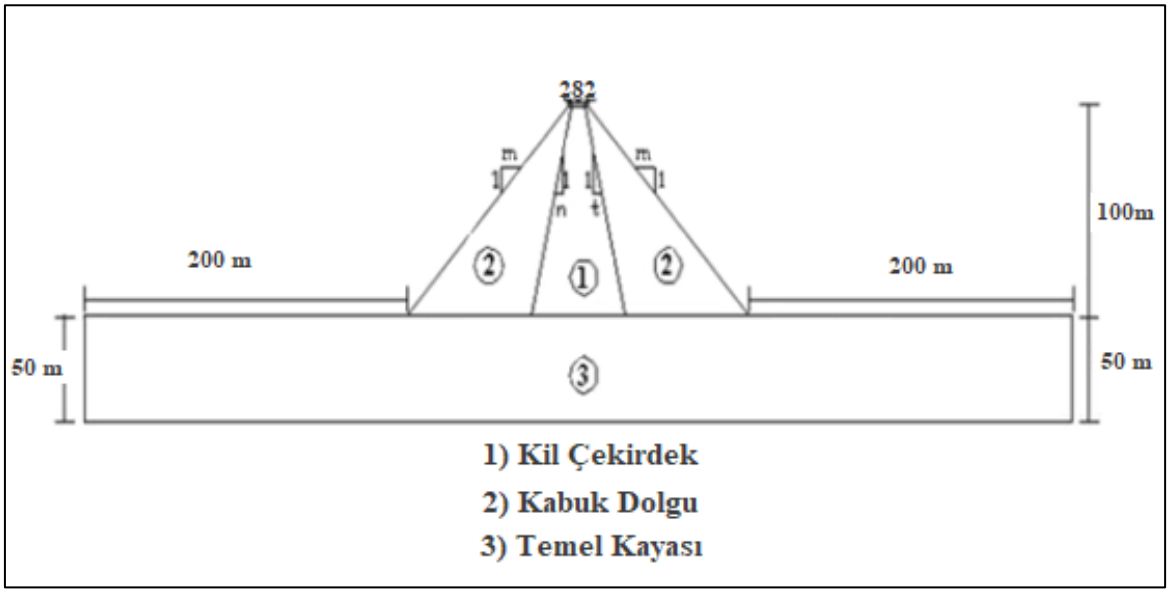


Şekil 2.5. Dolgu barajlarda değişik yük aktarımı şekilleri [17]

Dolgu barajlarda çekirdek ve kabuk şev eğimi değişiminin deformasyonlara etkisi

Emiroğlu ve ark. (2011) merkezi kil çekirdekli kaya dolgu bir barajda sonlu elemanlar methoduyla hem kil çekirdeğin ve hem de kaya dolgunun şev eğimlerini değiştirilerek gerilme-deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Baraj temelinin rijitlik modülü oldukça yüksek alınarak temelin etkisini minimize etmişlerdir. Analizlerde kullanılan gövde tipik enkesiti Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Gövde kil çekirdek eğimi sabit tutularak (n=t=0,25) kabuk dolgusu şevlerinin eğimleri (m değeri 1,8; 2,0; 2,5; 2,75 olarak) değiştirilmiş şev eğiminin artmasının gerilme dağılımı ve deformasyonlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Kabuk malzemesi şev eğimi sabit tutularak (m=2 iken) kil çekirdek malzemesi şev eğimleri (0,5; 0,4; 0,3; 0,2 olarak) değiştirilmiş şev eğiminin artmasının

gerilme dağılımı ve deformasyonlar üzerinde kil çekirdek eğiminin oldukça önemli bir yere sahip olduğunu göstermişlerdir [18].

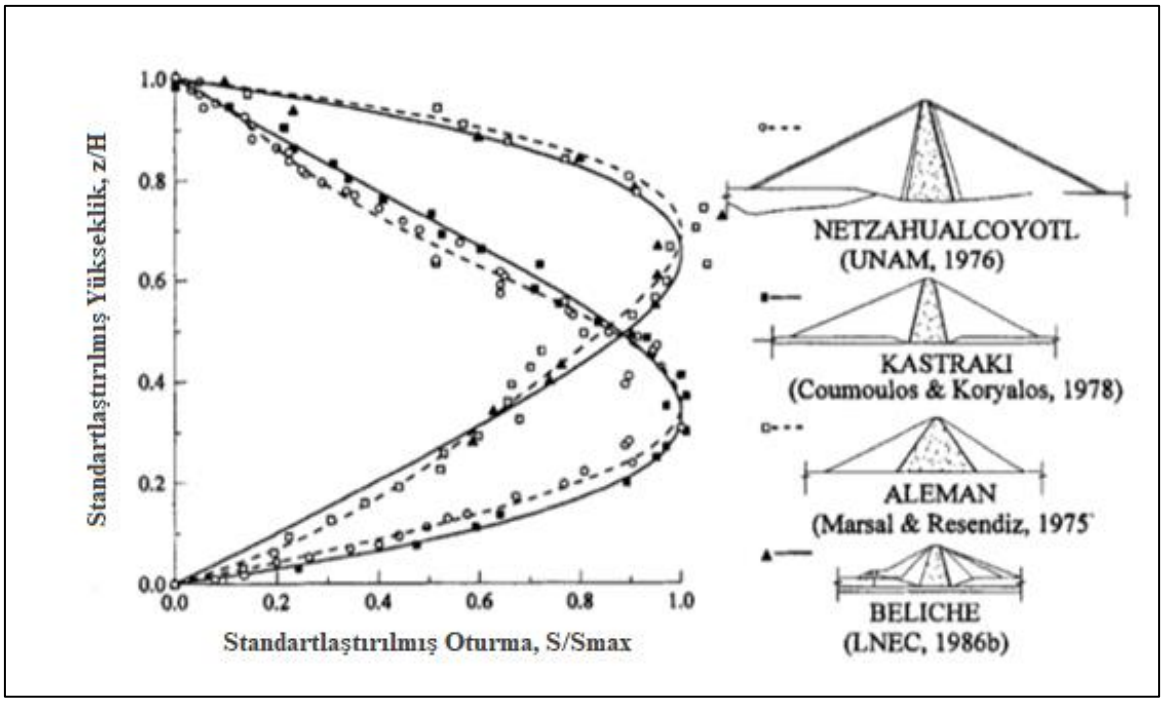


Şekil 2.6. Baraj tipik en kesit geometrisi [18]

2.4. Dolgu Barajların Deformasyon Karakteristikleri

Deformasyonların en önemli etkileri hava payının kaybolması, baraj üzerine kurulu tesislerin zarar görmesi, çökme görünümünün sebep olduğu güven kaybı, gövdenin çatlaması ve gövde içerisinde bulunan aletlerin zarar görmesidir. Çoğu durum için basit ampirik bir formülle düşey deformasyon hesabı yapılarak krette bırakılacak kamber payı tasarım sırasında hesaplanabilmektedir [19].

Dolgu barajlarda deformasyon karakteristiği olarak Marsal 1958'de belirli bir baraj yüksekliği (H) için gövde ortasında maksimuma ulaşan parabole yakın bir eğri önermiştir. Ancak böyle bir yaklaşım gövde zonlarının geometrik özellikleri, malzemeler arasındaki rijitlik farklılıklarının sebep olduğu yük transferlerinin her baraj özelinde farklı olması durumu gibi birçok etkiyi ihmal etmektedir. Nitekim Şekil 2.7'de görülen örneklerde olduğu gibi Marsal'ın teorik eğrisi ile tutarlı olmayan mevcut dolgunun ortasının altında veya üstünde maksimum deformasyonun elde edilebileceğini açıkça göstermektedir [20].



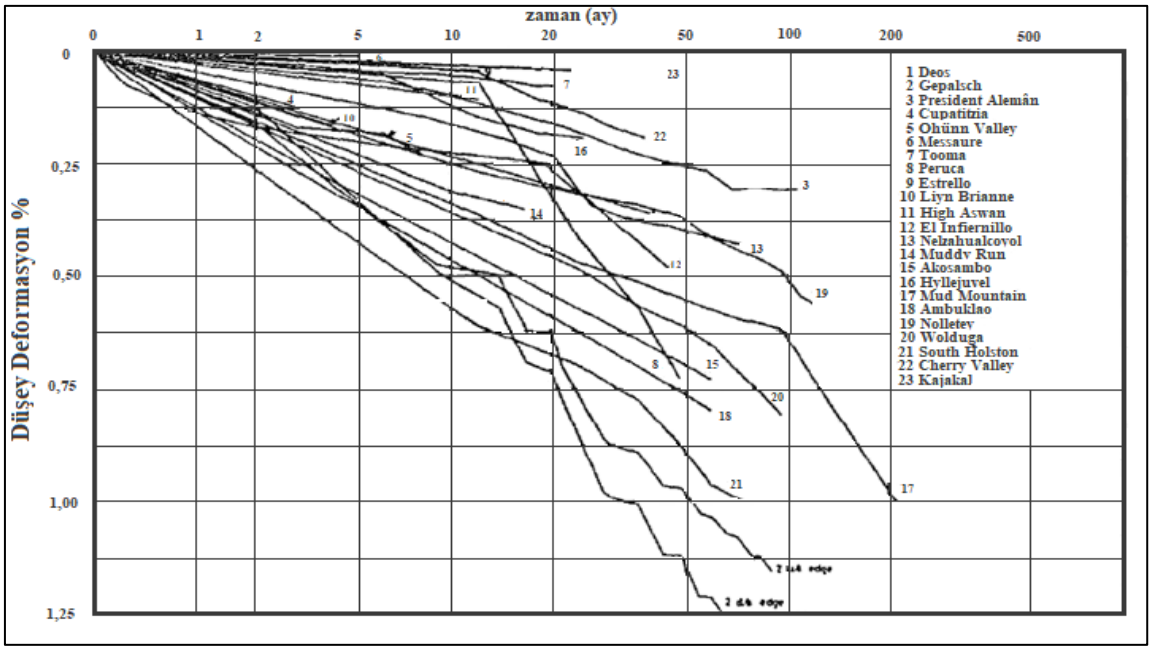
Şekil 2.7. Dolgu barajlarda inşaat sonrası düşey deformasyon örnekleri

İnşaat sonrası maksimum oturma gövde yüksekliğinin yaklaşık %2'si büyüklüğünde ve maksimum oturmanın yeri ise gövde yüksekliğinin 0,3'i ile 0,7'si arasında yükseklikte meydana gelmektedir [7].

Clement ve ark. (1984) 68 adet kaya dolgu barajın inşaat sonu deformasyon davranışını incelemiştir. Merkez çekirdekli kaya dolgu barajların düşey deformasyonlarının zamana göre değişimini Şekil 2.8'de görüldüğü üzere özetlemişlerdir. Lawton ve Lester (1964) birçok kaya dolgu barajın düşey deformasyon davranışını incelemiş ve barajların düşey deformasyon davranışlarını açıklamak amacıyla "Eş. 2.1"'i önermiştir. Burada S düşey deformasyon (m), H barajın yüksekliği (m) dir.

$$S=0{,}001H^{\frac{3}{2}} \qquad (2.1)$$

Hunter ve Fell (2003) literatürde bulunan dolgu barajlarda inşaat sonrası meydana gelen düşey deformasyon miktarlarına ait araştırmaları Çizelge 2.1'de görülen bir çalışma altında toplamıştır [21].

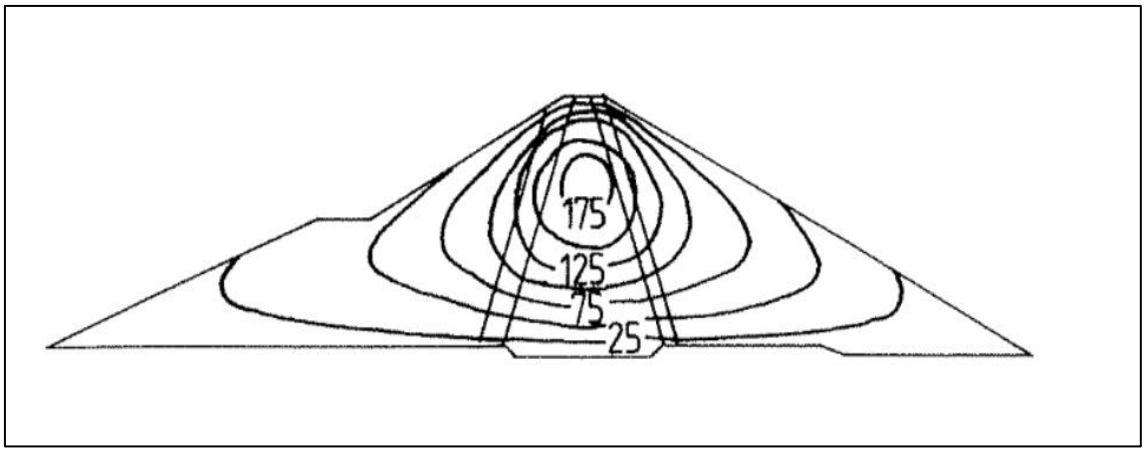


Şekil 2.8. Merkez çekirdekli barajlarda oturma miktarı

Çizelge 2.1. İnşaat sonrası gövde yüksekliğine bağlı deformasyon miktarları

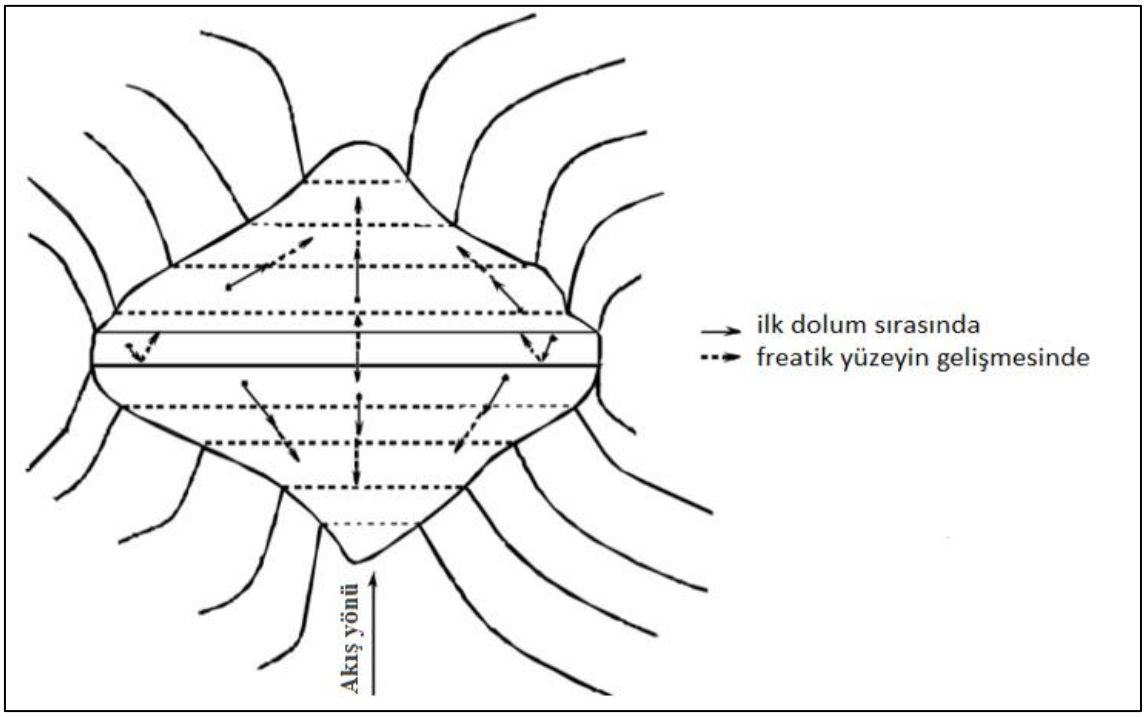
Referanslar	Baraj tipi	Deformasyon Parametresi	Baraj Yüksekliğine göre % Deformasyon Oranı
ICOLD (1993)	Kaya Dolgu	Kret oturması Kret deplasmanı Yamaç oturması	%0,2 ile %1 arası %0,1 ile %0,5 arası %0,1 ile %0,2 arası
Sowers ve ark. (1965)	Kaya Dolgu	Kret oturması	%0,25 ile %1 arası
Clements (1984)	CFRD	Kret oturması Kret deplasmanı	%2,5 tan fazla (dökme kaya dolgularda) 0 ile %0,25 arası (sıkıştırılan kaya dolgu) 0 ile %2,5 arası
	CCER	Kret oturması Kret deplasmanı	%0,05 ile %1,25 %-0,75 ile %0,5
	Eğik çekirdekli	Kret oturması Kret deplasmanı	%0,06 ile %1,1 0 ile 0,6
Bernell (1958)	CCER	Kret oturması ilk dolum sırasında	0 %0,2 (siltli kumlu moren) 0,05 ile 0,3 (killi moren)
Dascal (1987)	Kaya dolgu baraj	Kret oturması Mansap yamaç oturması Kret deplasmanı	< %0,35 (sıkıştırılmış kaya dolgu) %0,3 ile %0,55 (dökme kaya dolgu) %0,7 ile %0,8 den fazla ≥ Sıkıştırılmış kaya dolgu kret oturması < Dökme kaya dolgu kret oturması
Sherard ve ark. (1963)	Kaya dolgu	Kret oturması	%0,1 ile %0,4
	İyi inşa edilmiş kaya dolgu	İlk dolumda kret deplasmanı	< 25 ile 50 mm
Gould (1954)	Silindirle sıkıştırılmış toprak dolgu baraj	Kret oturması	< %0,2 ilk 3 yıl içinde < %0,4ten 14 yıldan sonra

Kutzner (1988) en çok düşey deformasyonun çekirdek bölgesinde oluştuğunu kil çekirdek kaya dolgu tipinde 72 m yüksekliğindeki Kinda barajının düşey deformasyon davranışını inceleyerek değerlendirmiştir. Düşey deformasyonların kil çekirdekte 180 cm kabuk elemanda ise 100 cm ile 125 cm arasında değiştiğini görmüştür. Şekil 2.9'da Kinda Barajı'nın düşey deformasyon davranışı görülmektedir [5].



Şekil 2.9. Kinda Barajının inşaat sonu düşey deformasyon davranışı [5]

Dolgu barajlarda yatay deformasyon davranış karakteri ise inşaat sonu durumunda membaya yüzeyinde memba tarafına doğru, krette ilk dolum sırasında membaya doğru, rezervuarın dolup suyun gövde içerisinde ilerlemesi durumunda mansaba doğrudur. Şekil 2.10'da dolgu barajlarda yatay deformasyon karakteristikleri gösterilmektedir [19].



Şekil 2.10. Dolgu barajlarda genel yatay deformasyon davranış karakteristiği [19]

Yatay deformasyonların inşaat sonrasında gelişmesinin sebebi malzemenin yeni gerilme dağılımına uyum sağlama çalışması, düşey deformasyonların inşaat sonrası gelişmesinin sebebi ise malzeme içerisindeki fazla boşluk basıncının kaybolmasıdır [19].

2.5. Dolgu Barajlarda Kemerlenme Etkisi

Bir dolgu barajın stabilitesi tüm koşullar altındaki dayanım gerilmeleri ve çekirdeğin bütünlüğüne bağlıdır. Kemerlenme hareketi kaya dolgu kil çekirdek barajlarda çekirdeğin bütünlüğünü etkileyecek bir olgudur. Merkezi kil çekirdek barajlarda kil çekirdek ile kabuk malzemesi arasındaki dayanım farklılığından dolayı aralarında farklı oturma meydana gelmektedir. Bu farklı oturmadan kaynaklı olarak çekirdekten kabuğa yük transferi olmaktadır. Çekirdekte meydana gelen dikey ve yatay gerilmelerin yol açtığı yatay çatlaklar mühendislik literatüründe kemerlenme olarak adlandırılmaktadır.

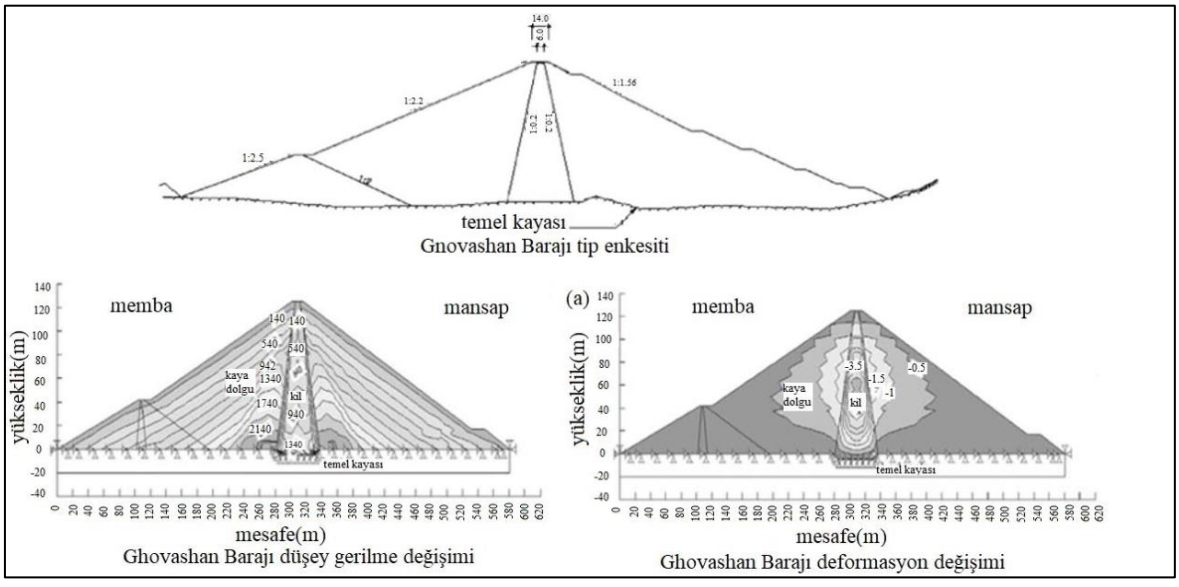
Bu kemerlenme çatlaklarından akışa geçen su çekirdek içerisinde efektif gerilmelerin azalmasına neden olmakta bu iki etkinin birleşmesi ise hidrolik kırılmaya neden olabilmektedir [22].

Kemerlenme etkisi kemerlenme katsayısıyla temsil edilmektedir. "Eş. 2.2" ile kemerlenme katsayısı verilmiştir. Burada R_L: kemerlenme katsayısı, σ_v:düşey gerilme, γH: çekirdeğin H derinliğinde oluşması beklenen örtü yüküdür. Kemerlenme katsayısı birden küçük ise kemerlenme hadisesi gerçekleşir [23].

$$R_L = \frac{\sigma_v}{\gamma H} \tag{2.2}$$

Naylor ve ark. (1996) Portekiz'in güneyinde bulunan Beliche Barajı'nın gerilme ve deformasyon analizlerini sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirmiştir. Naylor ve ark. (1996) Beliche Barajı gövdesinde çekirdek ile kabuk malzemenin arasında bulunan dayanım farklılığına bağlı olarak kemerlenme etkisiyle farklı oturmaların olduğunu belirtmiştir [24].

Nayebzade ve Mohommadi (2011) Ghovashan Barajı üzerinde kemerlenme etkisini 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 kaynaklı olduğu belirtmiştir. Şekil 2.11'de Ghovashan Barajı enkesiti, düşey gerilme ve düşey deformasyon değişimi görülmektedir [25].

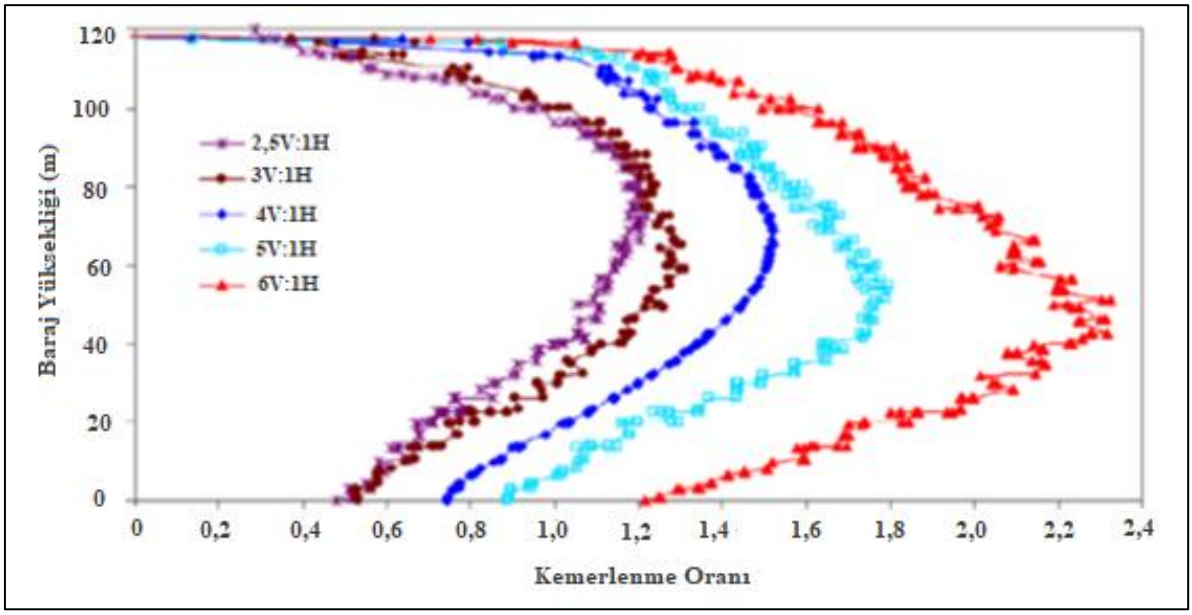


Şekil 2.11. Ghovashan Barajı enkesiti, düşey gerilme ve düşey deformasyon değişimi [25]

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.

Gafari ve ark. Chenareh Barajı üzerinde kemerlenme olayını araştırmış ve kemerlenmeden dolayı barajın kretinde deformasyon bulunmadığını bunun çekirdek malzemesinin kabuk malzemesi tarafından sınırlandırıldığı için serbestçe deformasyon gösteremediğinden kaynaklandığını gözlemlemiştirler [26].

Kemerlenme etkisini azaltmak için geçiş malzemeleri seçiminde daha yumuşak malzeme kullanılması, baraj gövdesinin çekirdek eğiminin daha yatık olmasında fayda olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 2.12'de farklı çekirdek eğimlerinde kemerlenme oranının değişimi görülmektedir [26].



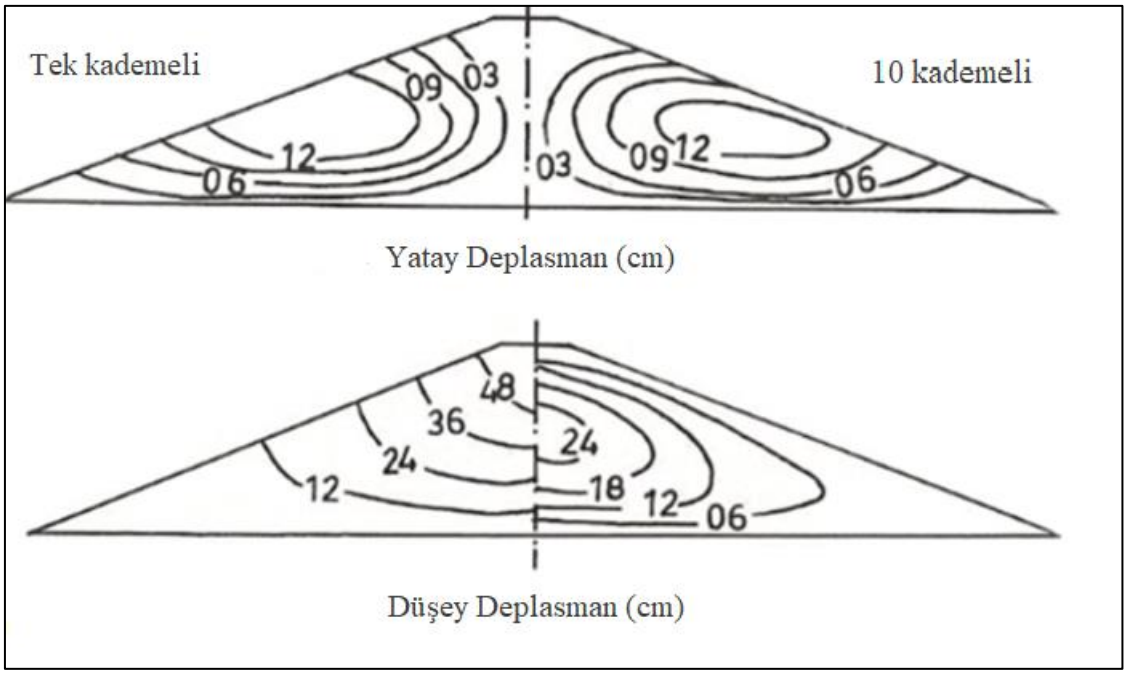
Şekil 2.12. Farklı çekirdek eğimlerinde kemerlenme oranının değişimi [26]

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE DOLGU BARAJLARIN İNCELENMESİ

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ilk olarak 1940'lı yıllarda sayısal metodların geliştirilmesi ile birlikte Richard Courant tarafından sürekli bir sistemi üçgen elemanlara ayıran bir analiz yöntemi olarak tanıtılmıştır. Karmaşık mühendislik problemlerini basite indirgeyerek kontrol edilebilir parçalarla çözümünü sağlayan sonlu elemanlar methodunun dolgu barajlar için yapılan gerilme ve deformasyon analizlerinde etkili çözüm sağladığı 1970'li yılların başından beri yaygın kullanımıyla birlikte birçok kez kanıtlanmıştır [27] .

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), geoteknik mühendisliğinde ilk kez Clough ve ark. tarafından 1967 yılında 30.5 m yüksekliğinde toprak dolgu bir barajın kademeli inşa koşullarındaki gerilme ve deformasyon özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Clough ve ark. tek aşamalı analizler ile kademeli inşa koşullarına bağlı yapılan analizlerden elde edilen deformasyon sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Clough ve ark. (1967) çalışmalarında düzlem gerinim prensibi kullanmış elastik modülü E ve Poisson oranını sabit almışlardır. Analizlerinde temeli rijit kabul etmişlerdir. Gövde modellinde tek kademeli ve 3 m yüksekliğe sahip 10 kademeli analizler yaparak sonuçları değerlendirmiştir. Tek kademeli ve 10 kademeli analiz sonuçları karşılaştırıldığında gerilmeler ve yatay deformasyonlarda çok küçük değişiklikler olduğunu düşey deformasyonlarda ise ciddi farklar olduğunu tespit etmiştir. Tek kademeli analizlerde en fazla düşey deformasyonun krette, gerçek inşa koşullarını temsil eden 10 kademeli analizlerde ise en fazla düşey deformasyonun baraj gövdesinin ortasında gerçekleştiği krette ise çok küçük oturmaların oluştuğu sonucuna varmıştır. Şekil 3.1'de Clough ve ark. (1967) analizlerinde kullandığı standart bir barajın tek ve 10 kademeli analizlerine göre deformasyonları görülmektedir [28].



Şekil 3.1. Standart bir barajın tek kademeli ve 10 kademeli deformasyon analiz sonuçları [28]

3.1. Malzeme Modelleri

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde en önemli husus dolgu malzemesini ve temel zemini özelliklerinin gerçekteki davranışına yakın temsil edilmesidir. Zemin lineer olmayan, süreksiz, anizotropik ve zamana ve gerilmeye bağımlı davranış sergileyen karmaşık bir malzemedir. Zeminler genellikle drenaj, jeolojik tarihçe, ön yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme koşullarında farklı davranış sergilerler. Bu farklı zemin davranışlarını farklı matematik modelleriyle temsil etmek için zemin modelleri geliştirilmiştir. Çizelge 3.1'de malzeme modelleri gruplanmıştır [29]. Bu modellerle zeminlerin gerilme – şekil değiştirme davranışları tanımlanır.

Çizelge 3.1. Zemin bünye modelleri [29]

Zemin Bünye Modelleri	
Lineer elastik model	
Mohr – Coulomb Modeli	
Hiperbolik zemin modeli	-Koedner (1963) -Duncan – Chang (1970) -Sertleşen zemin modeli-(Schanz, 1996)
Cam Kili Zemin Modeli	-Cam clay -Modifiye cam clay -Yumuşak zemin modeli
ve diğerleri	-Lade (1977) -Sekiguchi- Ohda (1977), vs

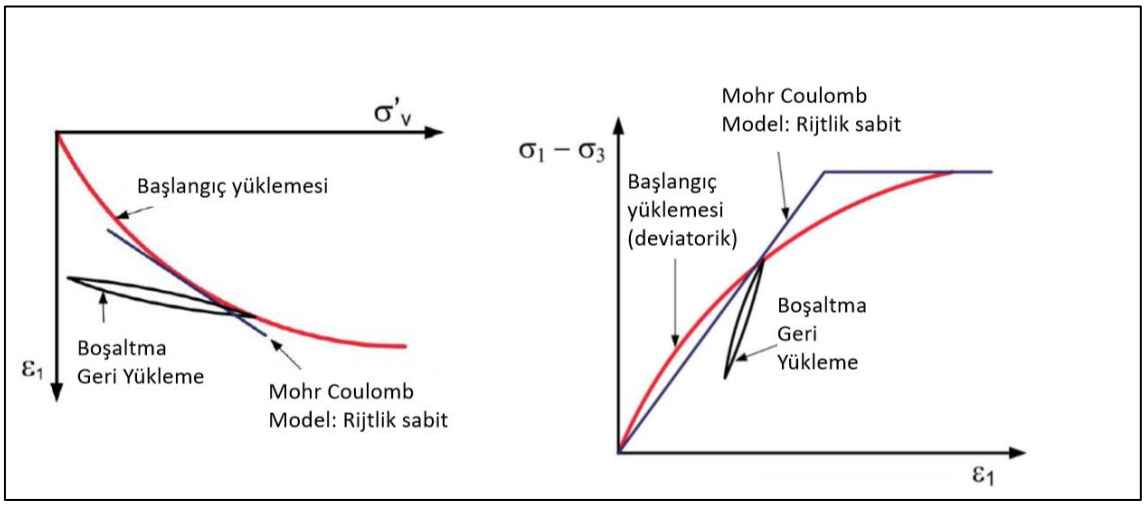
3.1.1. Lineer elastik malzeme modeli

Hooke kanunlarının temelini oluşturan elastisite modülü E ve poison oranı υ tarafından temsil edilen en genel malzeme modelidir. Bu modelin zemin davranışını temsil etmede yetersiz kalmaktadır. Zeminler lineer olmayan, yük altında elasto-plastik davranış sergileyen malzemelerdir. Zeminlerin lineer olmayan davranışını sergileyemediği gibi malzemenin gerilme durumunu kısıtlamadığından sonsuz rijit davranmasına sebep olur. Bu model genellikle zemin beton etkileşimi problemlerinde kullanılır [30].

3.1.2. Mohr –Coulomb malzeme modeli

Zeminlerin elasto- plastik davranışını temsil eden ilk malzeme modeli olan Mohr – Coulomb malzeme modeli en sık kullanılan malzeme modelidir. Gerilme - şekil değiştirme eğrisinin ilk kısmı elastik, ikinci kısmının mükemmel plastik olduğu esasına dayanır. Mohr – Coulomb zemin modeli gerilme – şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.2'de verilmiştir. Gerilme – şekil değiştirme davranışını elastik davranış sınırına kadar Hooke kanunu ile (E ve υ

tarafından) kontrol edilmektedir. Yenilme kriteri içsel sürtünme açısı, kohezyon parametreleri ve akma dayanımı kurallarını tanımlayan dilatasyon açısı parametreleri ile tanımlanır.

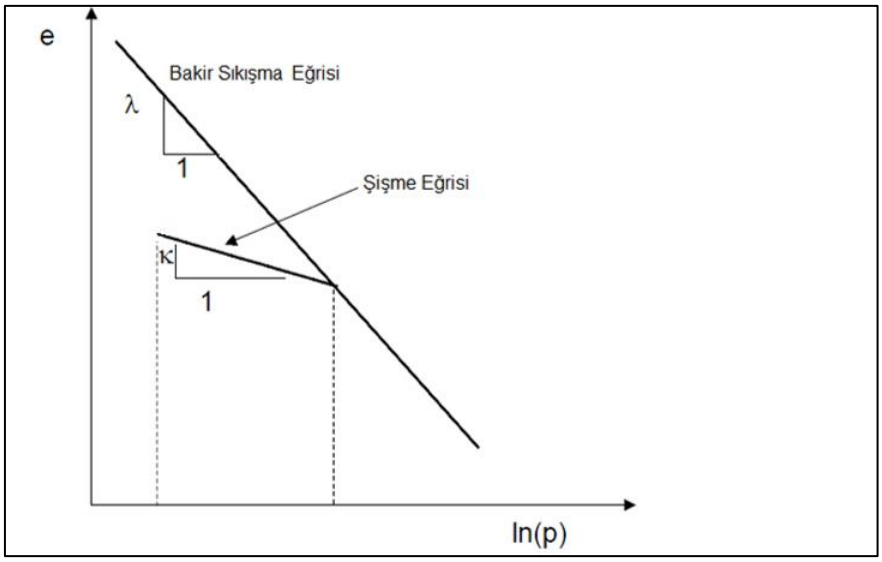


Şekil 3.2. Mohr – Coulomb malzeme modeli gerilme şekil değiştirme eğrisi [30]

Bu modelde zemin katmanlarının rijitliklerinin derinlikle değişmediği kabul edilip ortalama bir rijitik parametresi kullanılır. Bu nedenle bu modelle yapılan deformasyon analizleri değerleri gerçekçi değildir. Problemlerin ilk analizlerinde hızlı ve tahmini sonuçlar almak için kullanılması tavsiye edilir [30].

3.1.3. Modifiye Cam Clay malzeme modeli

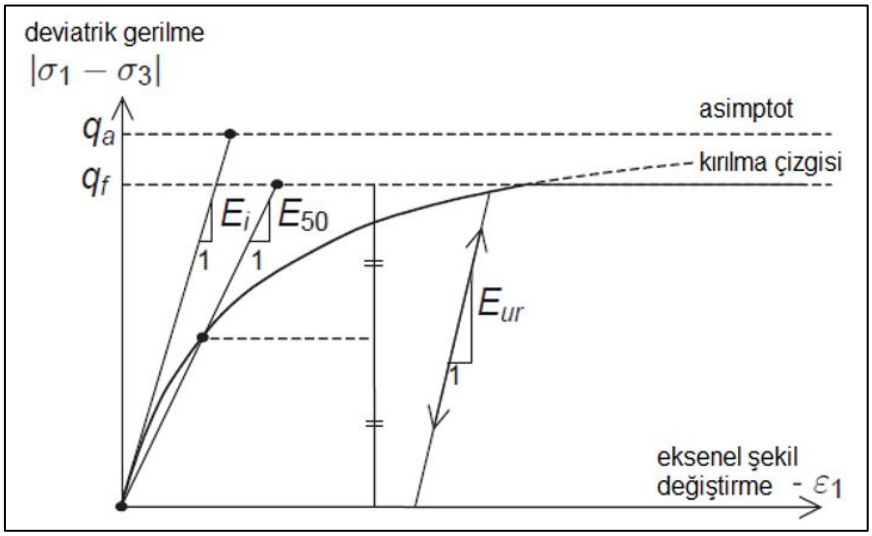
Modifiye cam clay modelinin temeli 1960'lı yıllarda Scofield ve Wroth tarafından atılmıştır. Malzemelerin gerilme - şekil değiştirme eğrisindeki plastik tarafın matametiksel olarak modellenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Yumuşak kil davranışını tanımlamak için kritik durum teorisi çerçevesinde geliştirilmiştir. Kritik durumu gösteren izotropik sıkışma eğrisinde ortalama efektif gerilme (p') ve boşluk oranı (e) arasındaki logaritmik ilişkiyi göz önüne alarak zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışını modellemektedir. Şekil 3.3'te Konsolidasyon karakterinin e - ln (p) diyagramında gösterimi verilmektedir [30].



Şekil 3.3. Konsolidasyon karakterinin e - ln (p) diyagramında gösterimi [30]

3.1.4. Pekleşen zemin modeli

Gerilme şekil değiştirme eğrisini yaklaşık hiperbol olarak tanımlayan Duncan – Chang tarafından geliştirilen hiperbolik zemin modelinin yeni bir uygulamasıdır. Bu model elastisite teorisi yerine plastisite teorisini esas alır. Gerilmeye bağımlı rijitik değeri dikkate alınmakta artan basınçla birlikte tüm rijitliklerin arttığı kabul edilmektedir [31]. Bu modelde kohezyon, içsel sürtünme açısı, poison oranı, diltasyon açısı gibi plastik parametrelerin yanı sıra ilk yükleme için gerilme bağımlı rijitlik modülü E_{50} ve üç eksenli deney parametresi E_{ur} kullanılır. Şekil 3.4'te hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [30]

3.1.5. Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli

Duncan ve Chang hiperbolik malzeme modeli zeminlerin doğrusal olmayan, gerilme bağımlı ve elastik olmayan davranışının temsil edilmesi amacıyla sonlu elemanlar analizlerinde kullanmak üzere geliştirilmiştir [32].

Hiperbolik modelden ilk kez Kondner (1963) bahsetmiş, model daha sonra Duncan ve Chang (1970) tarafından geliştirilmiştir. Model üç eksenli basınç deneyinde gözlenen eksenel deviatör 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.

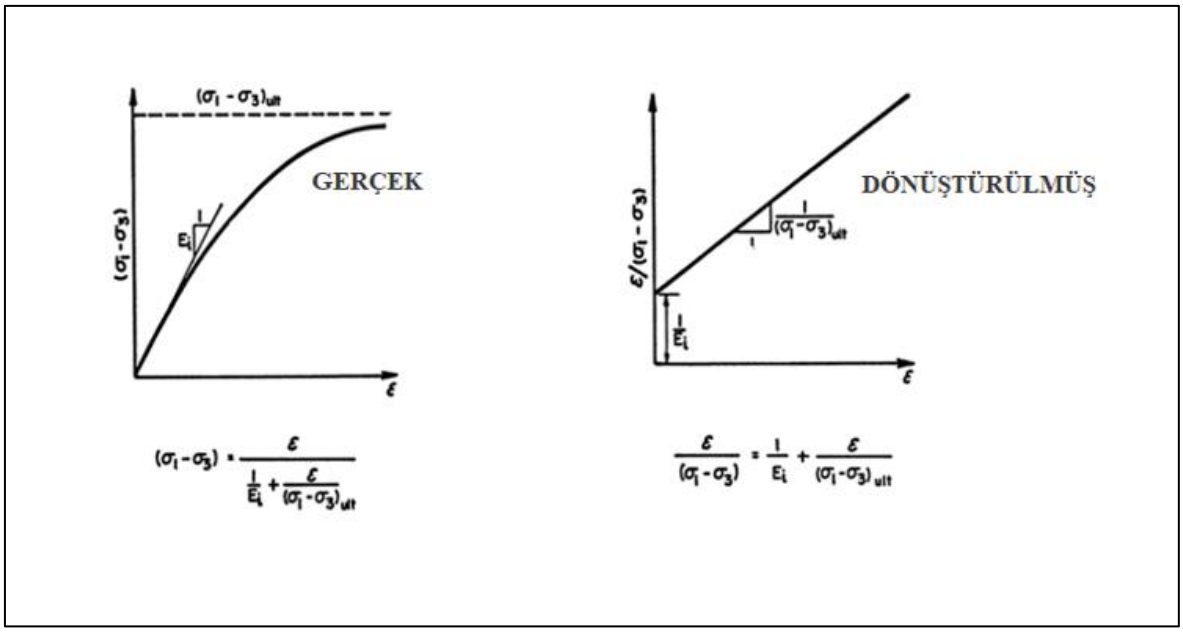
Gerilme –şekil değiştirme eğrisinin hiperbol tarafından temsil edilmesi (lineer olmayan davranış)

Kondner ve ark. (1963) birçok zeminde gerilme - şekil değiştirme eğrisinin Şekil 3.5'te gösterilen hiperbolle temsil edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Hiperbole ait denklem "Eş. 3.1" ile gösterilmiştir.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}} \qquad (3.1)$$

Burada (σ_1-σ_3): Deviatör gerilme, E_i: Elastisite modülü ve ε: 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. 3.2"' ile ifade edilirse ε /(σ_1-σ_3) ve ε arasındaki ilişki lineer olarak temsil edilmiş olur:

$$\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \qquad (3.2)$$



Şekil 3.5. Gerilme - şekil değiştirme eğrisinin hiperbolle temsil edilmesi [32]

Bu hiperbolün kullanımı kolaylaştıracak iki önemli özelliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki, hiperbolü temsil eden değerlerin fiziksel parametrelerden (E_i ve $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$) oluşmasıdır. İkincisi ise gerilme - şekil değiştirme eğrisinde verilen E_i ve $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ değerinin kolayca belirlenebilir olmasıdır. Eğer hiperbolik eşitlik Şekil 3.5'te alttaki hale dönüştürülürse $\varepsilon/\sigma_1-\sigma_3$ ve ε arasındaki ilişkiyi lineer olarak temsil edilir. Gerilme – şekil değiştirme eğrisinde en uygun hiperbolün belirlenmesi için $\varepsilon/\sigma_1-\sigma_3$ nin değeri üç eksenli test sonuçlarından hesaplanarak grafikte karşısına ε değerleri getirilerek dönüştürülmüş grafik çizilir.

Üç eksenli basınç testlerinden gelen verilerle dönüştürülmüş grafik çizildiğinde noktalar genellikle ideal lineer ilişkiden sapmaktadır. Örneğin sıkı kum örneğinde genellikle grafik yumuşak eğrilikte yükselen içbükey şekilde, gevşek kum örneğinde grafik yumuşak eğimli aşağı doğru içbükeydir.

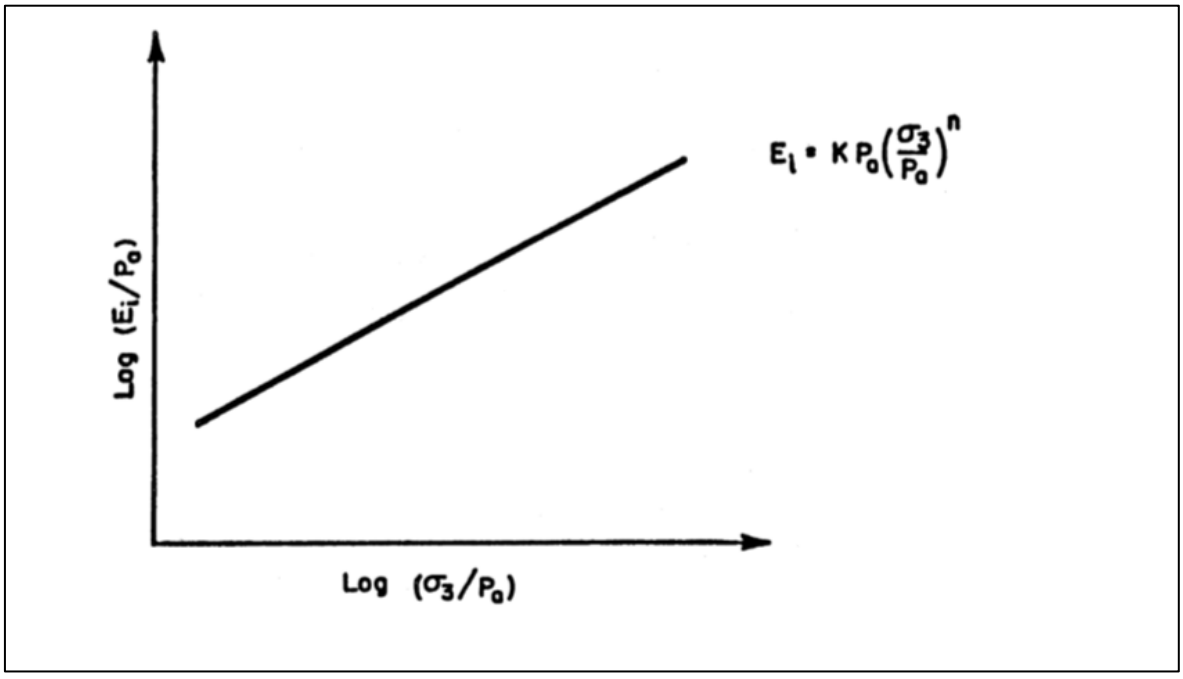
Yüzlerce farklı zeminde gerilme – şekil değiştirme eğrilerinden deneyimle en iyi eşleşme %70 ve %95 dayanıma karşılık gelen noktalardan geçirilen doğru ile elde edildiğini göstermiştir. Pratikte gerilme – şekil değiştirme eğrisi için yalnız iki nokta ile (%70 ve %95 dayanım) dönüştürülmüş diyagrama çizdirilir.

Gerilme bağımlı gerilme - şekil değiştirme ilişkisinin çevre basınçla birlikte değişen E_i ve $(\sigma1-\sigma3)_{ult}$ tarafından temsil edilmesi (gerilme bağımlı davranış)

Doygun zeminler hariç tüm zeminlerde konsolidasyonsuz- drenajsız koşullar altında yapılan tüm testlerde çevre basınçtaki 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 σ_3 arasındaki bağıntıyı Jambu (1963) "Eş.3.3" ile açıklamıştır. Burada K: Modül sayısı, n: Modül üssü, σ_3: Çevre basıncı ve P_a: Atmosfer basıncıdır. Şekil 3.6 ile tanjant modülünün çevre basıncıyla değişimi görülmektedir.

$$E_i = K\,P_a\,(\frac{\sigma_3}{P_a})^n \qquad (3.3)$$



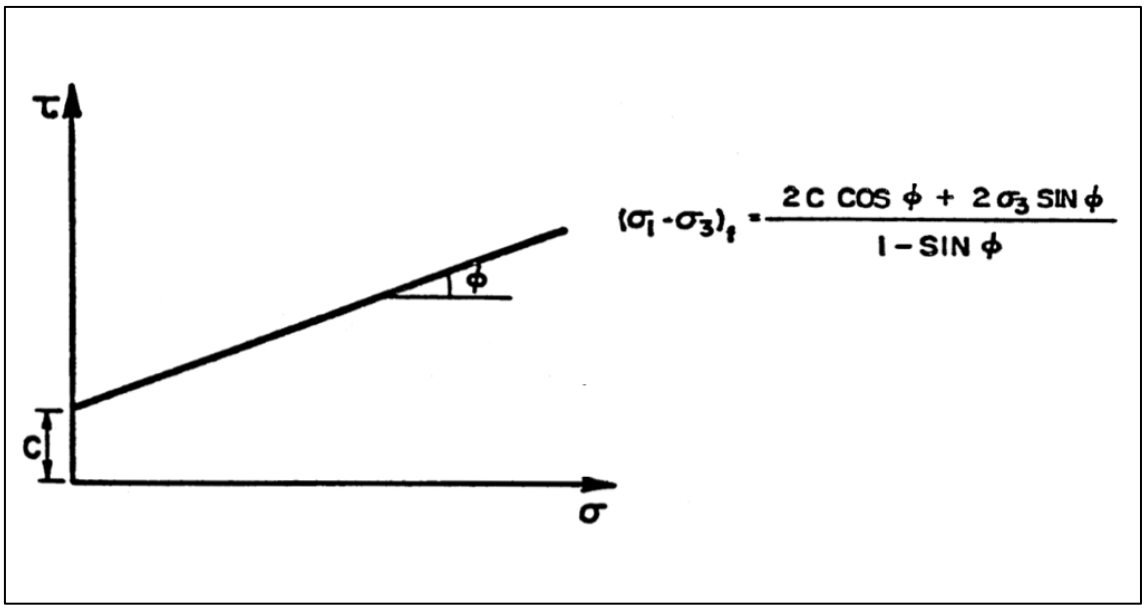
Şekil 3.6. Çevre basıncı ile birlikte başlangıç tanjant modülünün değişimi [32]

σ_3 ile $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ değerindeki değişim Şekil 3.7 ile açıklanmaktadır. Burada deviatör gerilmenin nihai değeri $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ ile göçme anındaki değeri $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ arasındaki ilişki aşağıdaki "Eş. 3.4" ile tanımlanmıştır.

$$(\sigma_1\text{-}\sigma_3)_f = R_f\,(\sigma_1\text{-}\sigma_3)_{ult} \tag{3.4}$$

Bu eşitlikte R_f: göçme oranıdır. $(\sigma_1\text{-}\sigma_3)_f$ daima $(\sigma_1\text{-}\sigma_3)_{ult}$ den küçüktür. R_f daima 0,5 ile 0,9 arasında değişmektedir. σ_3 ile $(\sigma_1\text{-}\sigma_3)_f$ değerinin değişimi bilinen Mohr-Coulomb dayanım ilişkisiyle temsil edilir. "Eş.3.5" σ_3 ile $(\sigma_1\text{-}\sigma_3)_f$ değerinin değişimi bilinen Mohr-Coulomb dayanım ilişkisiyle temsil edilmesi göstermektedir. c: kohezyon, ∅: içsel sürtünme açısıdır. Şekil 3.7'de çevre basınç - dayanım ilişkisi gösterilmektedir.

$$(\sigma_1\text{-}\sigma_3)_f = \frac{2c\cos\emptyset + 2\sigma_3\sin\emptyset}{1-\sin\emptyset} \tag{3.5}$$



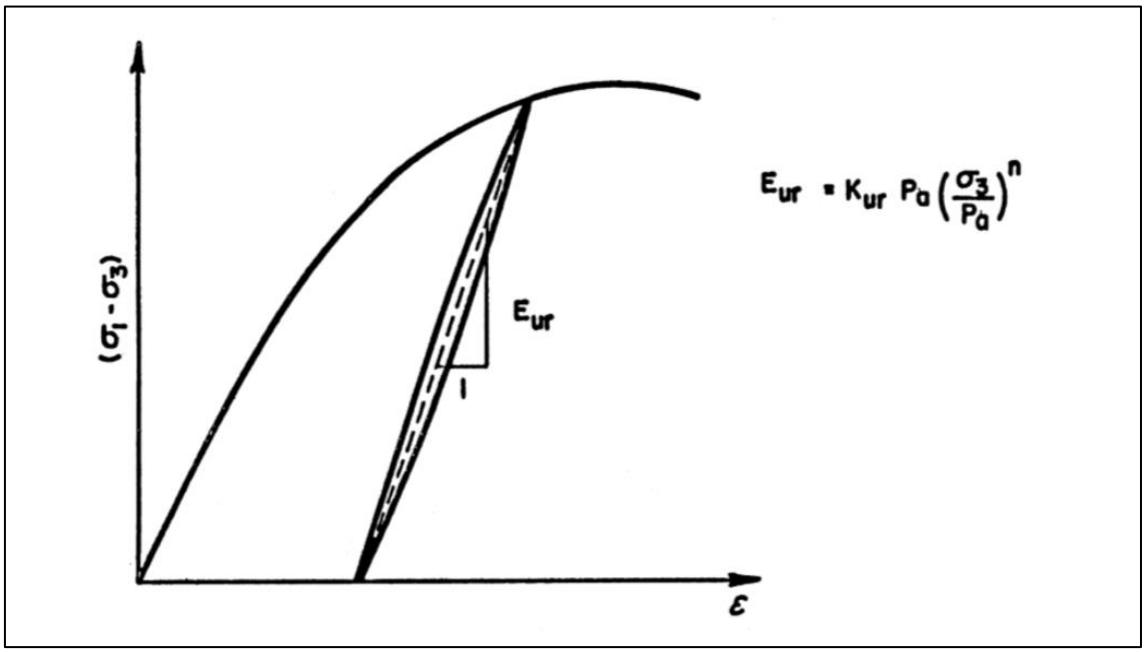
Şekil 3.7. Çevre basınç - dayanım ilişkisi [32]

Gerilme – şekil değiştirme eğrisinin anlık eğimi tanjant modülüdür (E_t). E_t yukarıda verilen eşitliklerin düzenlenmesiyle "Eş. 3.6" ile ifade edilir. Eğer $(\sigma_1\text{-}\sigma_3)$ ve σ_3 gerilme koşulları için K, n, c, ϕ ve R_f değerleri biliniyorsa tanjant modülü değeri hesaplanabilir.

$$E_t = \left(1 - \frac{R_f(1-\sin\emptyset)(\sigma_1-\sigma_3)}{2c\cos\emptyset + 2\sigma_3\sin\emptyset}\right)^2 K\cdot P_a\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \tag{3.6}$$

Elastik olmayan davranışın yükleme – boşaltma durumları için farklı modül değerleri tarafından temsil edilmesi (elastik olmayan davranış)

Elastik olmayan davranış yükleme – boşaltma durumları için farklı modül değerleri tarafından temsil edilmektedir. Eğer üç eksenli numunesi yük boşaltma durumuna maruz bırakılırsa gerilme – şekil değiştirme eğrisi boşaltma esnasında ilk yüklemeye göre daha diktir. Bu durum Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Eğer numune sonrasında yeniden yüklenirse gerilme – şekil değiştirme eğrisi ilk yüklemeye göre yine daha dik olacaktır. Çünkü zemin davranışı inelastiktir.



Şekil 3.8. Boşaltma ve yeniden yükleme eğrisi [32]

Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde E_{ur} boşaltma ve geri yükleme durumlarında aynıdır. Bu değerin çevre basıncıyla ilişkisi "Eş 3.7" ile verilmiştir.

$$E_{ur}=K_{ur}\, P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \qquad (3.7)$$

Boşaltma ve geri yükleme modülü K_{ur}'un ilk yükleme modülü olan K değeriyle olan ilişkisi sert zeminlerde $K_{ur}\approx 1.2$ K, yumuşak zeminlerde $K_{ur}\approx 3$ K aralığında değişmektedir. Üs modülü olan n ise genellikle ilk yükleme ve boşalma durumunda çok benzerdir. Hiperbolik ilişkilerde n değeri aynı alınır.

Hiperbolik parametrelerin özeti

Hiperbolik modelde kullanılan gerilme – şekil değiştirme ilişkisi parametreleri aşağıdaki Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. Gerilme – şekil değiştirme ilişkisi için hiperbolik parametrelerin özeti

Parametreler	İsim	İşlevi
K, K_{ur}	Modul katsayısı (İlk yükleme, boşaltma-geri yükleme durumunda)	E_i ve E_{ur}'nin σ_3 ile ilişkisinin kurulması
n	Modül üssü	
c	Kohezyon	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 'in σ_3 ile ilişkisinin kurulması
Ø	İçsel sürtünme açısı	
R_f	Göçme oranı	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 'in $(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}$ ile ilişkisinin kurulması

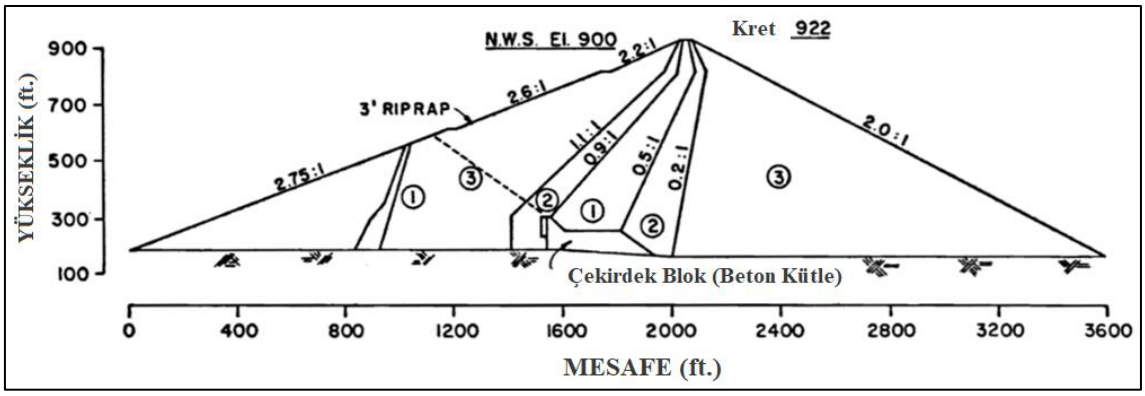
Bu değerler zemin özellikleri olmayıp sadece ampirik katsayılardır. Bu değerler zemin yoğunluğuna, su içeriğine, testlerde kullanılan basınca ve drenaj koşullarına bağımlıdır.

Hiperbolik malzeme modeli parametreleri üç eksenli basınç deney sonuçlarından elde edilebilmesi, efektif gerilme analizleri (drenajlı testlerde kullanılan veriler) ve toplam gerilme analizleri (konsolidasyonsuz- drenajsız testlerde kullanılan veriler) için aynı ilişki kullanılabilmektedir. Ayrıca Parametre değerleri birçok farklı zemin için Duncan – Chang tarafından hesaplanmış ve derlenmiştir. Bu bilgiler özel problemleri içeren tüm zeminler için

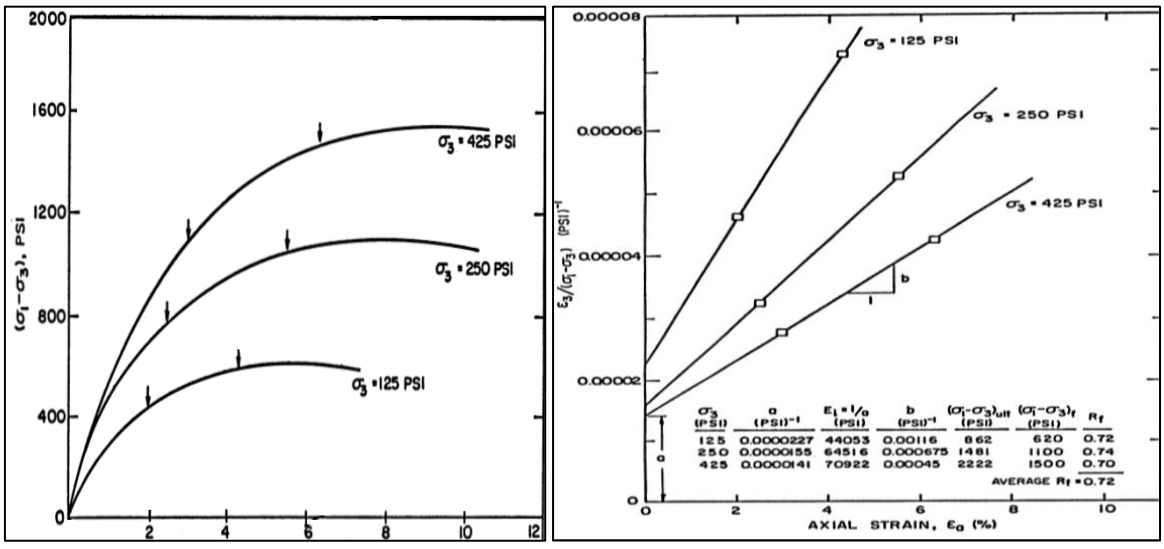
kullanılabilir. Bu hesaplanan değerler parametrelerin belirlenmesinin zor olduğu durumlarda gerçeğe yakın değerleri tahmin etmede kullanılabilir. Ayrıca bu hesaplanan değerler labaratuvar deney sonuçlarından elde edilen bilgilerin güvenilirliğini değerlendirmede de kullanılabilir [32].

3.2. Hiperbolik Modelin Dolgu Baraj Analizlerinde Kullanılması

Duncan ve Wong (1984) 235 m yüksekliğinde geçirimsiz çekirdekli kaya dolgu baraj olarak inşa edilen Oroville Barajı'nın kaya dolgu malzemesinin hiperbolik model parametrelerini hesaplamıştır. Şekil 3.9'da Oroville Barajı enkesiti ve Şekil 3.10'da Oroville Barajı gerilme şekil değiştirme eğrisi ve dönüştürülmüş hiperbolik gerilme şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.

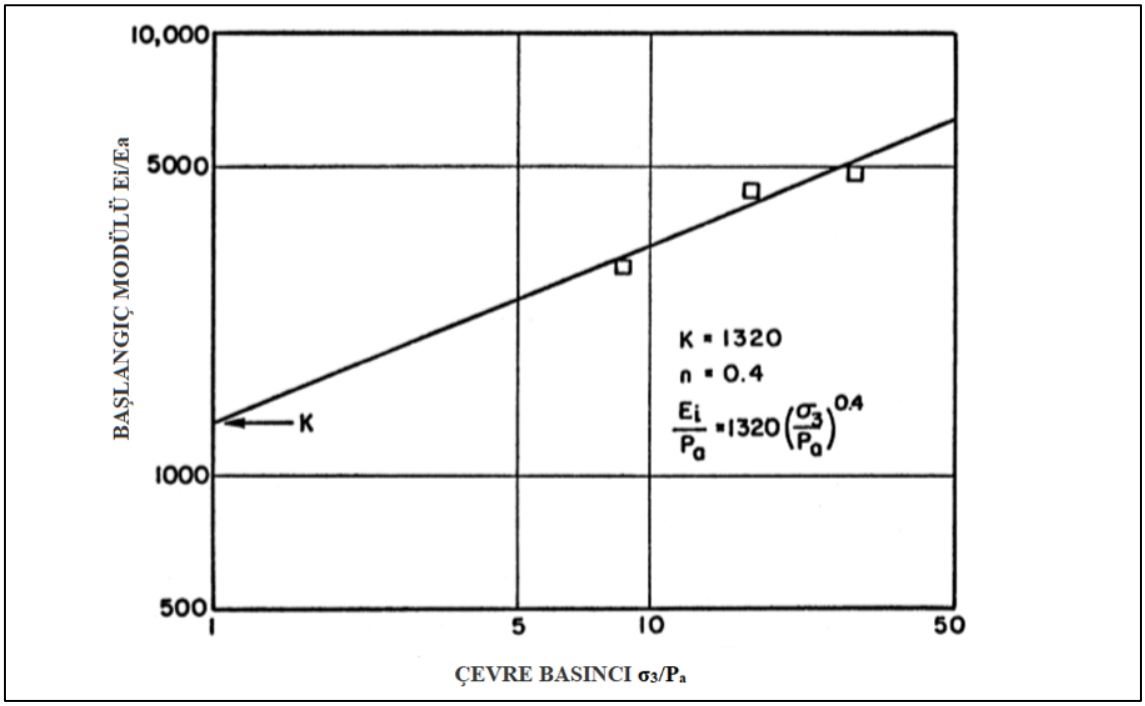


Şekil 3.9. Oroville Barajı enkesiti [32]



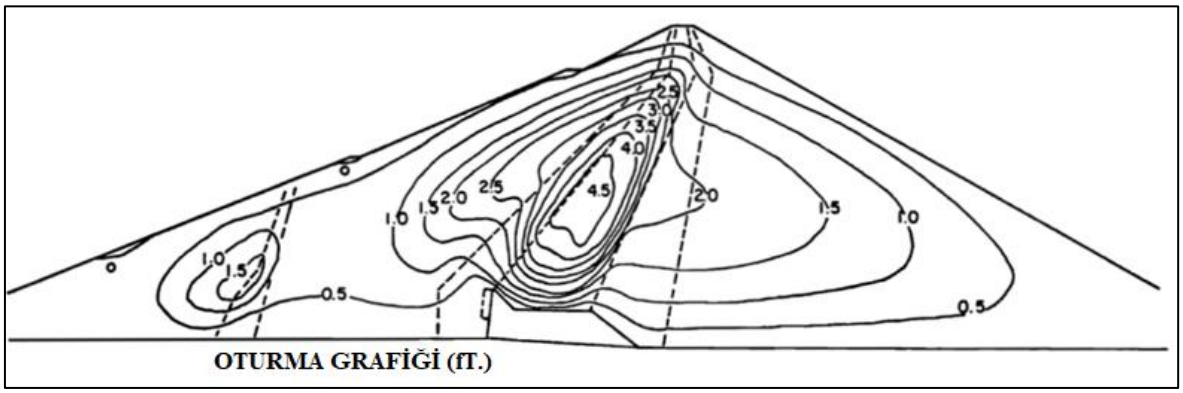
Şekil 3.10. Oroville Barajı gerilme şekil değiştirme eğrisi ve dönüştürülmüş hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi [32]

Bu grafiklere göre çizdirilen E_i/E_a ile σ_3/P_a grafiği Şekil 3.11'de verilmiştir. Bu Oroville Barajı kaya dolgu malzemesi için grafikten K=1320 n=0,4 olarak hesaplanmıştır.

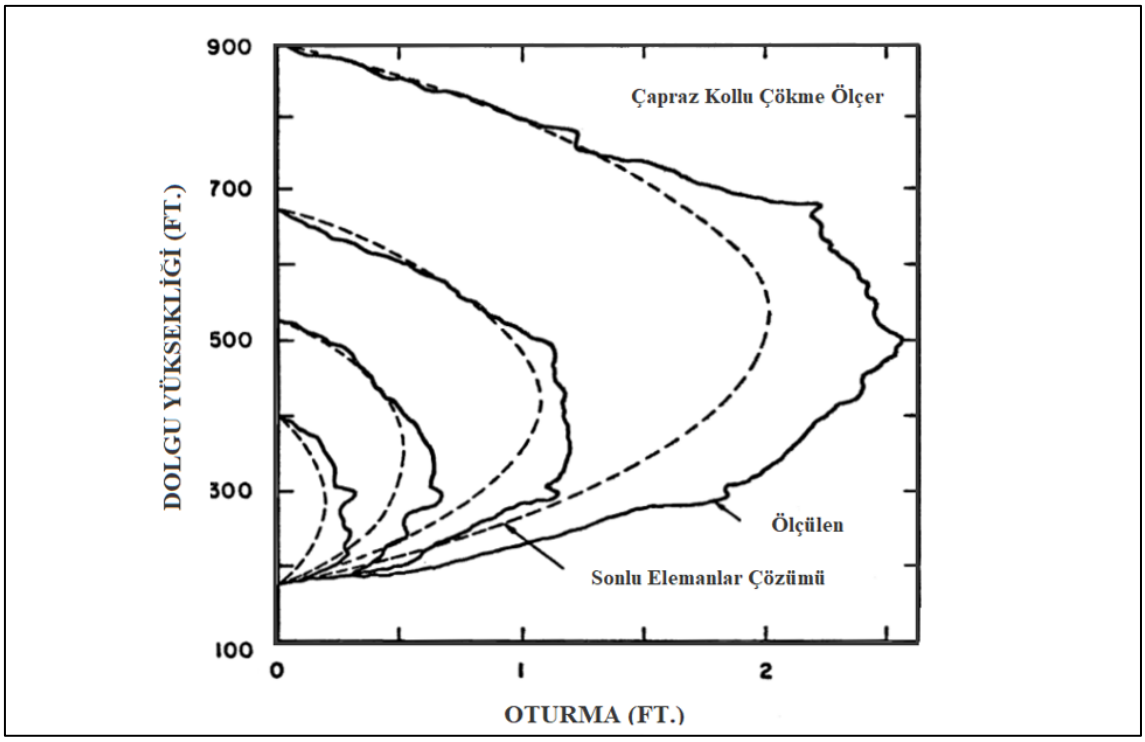


Şekil 3.11. Oroville Barajı kaya dolgu malzemesi E_i/E_a ile σ_3/P_a grafiği [32]

Kulwahy ve ark. (1972) Duncan - Chang hiperbolik malzeme modelini kullanarak Oroville Barajı'nın iki boyutlu sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçlarında yatay ve düşey deformasyonların ölçüm aletlerinden elde edilen sonuçlarıyla tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3.12'de Oroville Barajı düşey deformasyon miktarı ve yeri Şekil 3.13'te ise hesaplanan ve ölçülen deformasyon sonuçların karşılaştırılması grafiği verilmiştir [32].



Şekil 3.12. Oroville Barajı düşey deformasyon miktarı [32]

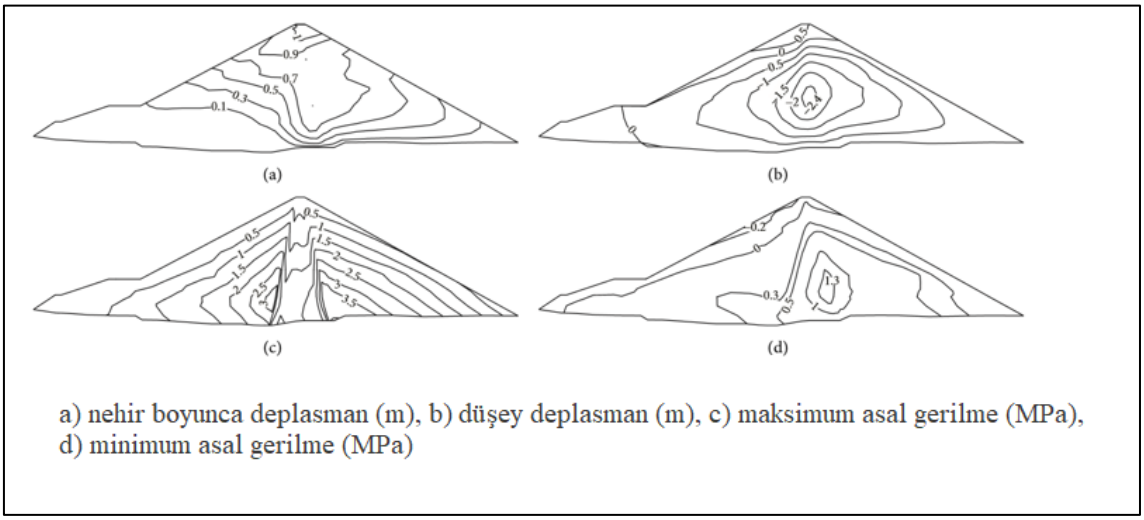


Şekil 3.13. Oroville Barajı hesaplanan ve ölçülen deformasyon sonuçların karşılaştırılması [32]

Dong W. ve ark. (2013) Nuozhadu Barajı'nın ve Derakhshandi M. ve ark. (2014) Vanyar Barajı'nın deformasyon analizlerini iki boyutlu sonlu elemanlar analizlerini Duncan – Chang hiperbolik malzeme modelini kullanarak gerçekleştirmiştir [33, 34]. Nuozhadu Barajı model parametreleri Çizelge 3.3'te düşey deformasyon grafiği Şekil 3.14'te, Vanyar Barajı model parametreleri Çizelge 3.4'te düşey deformasyon grafiği Şekil 3.15'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. Nuozhadu Barajı model parametreleri [33]

MALZEME	KAYA DOLGU I	KAYA DOLGU II	ÇAKIL KİL KARIŞIMI
R_f	0,73	0,74	0,77
K	1450	1360	520
K_b	550	600	250
K_{ur}	2800	2500	900
n	0,30	0,43	0,42
m	0,13	0,08	0,25

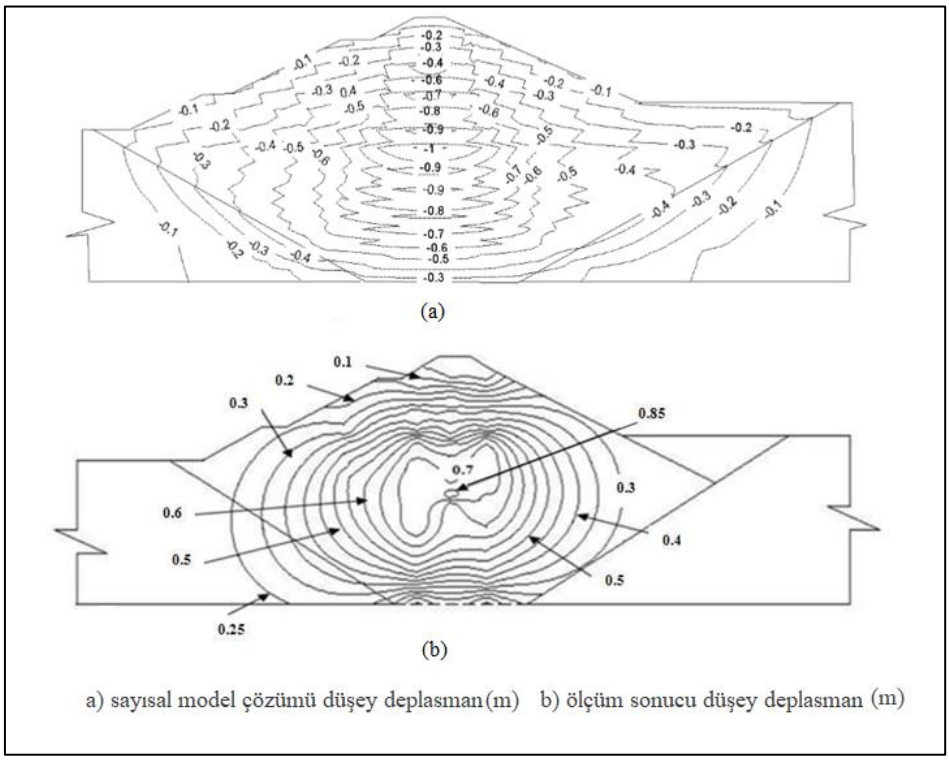


a) nehir boyunca deplasman (m), b) düşey deplasman (m), c) maksimum asal gerilme (MPa), d) minimum asal gerilme (MPa)

Şekil 3.14. Nuozhadu Barajı düşey deformasyon grafiği [33]

Çizelge 3.4. Vanyar Barajı model parametreleri [34]

Malzeme Tipi	MALZEME ÖZELLİKLERİ											
	φ (deg)	C(kPa)	R_f	m	n	k_{ur}	k_b	k_l	γ_{dry}(kN/m^3)	γ_{bulk}(kN/m^3)	k(m/s)	n
Filtre	33	0	0.7	0.5	0.6	600	300	300	18.5	19.5	10^{-5}	0.45
Geçiş Malzemesi	38	0	0.7	0.3	0.4	1200	550	600	20.27	21.27	10^{-4}	0.25
Kaya Dolgu	48	0	0.9	0.5	0.7	1350	800	650	19.25	19.75	10^{-4}	0.25
Kil Çekirdek	21	15	0.72	0.4	0.5	500	220	250	20.04	20.74	5×10^{-8}	0.35



a) sayısal model çözümü düşey deplasman(m) b) ölçüm sonucu düşey deplasman (m)

Şekil 3.15. Vanyar Barajı düşey deformasyon grafiği [34]

Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli parametreleriyle yapılan bu analizlerde düşey deformasyonların genel dolgu baraj düşey deformasyon karakterine uyumlu olduğu ve ölçüm sonuçlarıyla benzer düşey deformasyonlar hesaplandığı görülmüştür. Duncan – Chang hiperbolik modelinin dolgu barajların gerilme – şekil değiştirme analizlerinde güvenilir bir malzeme modeli olduğu anlaşılmaktadır.

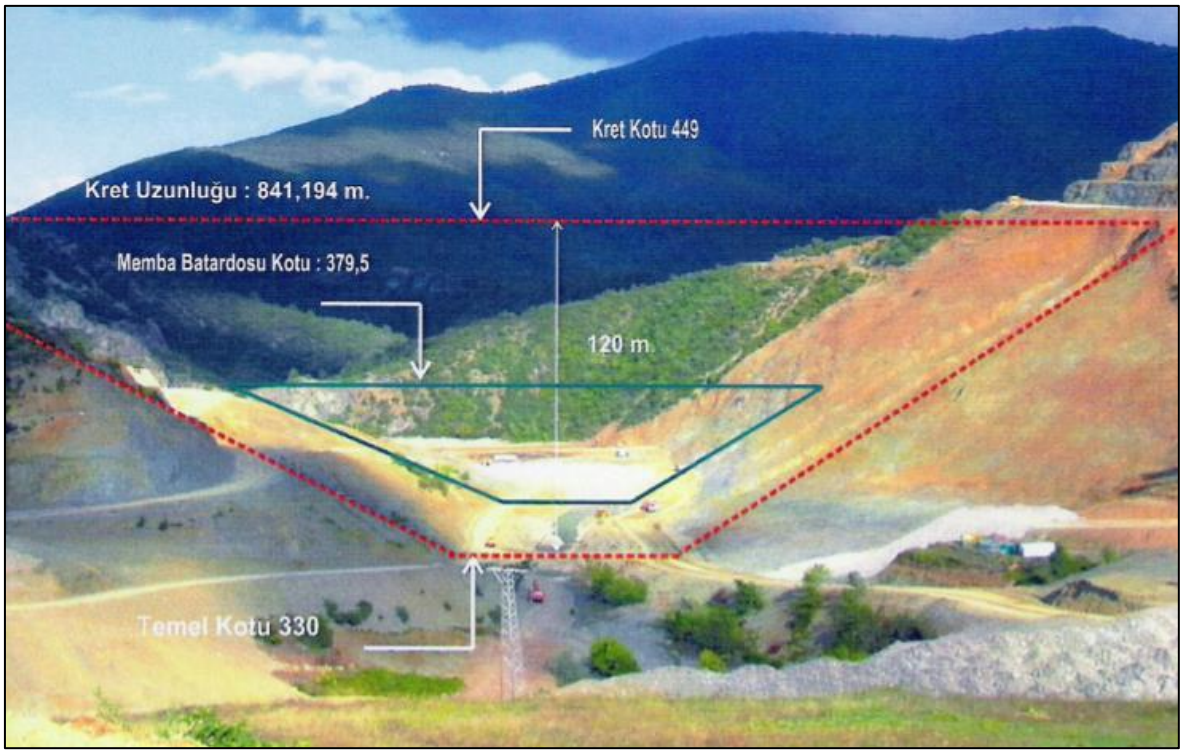
4. ÇALIŞMA ALANI

4.1. Köprübaşı Barajı ve HES Projesi

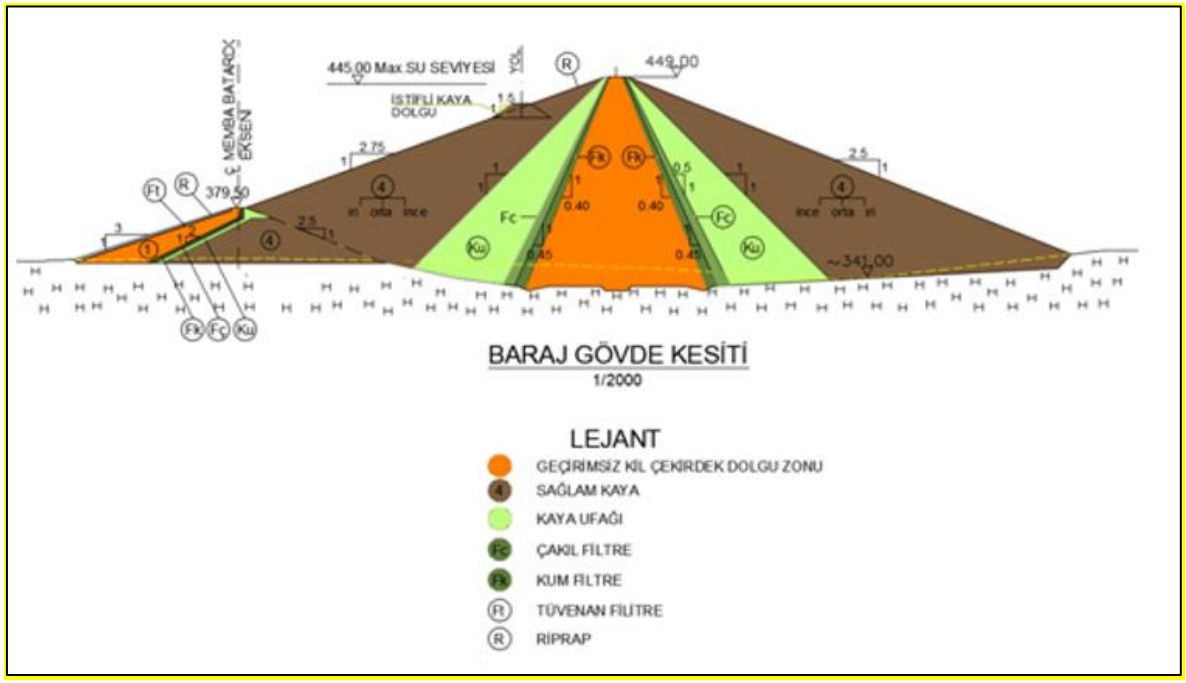
Köprübaşı Barajı ve HES Bolu il sınırlarında Filyos Çayı'nın önemli bir kolu olan, Bolu Çayı üzerinde, Mengen ilçe merkezine 29 Km, Devrek ilçe merkezine, 25 Km ve Bolu il merkezine 70 Km uzaklıkta yer almaktadır. Köprübaşı Barajı'nın Türkiye üzerindeki konumu Harita 4.1'de görülmektedir. Köprübaşı Barajı enerji ve taşkın kontrolü amacıyla projelendirilmiştir. 2002 yılında inşaatına başlanmış olup 2011 yılında su tutmaya başlamıştır. Özel sektör tarafından işletilmekte olan Köprübaşı Barajı yap-işlet-devret modeliyle yapılmıştır. Gövde tipi kil çekirdek kaya dolgudur. Gövde hacmi 7 330 500 m³, akarsu yatağından yüksekliği 108,00 m, temelden yüksekliği 120 m, kret uzunluğu 841 m, kret genişliği 12 m'dir. Köprübaşı Barajı yeri tipik enkesiti Şekil 4.1'de gövde tipik enkesiti Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Harita 4.1. Köprübaşı Barajı'nın Türkiye üzerindeki konumu



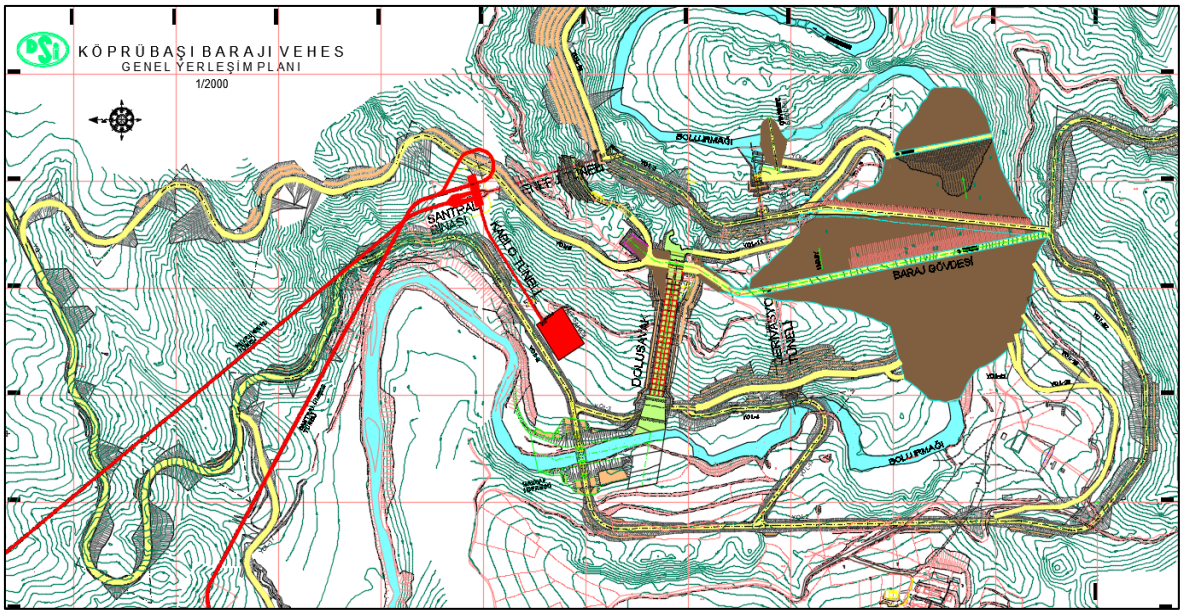
Şekil 4.1. Köprübaşı Barajı yeri tipik enkesiti



Şekil 4.2. Köprübaşı Barajı tipik gövde enkesiti

4.2. Proje karakteristikleri

Köprübaşı Barajı kil çekirdek kaya dolgu gövde, memba batordasu, dolusavak, derivasyon tüneli, santral binası yapılarından oluşmaktadır [35]. Şekil 4.3'te Köprübaşı Barajı Genel Yerleşim Planı görülmektedir.



Şekil 4.3. Köprübaşı Barajı genel yerleşim planı

4.2.1. Baraj gövdesi

Kil çekirdek kaya dolgu tipinde inşa edilen Köprübaşı Barajı gövde yüksekliği talvegden 108 m, temelden 120 m'dir. Gövde hacmi 7 330 500 m^3, kret kotu 449 m, temel kotu 330 m kret uzunluğu 841,19 m, kret genişliği ise 12 m'dir. Gövdenin mansapta görünüşü Resim 4.1'de görülmektedir.



Resim 4.1. Gövde mansaptan görünüş

4.2.2. Dolusavak

Sağ sahile konumlandırılmış olan dolusavak karşıdan alışlı, iki adet radyal kapaklı olarak inşa edilmiştir. Kapak boyutları 14,00 x 12,50 m'dir. Deşarj Kapasitesi: 2491 m^3/s 'dir. Dolusavak uzunluğu 355 m genişliği 28 m'dir. Resim 4.2'de dolusavak yapısı görülmektedir.



Resim 4.2. Köprübaşı Barajı dolusavak yapısı

4.2.3. Derivasyon tüneli

Derivasyon tüneli sağ sahile konumlandırılmış olup dairesel 5.0 m çapında dairesel kesitlidir. Toplam deşarj kapasitesi Q_{25} = 371 m^3/s ‘dir. Tünel boyu 410 m’dir.

4.2.4. Santral binası

Santral binası tipi yeraltı, enerji tünel tipi dairesel, çapı 3.40 m ve boyu 312,76 m ‘dir. Ünite sayısı 2 adet olup, türbin tipi düşey eksenli francisdir. Kurulu güç 2x40,44 MW (80,88 MW) toplam enerji: 203,12 x 106 Kwh’dır. Kuyruksuyu tünel tipi atnalı, çapı 4,60 m ve boyu 4 717,56 m’dir. Santral binası Resim 4.3’te görülmektedir.

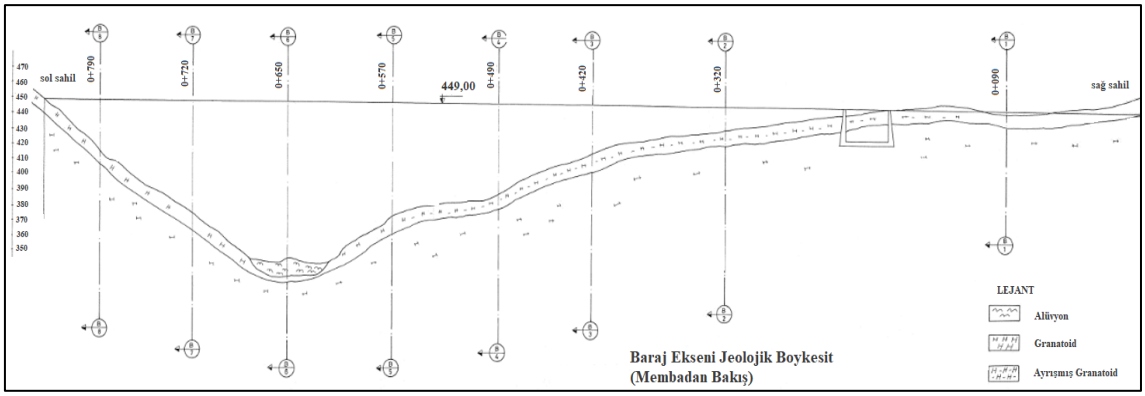


Resim 4.3. Köprübaşı Barajı santral binası

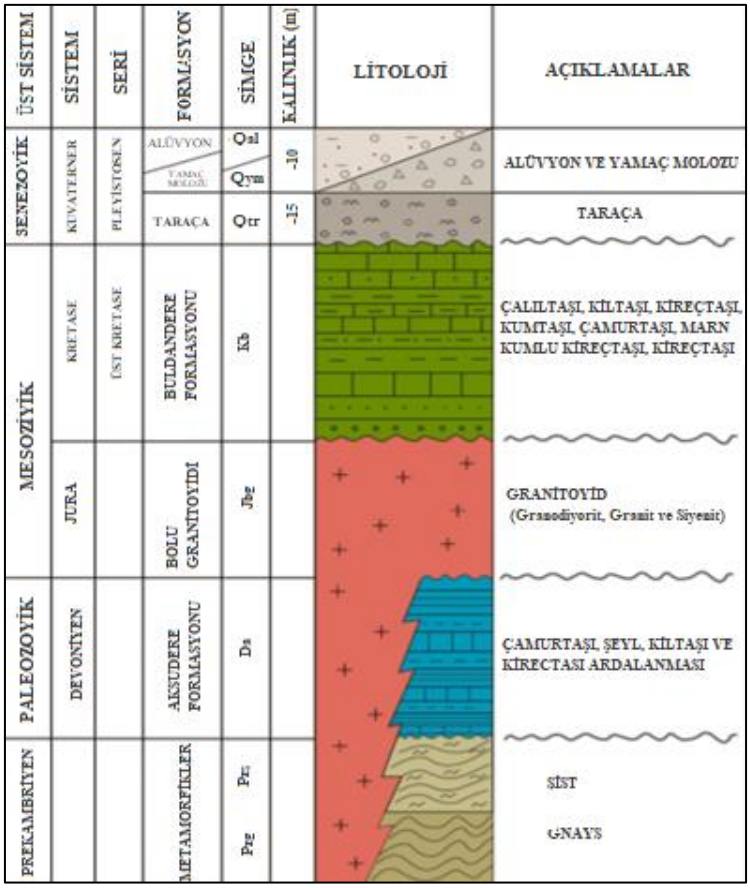
4.2.5. Baraj yeri ve çevresinin jeolojisi

Baraj yerinin ve çevresinin en yaygın jeolojik birimi Alt Jura yaşlı granitoitlerdir. Bu granitoit batolitinin üzerine yaygın olarak Kretase ve Eosen yaşlı Flişler gelmektedir. Proje alanı ve çevresinde ufak yüzlekler halinde Paleozoik yaşlı birimler de yer almaktadır. Köprübaşı Baraj yeri ve göl alanında geniş alanlar kaplayan granitoitler genel olarak asidik kayaç topluluğundan (granodiyorit, granit, siyenit) oluşmaktadır ve yer yer diyabaz, bazalt, aplit sokulumları ile katedilmişlerdir. Genel olarak iri kristalli, breşimsi-kataklastik yapıda,

sert ancak gevrek ve çekiç darbesi ile dağılabilir özelliklerdedir. Yer yer sık çatlaklı, çatlakları kuvars, kalsit, klorit, limonit dolguludur. Kataklastik-breşimsi yapı, çok parçalı, yer yer kalın ayrışma belirgin özelliğidir. Yerleşim yaşı Jura olan birimin stratigrafik kalınlığı 600 m den fazladır. Vadi tabanında kalınlıkları fazla olmayan alüvyon, yamaçlarda taraçalar ve yamaç molozlari kuvaterner örtüyü oluşturur. Şekil 4.4'te Köprübaşı Barajı gövde yeri jeolojik boykesiti, Şekil 4.5'te Köprübaşı Barajı jeolojik sütunu verilmiştir.



Şekil 4.4. Köprübaşı Barajı gövde yeri jeolojik boykesiti



Şekil 4.5. Köprübaşı Barajı jeolojik sütunu

4.2.6. Baraj dolgusu

Köprübaşı Barajı kil çekirdek kaya dolgu tipinde olup kret uzunluğu 841 m, kret genişliği 12 m, talvegden yüksekliği 108 m, temelden yüksekliği 120 m'dir. Kaya dolgu malzemesi (kaya dolgu, kaya ufağı ve riprap) 5250000 m^3, geçirimsiz malzeme 1565000 m^3, geçirimli ve yarı geçirimli malzeme (kum ve çakıl filtre) 705000 m^3, toplam dolgu hacmi 7330500 m^3'tür.

Yapılan etütler sonucu 11 adet geçirimsiz, 3 adet yarı geçirimli, 2 adet geçirimli, 7 adet kaya malzeme alanı olmak üzere toplam 23 adet malzeme alanı tespit edilmiştir. Kullanılacak malzemelerin istenilen nitelikler, malzeme naklinde yol yapım kolaylığı yakınlık, rezervin yeterliliği faktörleri göz önüne alınarak kullanılacak malzeme alanları tespit edilmiştir. Çizelge 4.1'de uygun malzeme ocakları görülmektedir [36].

Çizelge 4.1. Dolgu malzemesi alınan malzeme ocakları

Dolgu malzemesi	Malzeme alınan ocak
Geçirimsiz malzeme	M1,M2
Filtre ve beton agregası	C,G
Kaya	Kaya-1

Geçirimsiz malzeme ocakları

M1 geçirimsiz malzeme alanı

Alandaki malzemenin kalite ve miktarını belirlemek amaçlı 17 adet araştırma kuyusu açılmış olup bu kuyulardan 12 adet örnek alınmıştır. Arazi gözlemleri ve laboratuvar sonuçlarına göre alandaki malzeme genellikle inorganik kil, çok plastik kil karışımları (CH), inorganik kil, çakıllı kumlu kil, siltli kil, az-orta plastik karışımları (CL), inorganik silt ve çok ince kum, az plastik karışımları (ML), inorganik silt, kumlu silt, elastik silt karışımları (MH), killi

kum ile orta plastik kil karışımları (SC-CL) karakterindedir. Alandaki malzemenin ortalama granülemetrisi; %59 ince, %32 kum, %9 çakıldır [36].

M2 geçirimsiz malzeme alanı

Alandaki malzemenin kalite ve miktarını belirlemek amaçlı 35 adet araştırma kuyusu açılmış olup bu kuyulardan 18 adet örnek alınmıştır. Arazi gözlemleri ve laboratuar sonuçlarına göre alandaki malzemenin organik kil, çakıllı kumlu kil, siltli kil, az plastik karışımları (CL), inorganik, çok plastik kil karışımları (CH), inorganik silt ve çok ince kum-kil karışımları (ML) ve killi kum ile orta plastik karışımları (SC-CL) karakterindedir. Alandaki malzemenin ortalama granülemetrisi; %59 ince, %38 kum, %3 çakıldır [36].

Geçirimli malzeme ocakları

C geçirimli malzeme alanı

Alandaki malzemenin kalite ve miktarını belirlemek amaçlı 7 adet araştırma kuyusu açılmış olup bu kuyulardan 6 adet örnek alınmıştır. Arazi gözlemleri ve laboratuar sonuçlarına göre alandaki malzeme kötü dereceli kum çakıl karışımları (GP-SP), iyi dereceli çakıl- kum karışımları (GW-SW) karakterindedir [36].

G geçirimli malzeme alanı

Alandaki malzemenin kalite ve miktarını belirlemek amaçlı 12 adet araştırma kuyusu açılmış olup bu kuyulardan 15 adet örnek alınmıştır. Arazi gözlemleri ve laboratuar sonuçlarına göre alandaki malzeme iyi dereceli çakıl kum karışımları (GW-SW), kötü dereceli kum çakıl karışımları(GP-SP) karakterindedir [36].

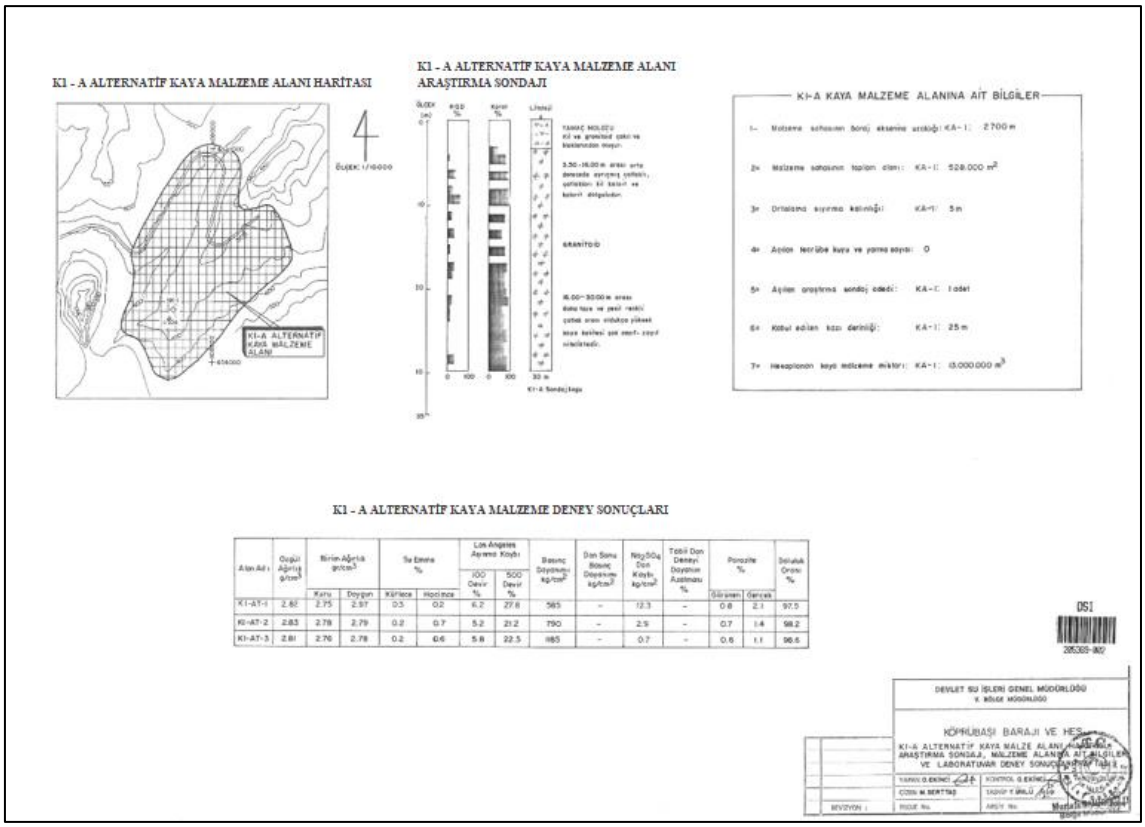
Kaya malzeme alanları

Kaya -1 malzeme alanı

Araştırma yapılan alandan K-1 ve K1-A nolu 2 adet kaya örnek alınmıştır. Örneklerden K-1 Nolu örneğin kaya yüzeyinden, Kl-A nolu örneğin ise yaklaşık 4.50 m derinlikten alındığı

ifade edilmiştir. Dolayısıyla değerlendirmeye sadece Kl-A örneğin laboratuvar deney sonuçlar alınmıştır. Kl-A nolu örneğe ait kaya fiziksel deney sonuçları aşağıda verilmiştir**.**

Özgül kütle 2820 kg/m^3 (Kaya gerecin özgül ağırlık değeri >2,60 limitine uygundur.) Su emme %2,82 (Kaya gerecin Su Emme oranı < %1,8 göre uygundur) Basınç Dayanımı 790 kg/cm^2 (Kaya gerecin basınç dayanımı değeri en az 500 kg/cm^2 ye göre uygundur.) Şekil 4.6'da kaya malzeme alanı ve laboratuvar sonuçları gösterilmektedir [36].



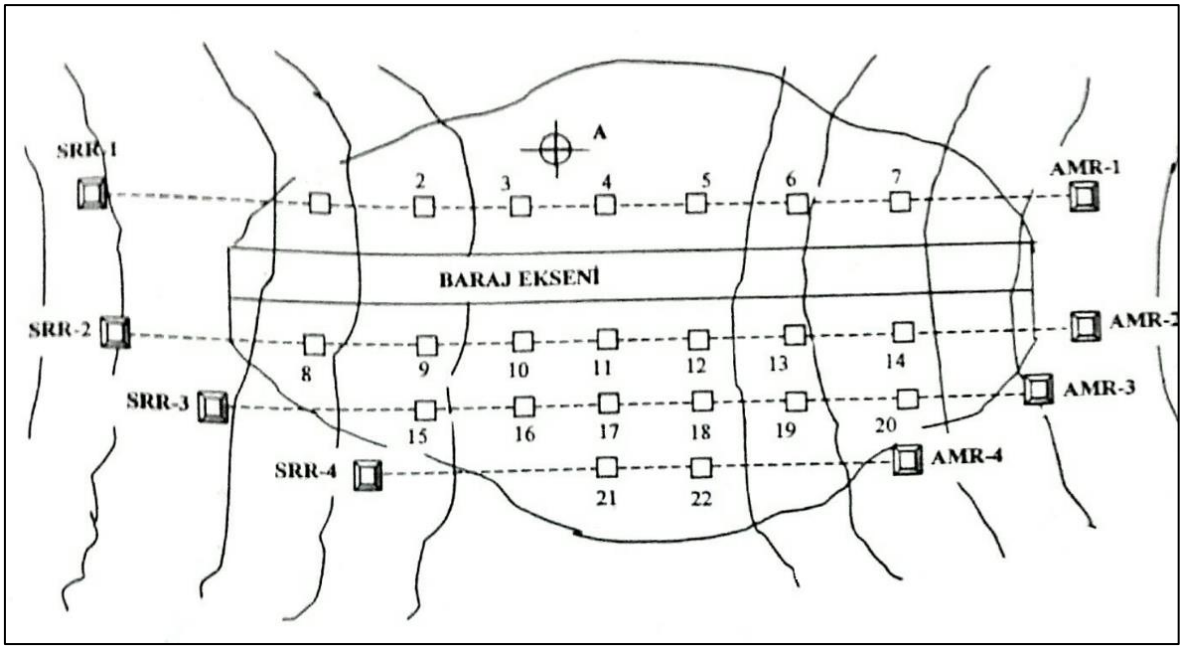
Şekil 4.6. Kaya malzeme alanı ve laboratuvar sonuçları

4.2.7. Ölçüm aletleri

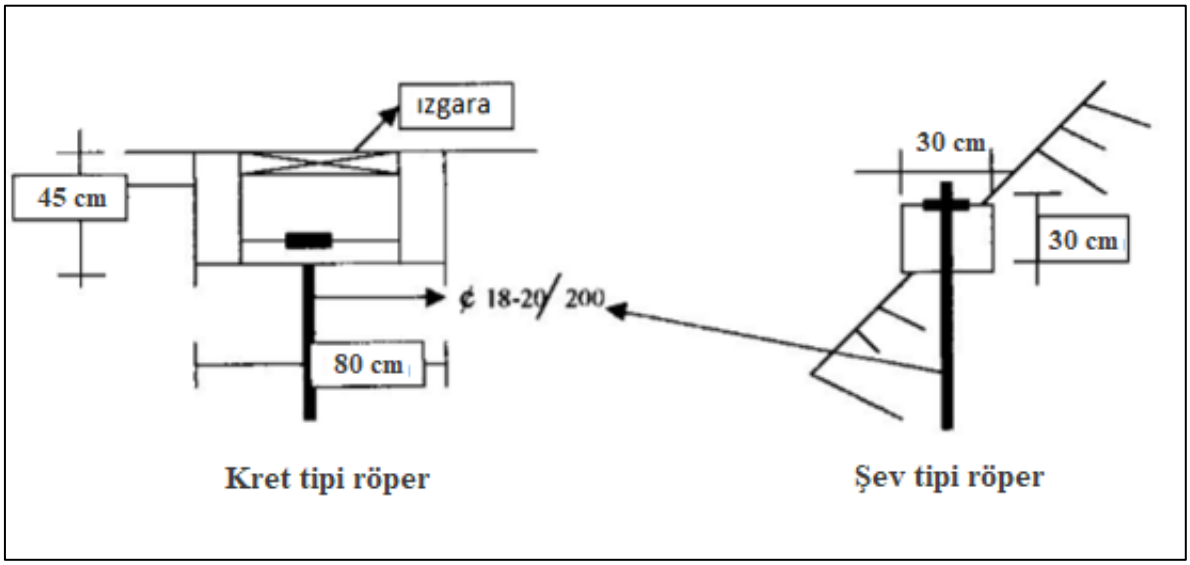
Harici çökme röperleri

Harici çökme röperler, barajın X,Y,Z yönlerinde deformasyonlarını ölçmek için kret kenarlarına ve dolgu şevlerine yerleştirilen ölçüm cihazları olup, jeodezik ölçümler yapılmasına imkân verirler. Sabit bir noktaya göre meydana gelen deformasyonun değeri ve doğrultusu belirlenir. Bu yüzeysel deplasman ölçerler dolgu dışında sağlam zemine

yerleştirilmiş olan sabit referans röperi (SRR) ve alet merkezlendirme röperi (AMR) vasıtasıyla dolgudaki deplasmanın değer ve doğrultusunu belirlemekte kullanılırlar. Köprübaşı Baraj gövdesi üzerine proje paftasında gösterildiği gibi membada krete yakın bir sıra halinde ve mansap yüzeyinde krete paralel çeşitli kotlarda harici çökme ölçüm röperleri yerleştirilmiştir. Şekil 4.7'de sabit ve çökme röperlerine ait şematik şekil ve Şekil 4.8. kret ve şev tipi harici çökme röperler verilmiştir [37].



Şekil 4.7. Sabit ve çökme röperlerine ait şematik şekil [37]



Şekil 4.8. Kret ve şev tipi harici çökme röperler [37]

Köprübaşı Barajının kretine ve mansap yüzeyine 32 adet harici çökme röperi yerleştirilmiştir. Çizelge 4.2'de çökme röperlerinin yerleşimi ve Resim 4.4'te Köprübaşı Barajı'nda bulunan harici çökme röperi ve ölçüm odası verilmiştir [38].

Çizelge 4.2. Çökme röperlerinin yerleşimi [38]

Km	Yeri	Röper No
0+320	Kretin memba kenarı	1
	Kretin mansap kenarı	8
0+420	Kretin memba kenarı	2
	Kretin mansap kenarı	9
	Mansap yüzü 432 m kotu	15
0+570	Kretin memba kenarı	4
	Kretin mansap kenarı	11
	Mansap yüzü 432 m kotu	17
	Mansap yüzü 412 m kotu	21
	Mansap yüzü 392 m kotu	25
	Mansap yüzü 372 m kotu	28
	Mansap yüzü 356 m kotu	31
0+650	Kretin memba kenarı	5
	Kretin mansap kenarı	12
	Mansap yüzü 432 m kotu	18
	Mansap yüzü 412 m kotu	22
	Mansap yüzü 392 m kotu	28
	Mansap yüzü 372 m kotu	29
	Mansap yüzü 356 m kotu	32
0+720	Kretin memba kenarı	6
	Kretin mansap kenarı	13
	Mansap yüzü 432 m kotu	19
	Mansap yüzü 412 m kotu	22
	Mansap yüzü 392 m kotu	27
	Mansap yüzü 372 m kotu	30
0+790	Kretin memba kenarı	7
	Kretin mansap kenarı	14
	Mansap yüzü 432 m kotu	20
	Mansap yüzü 412 m kotu	24



Resim 4.4. Köprübaşı Barajında bulunan harici çökme röperi ve ölçüm odası [38]

Çapraz kollu çökme ölçerler

Toprak ve kaya dolgu barajların kil çekirdeklerine, baraj inşaatına paralel olarak belirli bir tekniğe göre yerleştirilen ve dolgunun sıkışma sonucu hacimsel küçülmesiyle, yük altında temelde meydana gelecek oturma miktarlarını tespit etmeye yarayan bir ölçüm tesisidir. Dolgu yüksekliğine göre kol aralığı ve tipleri bir takım farklılıklar gösterebilir. Dolgu yüksekliğine göre kol aralıklarındaki değişim 20-30 m yüksekliğindeki barajlarda 1,5 m,30-60 m yüksekliğindeki barajlarda 3 m, 60 m den yüksek baraklarda 5 m olarak verilmektedir.

Çapraz kollu çökme göstergesi genel olarak 2 inçlik (50,80 mm) ve 1,5 inçlik (38,10 mm) galvanizli iç içe giren borulardan oluşur. Bu borular düşey doğrultu boyunca dolgu içerisine yerleştirilir. Bu borulara sabit aralıklarda ve yatay konumda profil demirleri bağlıdır. Dolgunun hareketini bu yatay borular düşey konumdaki borulara iletir. Böylece, dolgunun düşey doğrultu boyunca hareket miktarları ölçülür [37].

Baraj gövdesi km 0+650'de bulunan baraj 39 adet manyetik halka gövdede oluşabilecek oturmaları izlemek için yerleştirilmiştir. Manyetik halkaların 109 m derinliğe yerleştirildiği Çizelge 4.3'te gözükmektedir. 10 Eylül 2009 çapraz kollu çökme ölçerden ilk ölçüm okumaları gerçekleştirilmiştir. Su tutma işlemi ise 02 Temmuz 2011 tarihinde yapılmıştır. Okumalar periyodik olarak tekrarlanmıştır. Şekil 4.9'da baraj gövdesinde bulunan çapraz kollu çökme ölçerler (0+650 Km) görülmektedir [38].

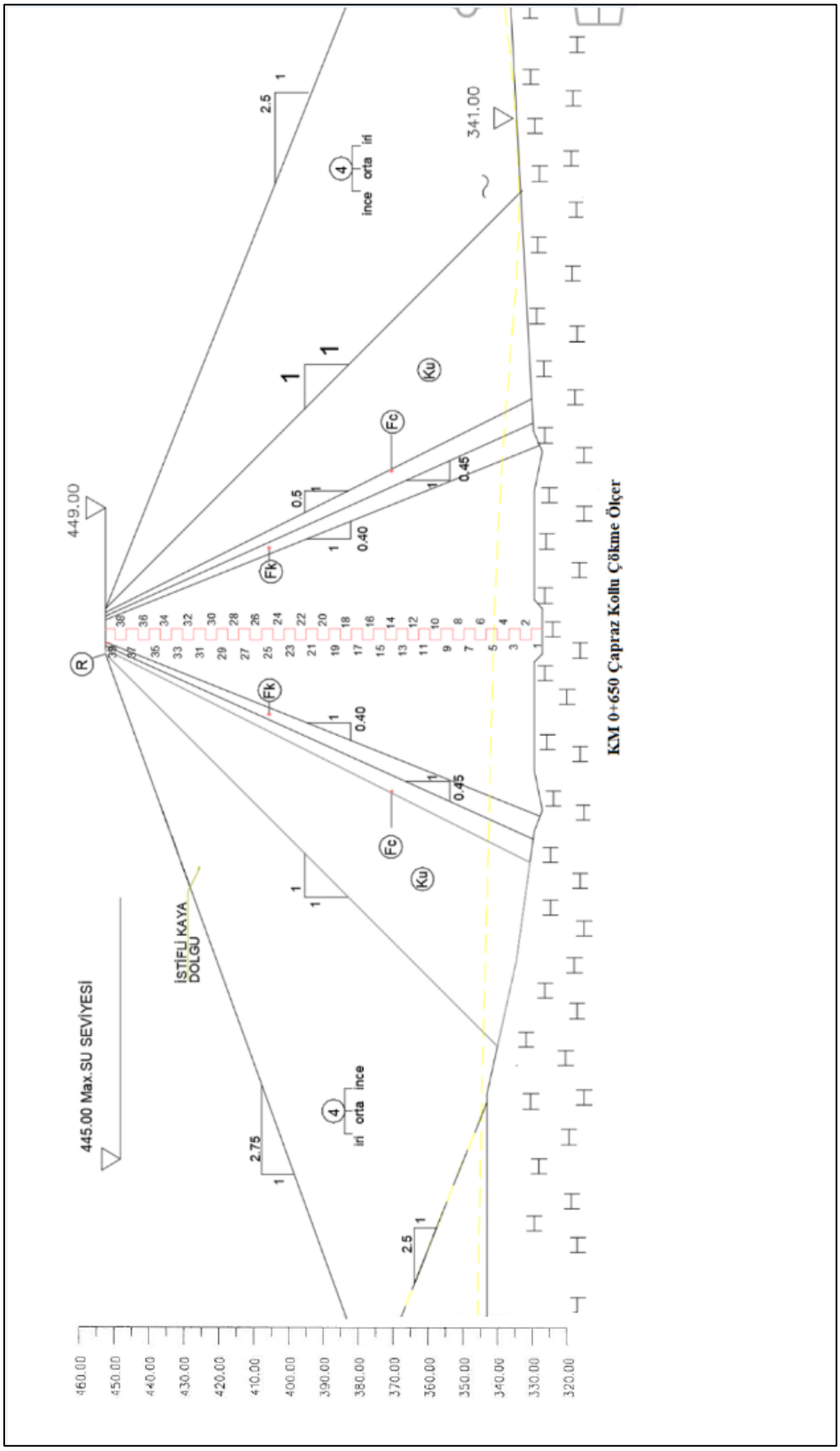
Çizelge 4.3. Çapraz kollu çökme ölçerin gövde içerisinde yerleştirilme kotları [38]

Halka No	Yerleştirme Kotu (m)	Halka No	Yerleştirme Kotu (m)
39	449,00	20	393,43
38	448,00	19	390,58
37	445,00	18	387,79
36	442,00	17	384,99
35	439,00	16	382,32
34	436,00	15	379,57
33	433,00	14	376,58
32	430,00	13	374,03
31	427,00	12	371,31
30	424,00	11	368,35
29	421,00	10	365,40
28	418,00	9	362,44
27	415,00	8	359,55
26	411,92	7	356,63
25	408,94	6	353,70
24	405,55	5	350,80
23	402,55	4	347,91
22	399,25	3	345,43
21	396,34	2	342,91
		1	340,01

Boşluk suyu basınç ölçerler (piyezometreler)

Barajın güvenliği, baraj gövdesi içinde ve temelinde sızıntı ve sıkışma sebebiyle oluşan su basıncından etkilenebilmektedir. Piyezometreler bu gibi durumların kontrol edilmesinde, su tutulması sırasındaki drenaj işlemlerinin veriminin ve yapım aşamasında oluşan boşluk suyu basınçlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Barajın temeline ve dolgu içine yerleştirilir. İnşaat sırasında ve işletme aşamasında, barajın temelinde ve dolgu içinde oluşan boşluk suyu basıncı takip edilir. Böylece boşluk suyu basıncının yapının stabilitesini etkilediği alanlar saptanır [37].

Baraj gövdesinde boşluk suyu basınçlarını ölçmek, temeldeki sızmayı ve su seviyesini kontrol etmek maksadıyla kullanılan Vibriting-Wire tipinde, %0,5 doğruluk ve %0,1 hassasiyetinde ölçüm alma kapasitesine sahip, baraj yüksekliğine bağlı olarak ölçüm aralığı (0 -1,7 MPa, - 3 MPa) olan elektrikli piyezometreler yerleştirilmiştir. Bu piyezometreler, km 0+570, km 0+650 ve km 0+720 kesitlerinde baraj gövdesine 25 adet olarak yerleştirilmiştir. Ayrıca km 0+570, km 0+650 ve km 0+720 kesitlerine üç adet su seviyesi ölçer piyezometre yerleştirilmiştir [38].



Şekil 4.9. Baraj gövdesinde bulunan çapraz kollu çökme ölçerler (0+650 Km)

4.3. Analizlerde Kullanılan Malzeme Parametrelerinin Hesaplanması ve Seçimi

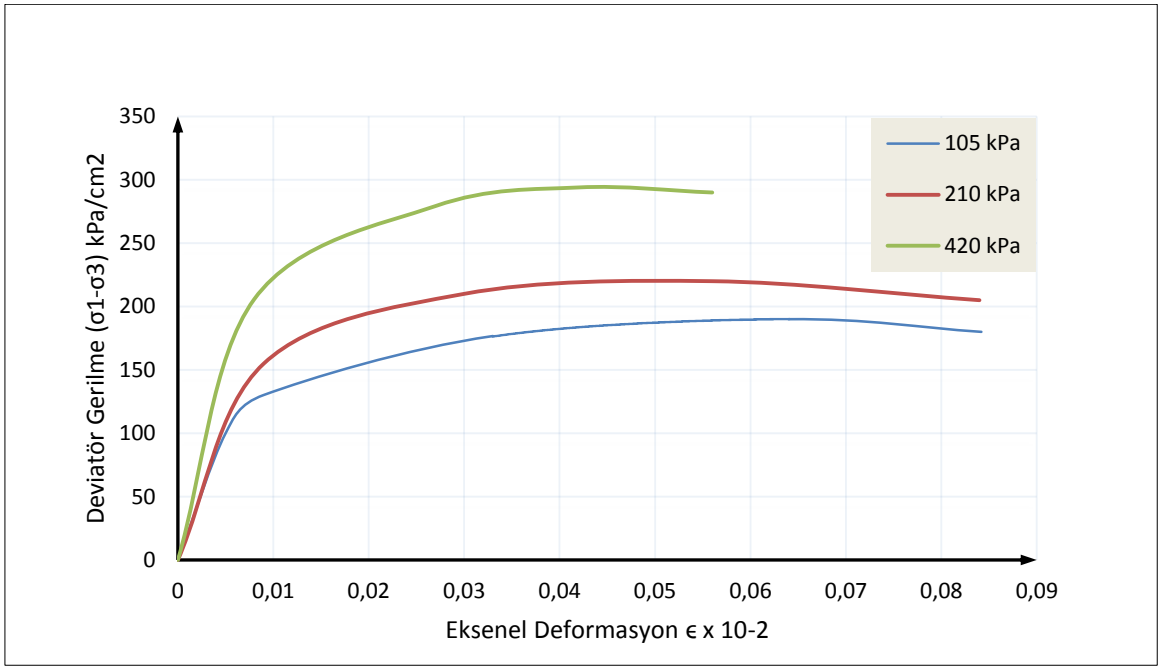
Sonlu elemanlar analizlerinde malzemelerin gerilme bağımlı, lineer olmayan ve in-elastik davranışını temsil etmek amacıyla malzeme özellikleri Phase2 v8.005 yazılımında Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli kullanılarak temsil edilmiştir. Duncan - Chang hiperbolik malzeme modeli üç ekseni basınç deney sonuçlarından kolaylıkla hesaplanabilen parametre değerleri ile malzemenin temsil edilmesi esasına dayanır. DSİ Genel Müdürlüğü tarafından hazırlatılan 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, filtre malzemeleri ve kaya dolgu için laboratuvar deney sonuçları mevcut olmadığından, analizlerde benzer zemin özellikleri için belirlenen parametre değerleri kullanılmıştır.

Köprübaşı Barajı dolgu gövdesi gratinoid temel kayası üzerine oturmaktadır. Temel kayası dayanım parametrelerini belirlemek için Hoek – Brown yenilme kriteri kullanılmıştır. Kaya kütlesinin davranışı, kayanın litolojik özellikleri, süreksizliklerin konumu, ayrışma durumu ve pürüzlülüğüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Laboratuvarda elde edilen kayma dayanımı parametreleri, yekpare sağlam kaya numunelere aittir. Sonuçlar kaya kütlesine ait gerçek davranışı temsil etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle Hoek – Brown tarafından kayalar için tanımlanan yenilme kriteri kullanılarak temel kayası malzeme parametreleri belirlenmiştir.

4.3.1. Kil çekirdek dolgu malzemesi için Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli parametrelerinin hesaplanması

Köprübaşı Barajı ve HES projesi Doğal Yapı Gereçleri Raporu'nda kil çekirdek malzemesi için malzeme alanlarından alınan geçirimsiz malzeme numunelerine üç eksenli basınç deneyi yapılarak gerilme – şekil değiştirme eğrileri çizilmiş olup malzeme kayma dayanım parametreleri belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde malzeme özellikleri Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeliyle temsil edileceğinden bu modele ait parametre değerleri kil malzemesinin Şekil 4.10'da gösterilen hiperbolü andıran gerilme – şekil değiştirme eğrisinden okunan gerilme ve deformasyon değerleri yardımıyla hesaplanmıştır. Kil malzemesine ait gerilme – şekil değiştirme eğrisi lineer gerilme - şekil değiştirme eğrisine Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli eşitlikleri kullanılarak

dönüştürülmüştür. Hiperbolü andıran gerilme – şekil değiştirme eğrisinden okunarak hesaplanan değerler Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

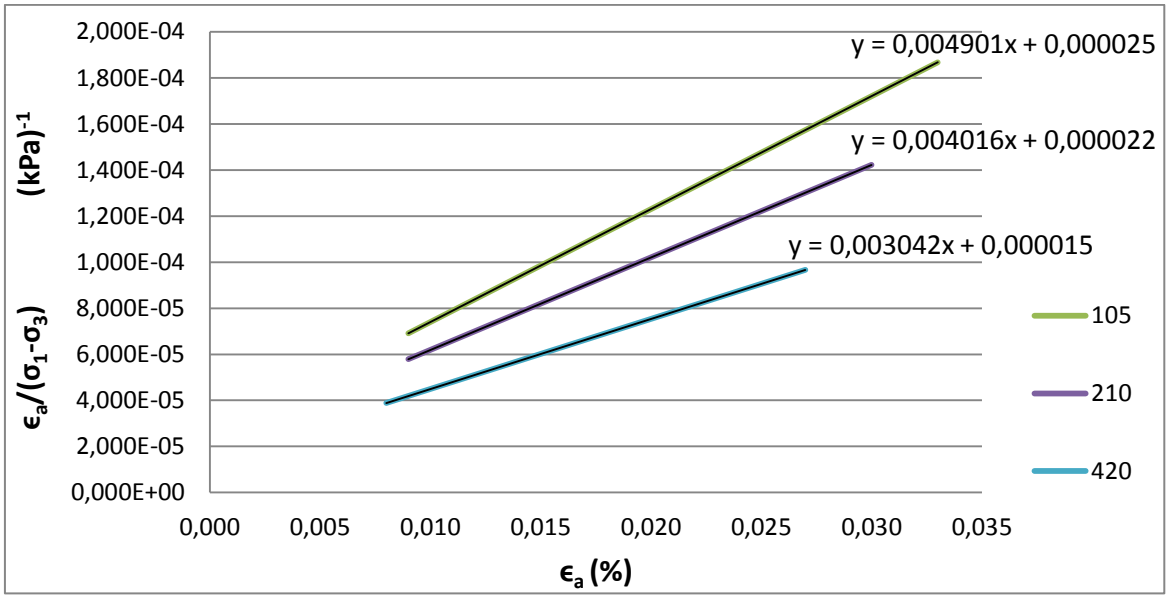


Şekil 4.10. Kil malzemesi üç eksenli deney sonucu gerilme şekil değiştirme grafiği [36]

Çizelge 4.4. Köprübaşı Barajı geçirimsiz malzemesinin dönüştürülmüş gerilme şekil değiştirme değerlerinin hesaplanması

			70 % Gerilme Değeri			95 % Gerilme Değeri		
Numune	σ_3 (KPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ (KPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)$ (KPa)	ϵ_a(%)	$\epsilon_a/(\sigma_1-\sigma_3)$ $(KPa)^{-1}$	$(\sigma_1-\sigma_3)$ (KPa)	ϵ_a(%)	$\epsilon_a/(\sigma_1-\sigma_3)$ $(KPa)^{-1}$
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

Çizelge 1'den yararlanılarak gerilme - şekil değiştirme eğrileri lineere dönüştürülmüştür. Şekil 4.11'de kil numune için dönüştürülmüş gerilme şekil değiştirme grafiği verilmiştir.

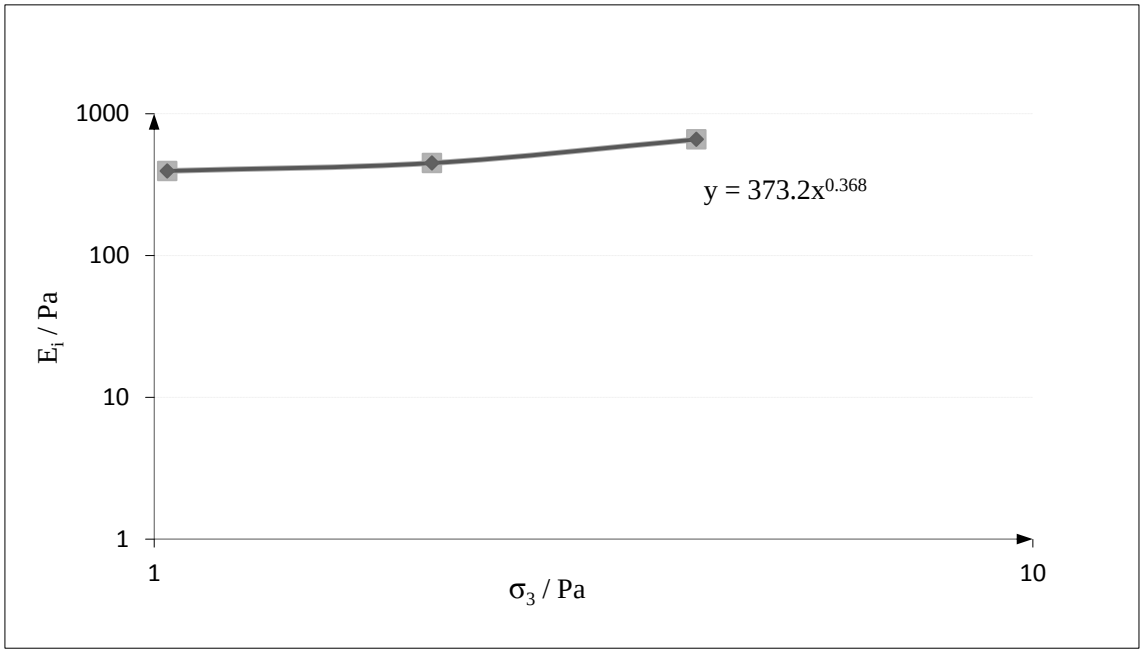


Şekil 4.11. Dönüştürülmüş gerilme – şekil değiştirme grafiği

Modül sayısı K ve modül üssü n değerlerini belirlemek için E_i/P_a ve σ_3/P_a değerleri hesaplanmıştır. E_i/P_a ve σ_3/P_a değerlerinin hesaplanması Çizelge 4.5'de gösterilmektedir. Tablo 2'de hesaplanan E_i/P_a değerlerine karşılık gelen σ_3/P_a değerleri logaritmik eksende grafik haline getirilerek Şekil 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. E_i/P_a ve σ_3/P_a Değerlerinin Hesaplanması

	σ_3 (KPa)	a $(KPa)^{-1}$	$E_i = 1/a$ (KPa)	b $(KPa)^{-1}$	$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult} = 1/b$ (KPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ (KPa)	R_f	σ_3/P_a	E_i/P_a
1	105,0	0,000025	40000,0	0,0049	204,08	186,0	0,911	1,0355	394,4773
2	210,0	0,000022	45454,5	0,0040	250,00	222,0	0,888	2,07100	448,2696
3	420,0	0,000015	66666,7	0,0030	333,33	294,0	0,882	4,14201	657,4622
						Ortalama R_f	0,8938		



Şekil 4.12. Köprübaşı Barajı için K ve n değerlerinin belirlenmesi

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. Kil malzemesi için analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.6. Kil malzeme için analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

Malzeme	γ (kN/m^3)	K	n	K_{ur}	R_f
Kil	18	373	0,36	1119	0.89

4.3.2. Filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu malzemeleri için Duncan – Chang hiperbolik malzeme modeli parametrelerinin seçilmesi

Köprübaşı Barajı'nda kullanılan filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu malzemesi için üç eksenli basınç deneyleri yapılmadığından bu malzemelere ait model parametreleri hesaplanamamıştır. Kulhawy, Duncan ve Seed (1967) 47 zemine ait drenajlı ve konsolidasyonsuz – drenajsız koşullar altında deneyler yaparak parametre değerlerini derlemişlerdir. Duncan ve Wong (1984) tarafından bu değerler 135 farklı zemin için genişletilmiştir [32]. Çizelge 4.7'de Duncan ve Wong (1984) tarafından GW- GP zemin grubu için hesaplanış parametre değerleri özetlenmiştir. Filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu

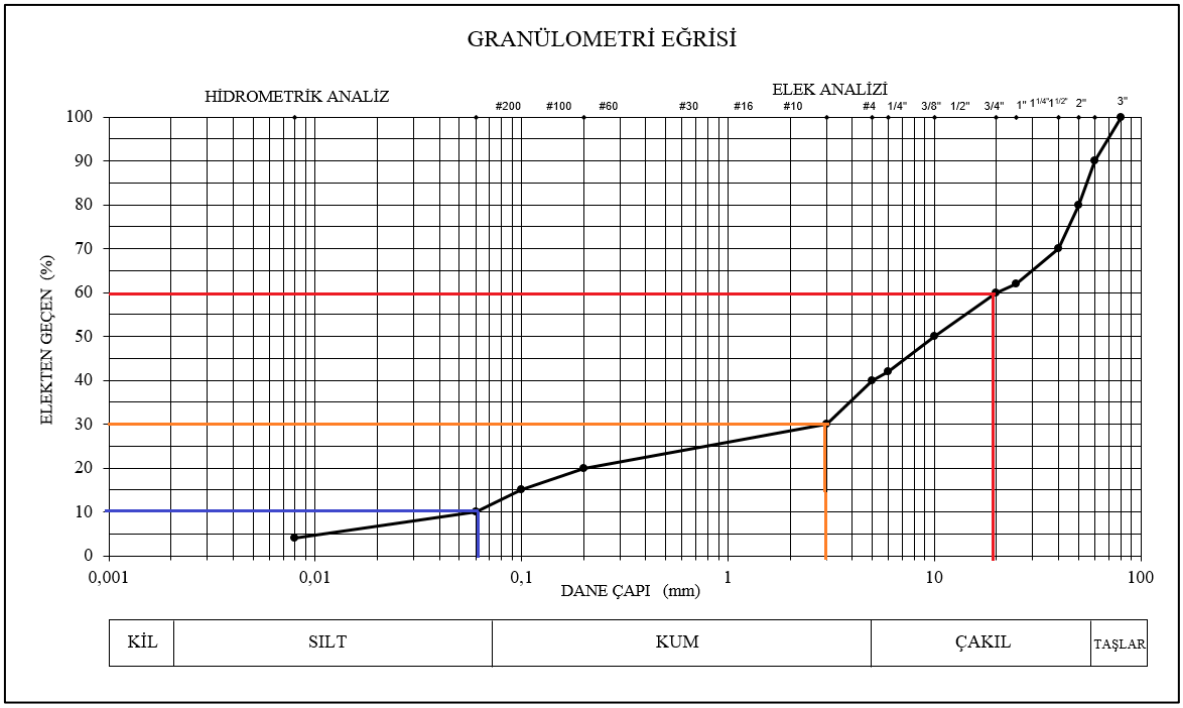
malzemeleri hiperbolik model parametreleri için benzer granülometrik özelliklere sahip zeminlere ait hesaplanmış değerler kullanılmıştır.

Çizelge 4.7. Duncan ve Wong (1984) tarafından GW – GP zemin grubu için derlenen hiperbolik model parametreleri [32]

Zemin	Zemin Tanımı	Referanslar	D 60	D 30	D 10	K	n	R_f
GW	Conglomerate Rockfill (NetZanu Dam)	Marsal, Et. Al. (1965)	47	7,5	0,9	540	0,43	0,64
GW	Granitic Gneiss Rockfill (Nica Dam)	Casagrande(1965), Marsal (1967)	79	24	4,0	210	0,51	0,64
GW	Quartzite Rockfill (Furkas Dam Shell)	Casagrande(1965)	10	-	-	540	0,48	0,65
GW	Quartzite Rockfill (Furkas Dam Transition)	Casagrande(1965)	29	-	-	950	0,52	0,59
GW	Furkas Dam Transition	Casagrande(1965)	10	-	-	690	0,57	0,91
GW	Pinzandapan Gravel	Marsal, Et. Al. (1965)	21	2,7	0,25	690	0,45	0,59
GW	Oroville Dam Rockfill	Duncan – Wong (1984)	50	15	1,0	1320	0,4	0,72
GW	Diorite Rockfill (İnfiernillo Dam)	Marsal, Et. Al. (1965)	93	42	17	340	0,28	0,71
GP	Sandy Gravel (Nica Dam Shell)	Casagrande (1965)	22	1,2	0,23	420	0,50	0,70
GP	Basalt Rockfill	Casagrande (1965), Marsal (1967)	19	3,6	1,0	450	0,37	0,61
GP	Silty Sandy Gravel (Oroville	Mall and Cordom (1963)	10	4,8	0,4	1300	0,40	0,72
GP	Amphe Clite Gravel (Oroville Dam Shell)	Marachi (1969)	13,2	4,6	0,36	1500	0,34	0,54
GP	Crushed Basaltic Rock	Shannda and Wilson (1961)	15,0	12,0	6,0	410	0,21	0,75
GP	Sandy Gravel	Boughton (1970)	10	3	0,6	2500	0,21	0,75

Filtre malzemesi

Köprübaşı Barajı Doğal Yapı Gereçleri raporunda verilen gronülometri deney sonuçlarından filtre malzemesinin D60 = 18,0; D30 = 3,2; D10 = 0,06 olarak belirlenmiştir. Filtre malzemesi için yarı geçirimli malzeme ocaklarından alınan numunelerden elde edilen granülometri eğrisi Şekil 4.13'te verilmektedir.



Şekil 4.13. Köprübaşı Barajı filtre malzemesi elek analizi deney sonucu [36]

Filtre malzemesi granülometrik özellikleri, Duncan ve Wong (1984) tarafından GW – GP zemin grubu için derlenen hiperbolik model parametreleri içerisinden Casagrande (1965), Marsal (1967) tarafından hesaplanan kötü derecelenmiş çakıl malzemesi granülometrik özellikleriyle uyum göstermektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar analizlerinde Casagrande (1965), Marsal (1967) tarafından hesaplanan kötü derecelenmiş çakıl malzemesi parametre değerleri kullanılmıştır [32]. Çizelge 4.8'de Köprübaşı Barajı filtre malzemesi ve Casagrande (1965), Marsal (1967) tarafından kötü derecelenmiş çakıl malzemede yapılan deneylerden alınan dane boyutları özetlenmiştir.

Çizelge 4.8. Köprübaşı Barajı filtre malzemesi ve Casagrande (1965), Marsal (1967) tarafından kötü derecelenmiş çakıl malzemede yapılan deneylerden alınan dane boyutları

Filtre Malzemesi	Köprübaşı Barajı	Casagrande (1965) Marsal (1967)
D60	18,00	19,00
D30	3,20	3,60
D10	0,06	1,00

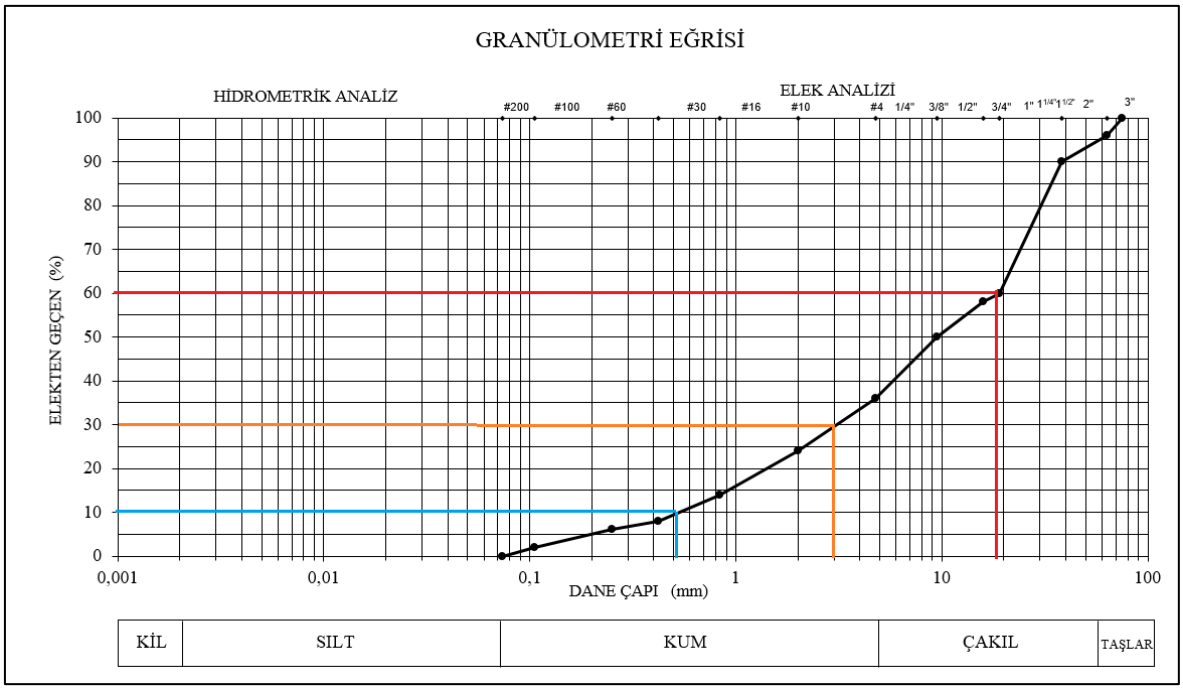
Bu değerlendirmeler sonucunda sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan filtre malzemesi özellikleri Çizelge 4.9'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.9. Analizde kullanılan filtre malzemesi parametreleri

Malzeme	γ (kN/m^3)	K	n	K_{ur}	R_f
Filtre Malzemesi	21	450	0,37	945	0,61

Kaya ufağı

Köprübaşı Barajı Doğal Yapı Gereçleri raporunda verilen gronülometri deney sonuçlarından kaya ufağı malzemesinin D60 = 18,0; D30 = 3,0; D10 = 0,35 olarak belirlenmiştir. Kaya ufağı malzemesi için geçirimli malzeme ocaklarından alınan numunelerden elde edilen gronülometri eğrisi Şekil 4.14'te verilmektedir.



Şekil 4.14. Köprübaşı Barajı geçirimli malzeme elek analizi deney sonucu [36]

Kaya ufağı malzemesi granülometrik özellikleri, Duncan ve Wong (1984) tarafından GW – GP zemin grubu için derlenen hiperbolik model parametreleri içerisinden Marsal ve ark. (1965) tarafından hesaplanan Pinzandapan çakıl malzemesi granülometrik özellikleriyle uyum göstermektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar analizlerinde Marsal ve ark. (1965) tarafından hesaplanan iyi derecelenmiş çakıl malzemesi parametre değerleri kullanılmıştır [32]. Çizelge 4.10'da Köprübaşı Barajı filtre malzemesi ve Marsal ve ark. (1965) tarafından iyi derecelenmiş çakıl malzemede yapılan deneylerden alınan dane boyutları özetlenmiştir.

Çizelge 4.10. Köprübaşı Barajı filtre malzemesi ve Marsal ve ark. (1965) tarafından iyi derecelenmiş çakıl malzemede yapılan deneylerden alınan dane boyutları

Kaya ufağı	Köprübaşı Barajı	Marsal ve ark. (1965)
D60	18	21
D30	3,0	2,7
D10	0,35	0,29

Bu değerlendirmeler sonucunda sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan kaya ufağı malzemesi özellikleri Çizelge 4.11'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.11. Analizde kullanılan kaya ufağı malzemesi parametreleri

Malzeme	γ (kN/m^3)	K	n	K_{ur}	R_f
Kaya Ufağı	21	690	0,45	1449	0,51

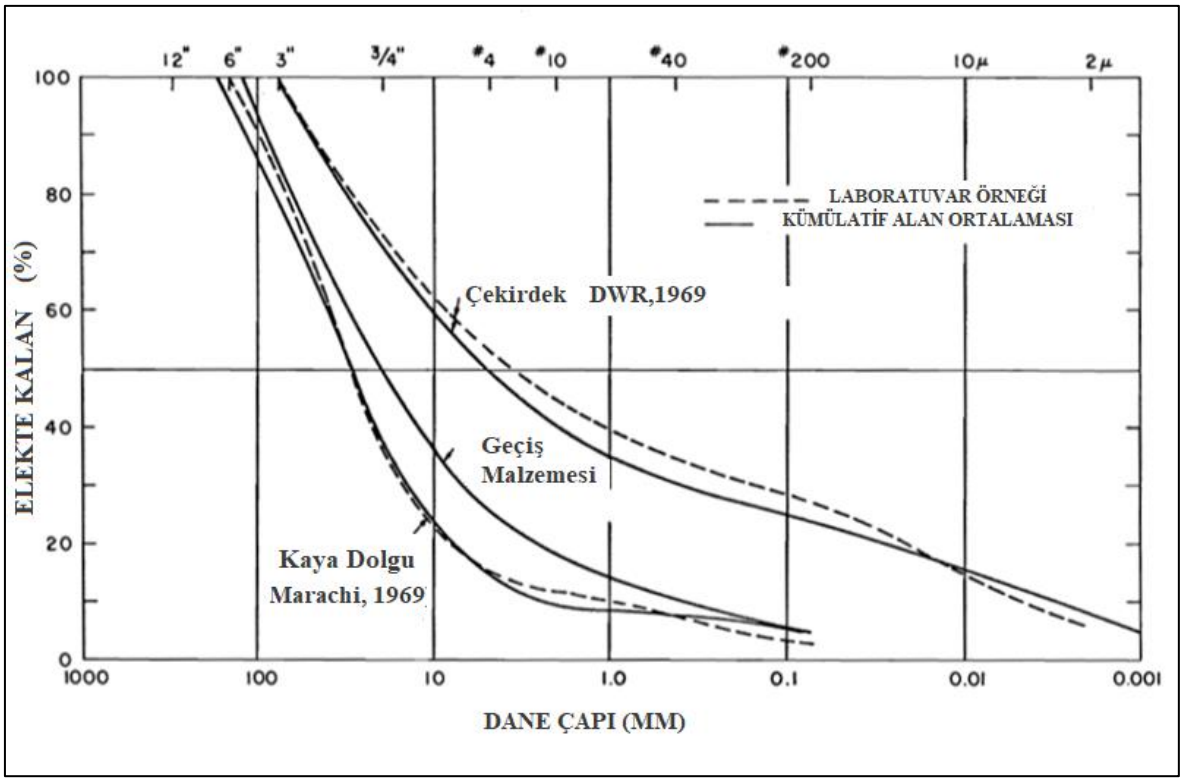
Kaya dolgu malzemesi

Köprübaşı Barajı Doğal Yapı Gereçleri raporunda verilen kaya dolgu malzemesi ocaklarından alınan karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.12'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.12. Kaya dolgu malzemesi için karot numuneleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar [36]

Özgül ağırlık kN/m^3	Su emme %	Tek eksenli basınç dayanımı (kPa)	Boyutlar (cm)
27,5	0,9	45570-72520	b=7,1; h=10

Kaya dolgu malzemesi için hiperbolik malzeme modeli parametreleri seçiminde Duncan – Wong tarafından 1984 yılında hesaplanan Oroville Barajı kaya dolgu malzeme hiperbolik model parametre değerleri kullanılmıştır. Oroville Barajına ait malzeme gronülometri eğrileri Şekil 4.15'te gösterilmektedir. Kaya dolgu malzeme için sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan hiperbolik model parametre değerleri Çizelge 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Oroville Barajı dolgu malzemelerine ait gronülometri eğrisi [39]

Çizelge 4.13. Kaya dolgu malzeme için sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan hiperbolik model parametre değerleri

Malzeme	γ (KN/m^3)	K	n	K_{ur}	R_f
Kaya Dolgu	27	1320	0,4	2772	0,72

4.3.3. Temel kayası malzeme özellikleri

Baraj gövdesine ait 0+650 km'den geçen jeolojik kesit incelenmiş olup en yaygın jeolojik birimin alt jura yaşlı granitoitler 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 mekanik kazı yapılarak kaldırılmıştır [36].

Kaya kütlesinin davranışı, kayanın litolojik özellikleri, süreksizliklerin konumu, ayrışma durumu ve pürüzlülüğüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Laboratuvarda elde edilen kayma dayanımı parametreleri, yekpare sağlam kaya numunelere aittir. Kaya kütlelerinden süreksizlikleriyle birlikte örnek alınamadığından sonuçlar kaya kütlesine ait gerçek davranışı temsil etmekte yetersiz kalmaktadır. Hoek ve Brown (1980) kayalar için yenilme kriterini ampirik olarak tanımlamış Hoek ve Brown, en büyük asal gerilim (σ_1) ile en küçük asal gerilim (σ_3), diğer bir ifadeyle normal gerilim (σ) ile makaslama dayanımı arasındaki ilişkinin eğrisel olduğunu belirlemiş ve sağlam kayalar için yenilme ölçütünü bir karekök parabolü olan ve "Hoek ve Brown Yenilme Ölçütü" olarak teknik literatüre giren bir bağıntı ile ifade etmişlerdir. Bu bağıntının "Eş. 4.1" ile görünen hali ile Hoek vd. (2002) tarafından güncellemişlerdir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci}\left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s\right)^a \qquad (4.1)$$

Burada; m_b: Kaya kütlesini temsil eden m sabitinin değeri, s, a: Kaya kütlesinin özelliklerine bağlı sabitler, σ_{ci}: Kayanın tek eksenli basınç dayanımı, σ'_1: Yenilme anındaki en büyük asal gerilme, σ'_3: Yenilme anındaki en küçük asal gerilmedir. Bu eşitliğin içerinde 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.

Tek eksenli basınç dayanımı (σ_{ci}) ve malzeme sabiti (m_i)'nin en güvenilir değerleri üç eksenli basma dayanımı deneylerinden sağlanmaktadır. Hoek, Kaiser ve Bawden (2000) kayaç malzemesi için m_i sabit değerlerini farklı formasyonlar için belirlemiştir. Çizelge 4.14'te Hoek, Kaiser ve Bawden (2000) tarafından verilen m_i değerleri görülmektedir. Köprübaşı Barajı temel kayası içim üç eksenli basınç deney sonuçları mevcut olmadığından m_i sabit değeri Çizelge 4.14'ten belirlenmiştir.

Köprübaşı temel kayası çok parçalanmış granitoid kayası üzerine oturmaktadır. Çizelge 4.14'ten m_i değeri 33 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.14. Kayaç malzemesi için m_i sabitinin değerleri

Kayaç tipi	Sınıf	Grup	Doku			
			İri	Orta	İnce	Çok İnce
SEDIMANTER	Klastik		Konglomera (22)	Kumtaşı 19	Silttaşı 9	Kiltaşı 4
			← Grovak (18) →			
	Klastik - Olmayan	Organik	← Tebeşir 7 →			
			← Kömür (8-21) →			
		Karbonatlı	Breş (20)	Sparitik Kireçtaşı (10)	Mikritik Kireçtaşı 8	
		Kimyasal		Jips 16	Anhidrit 13	
METAMORFİK	Foliasyonsuz		Mermer 9	Hornfels (19)	Kuvarsit 24	
	Düşük Foliasyonlu		Migmatit (30)	Amfibolit 31	Milonit (6)	
	Foliasyonlu *		Gnays 33	Şist (10)	Fillit (10)	Sleyt 9
MAĞMATİK	Açık ↑		Granit 33		Riyolit (16)	Obsidiyen (19)
			Granodiyorit (30)		Dasit (17)	
			Diyorit (28)		Andezit 19	
	Koyu ↑		Gabro 27	Dolerit (19)	Bazalt (17)	
			Norit 22			
	Püskürük Piroklastik		Aglomera (20)	Breş (18)	Tüf (15)	

D faktörü kayacın patlatma etkisi ve ferahlama sonucunda maruz kaldığı örselenme derecesini temsil etmektedir. Vadi tabanından alüvyon gövde dolgu inşasına başlamadan önce mekanik kazı yapılarak kaldırılmıştır. Buna göre mekanik kazı uygulanan kaya kütleleri için 0,7 alınmaktadır. Şekil 4.16'da Hoek, E:, Carranza-Torres, C., Corkum, B., (2002) tarafından hazırlanan örselenme faktörü (D) rehberi verilmiştir.

Kaya kütlesinin görünümü	Kaya kütlesinin tanımı	Önerilen *D* değeri
	Tünel açma makinesiyle mükemmel nitelikte kontrollü yapılan patlatma veya kazı bir tüneli çevreleyen sınırlı kaya kütlesinde en az örselenmeye neden olur.	$D = 0$
	Zayıf nitelikteki kaya kütlelerinde mekanik veya elle kazı (patlatma yapılmadan) çevre kaya kütlesinde en az örselenmeye neden olur. Sıkışma problemlerinin önemli taban kabarmasına sebep olduğu durumlarda, fotoğrafta görüldüğü gibi kalıcı bir taban kemeri kurulmadıkça örselenme şiddetli olabilir.	$D = 0$ $D = 0.5$ Taban kemeri yok
	Sert kaya tünelinde çok zayıf nitelikte patlatma çevre kaya kütlesinde 2 veya 3 m genişliğinde şiddetli yerel hasara sebep olmaktadır.	$D = 0.8$
	İnşaat mühendisliği yamaçlarında küçük ölçekte patlatmalar, özellikle sol taraftaki fotoğrafta gösterildiği gibi kontrollü patlatma yapılıyorsa, kaya kütlesinde az zarara neden olmaktadır. Bununla birlikte, gerilme rahatlaması bir miktar örselenmeye neden olmaktadır.	$D = 0.7$ İyi patlatma $D = 1.0$ Zayıf patlatma
	Çok büyük açık işletme maden şevleri ağır üretim patlatmalarından dolayı ve de örtü tabakasının kaldırılmasından kaynaklanan gerilme rahatlaması nedeniyle önemli örselenmeye uğramaktadır. Bazı yumuşak kayalarda kazı sökerek ve küremeyle yürütülebilmektedir ve şevlerde hasar derecesi daha azdır.	$D = 1.0$ Üretim amaçlı patlatma $D = 0.7$ Mekanik kazı

Şekil 4.16. Örselenme faktörü (D) rehberi

Genelleştirilmiş Hoek – Brown yenilme ölçütü sabitleri mb, s, a değerleri, GSİ, mb değerlerini belirlemek amacıyla Hoek, Kaiser ve Bawden, (2000) tarafından genelleştirilmiş Hoek – Brown yenilme ölçütü için tahmin edilen m_b/m_i, s, a deformasyon modülü E ve Poisson oranı ν değerleri verilmiştir. Şekil 4.17'de m_b/m_i, s, a deformasyon modülü E ve Poisson oranı ν değerleri kaya kütlesi yapısı ve yüzey koşullarına göre belirlenmektedir.

GENELLEŞTİRİLMİŞ HOEK - BROWN YENİLME ÖLÇÜTÜ

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(mb\frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s\right)^a$$

σ'_1 = en büyük etkin asal gerilim
σ'_3 = en küçük etkin asal gerilim
σ_c = kayaç malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı

m_b, s, a, kaya kütlesinin bileşimine yapısına ve yüzey koşullarına bağlı sabitler

YAPI		YÜZEY KOŞULLARI	ÇOK İYİ Çok pürüzlü, ayrışmamış	İYİ Pürüzlü, az ayrışmış veya alter olmuş	ORTA Yumuşak, orta derecede ayrışmış veya alter olmuş yüzeyler	ZAYIF Kaygan, çok ayrışmış, köşeli parçacıklar içeren dolgulu veya sıvanmalı yüzeyler	ÇOK ZAYIF Kaygan, çok ayrışmış, yumuşak kil sıvalı yüzeyler veya kil dolgular
	BLOKLU - 3 ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütlesi	m_b/m_i	0.6	0.4	0.26	0.16	0.08
		s	0.190	0.062	0.015	0.003	0.0004
		a	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
		E_m	75000	40000	20000	9000	3000
		υ	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25
		GSI	85	75	62	48	34
	ÇOK BLOKLU - Dört veya daha fazla sayıda süreksizliklerin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kenetlenmiş, kısmen örselenmiş kaya kütlesi	m_b/m_i	0.4	0.29	0.15	0.11	0.07
		s	0.0062	0.021	0.003	0.001	0
		a	0.5	0.5	0.5	0.5	0.53
		E_m	40000	24000	9000	5000	2500
		υ	0.2	0.25	0.25	0.25	0.3
		GSI	75	65	48	38	25
	BLOKLU / ÖRSELENMİŞ - Birbirini kesen çok sayıda süreksizliklerin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve / veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütlesi	m_b/m_i	0.24	0.17	0.12	0.08	0.06
		s	0.012	0.004	0.001	0	0
		a	0.5	0.5	0.5	0.5	0.55
		E_m	18000	10000	6000	3000	2000
		υ	0.25	0.25	0.25	0.3	0.3
		GSI	60	50	40	30	20
	PARÇALANMIŞ - Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birlikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi	m_b/m_i	0.17	0.12	0.06	0.06	0.04
		s	0.004	0.001	0	0	0
		a	0.5	0.5	0.5	0.55	0.6
		E_m	10000	6000	3000	2000	1000
		υ	0.25	0.25	0.3	0.3	0.3
		GSI	50	40	30	20	10

Şekil 4.17. Genelleştirilmiş Hoek – Brown yenilme ölçütü için tahmin edilen mb/mi, s, a deformasyon modülü E ve Poisson oranı ν

Buna göre, analizlerde kullanılmak üzere literatürden elde edilen Hoek – Brown yenilme kriteri parametreleri GSI= 20, m_i= 29, D= 0,7; σ_{ci}= 100 MPa, malzeme sabitleri m_b= 0,358; s= 9,22*10^{-6}, a= 0,554'dır.

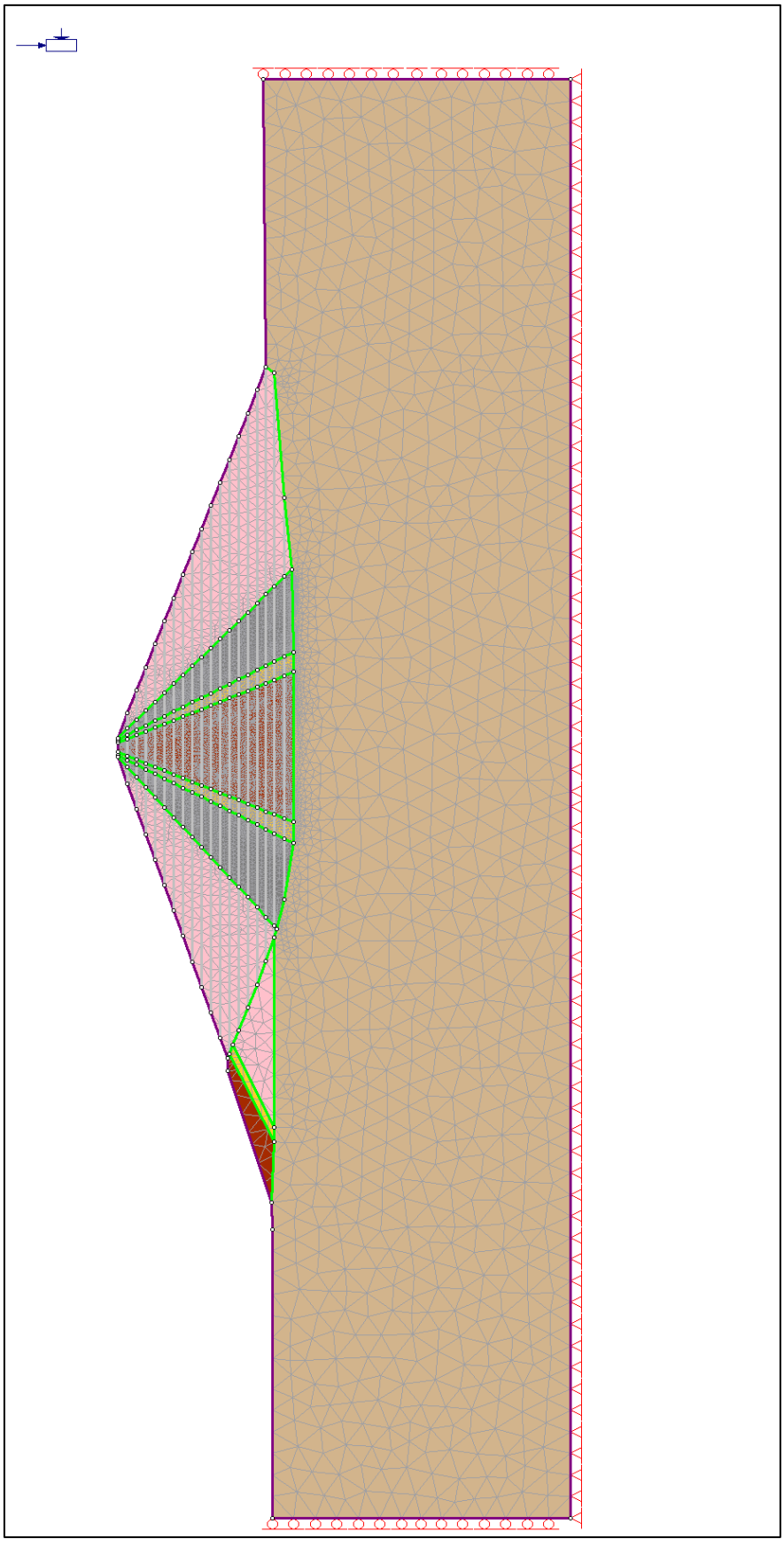
Temel kayasına ait dayanım parametreleri Hoek vd. (2002) tarafından güncelleştirilen "Eş.4.2" ve "Eş. 4.3" kullanılarak c= 262 MPa, ϕ= 40,70^o olarak belirlenmiştir [40].

$$\phi' = \sin^{-1}\left(\frac{6am_b(s+m_b\,\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+\,6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}\right) \quad (4.2)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\,[(1+a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}]^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \quad (4.3)$$

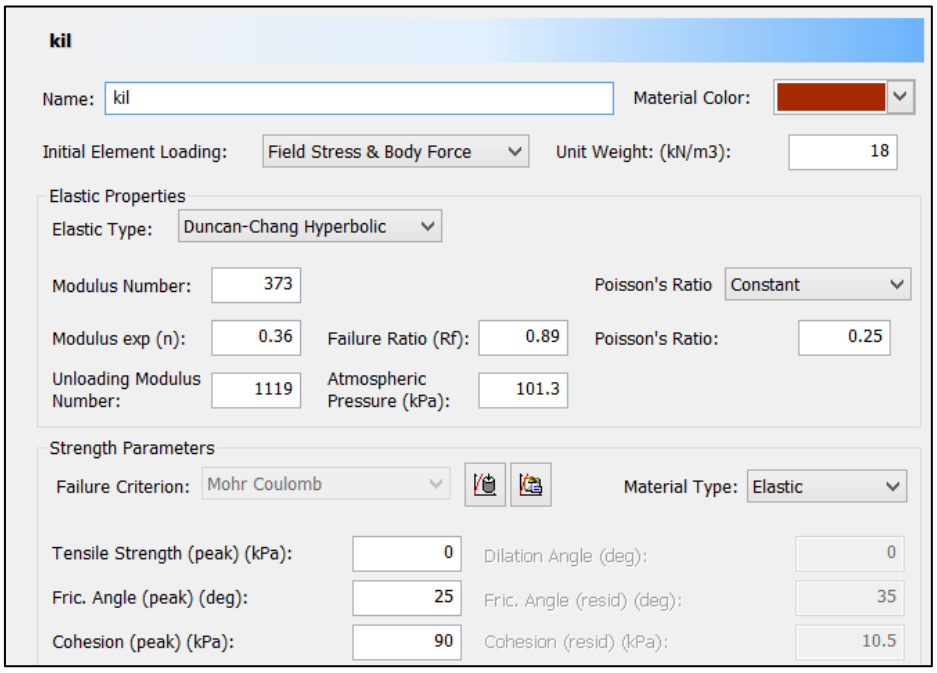
4.4. Model Hakkında Genel Bilgiler

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 yığılmalarının oluşması beklenen bölgede eleman ağı yoğunluğu arttırılmıştır. Temelin yanlardan x yönüne hareketi, altta ise hem x hemde y yönünde hareketi sınırlandırılmıştır. İnşaat sonrası ve su tutma sonrası için iki farklı değerlendirme yapılmıştır. Köprübaşı Barajı gövde modeli genel görünümü ve sonlu elemanlar ağı Resim 4.6'da görülmektedir.

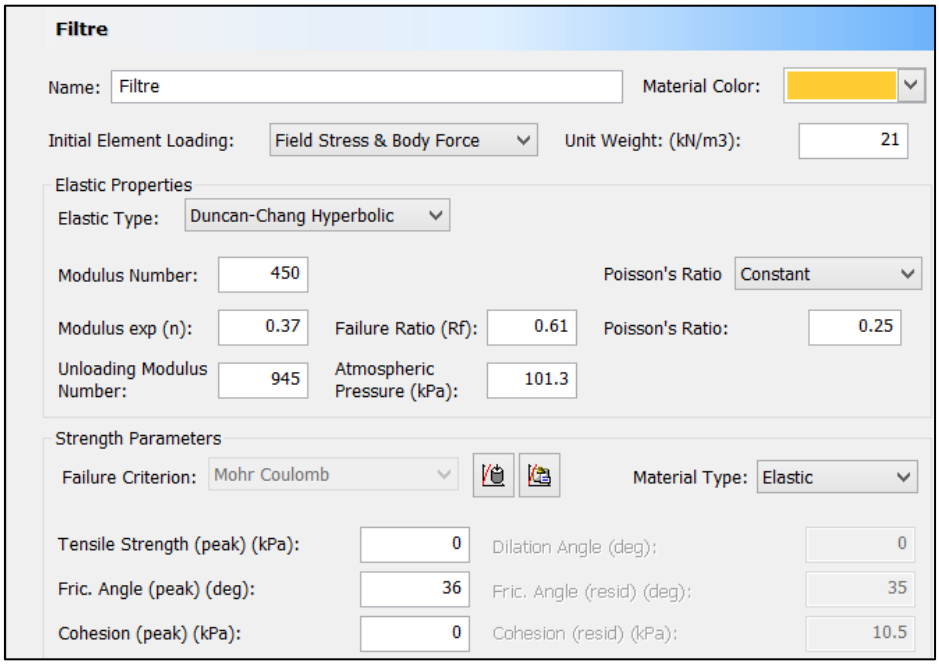


Resim 4.6. Köprübaşı Barajı genel görünüşü ve sonlu elemanlar ağı – inşaat sonu

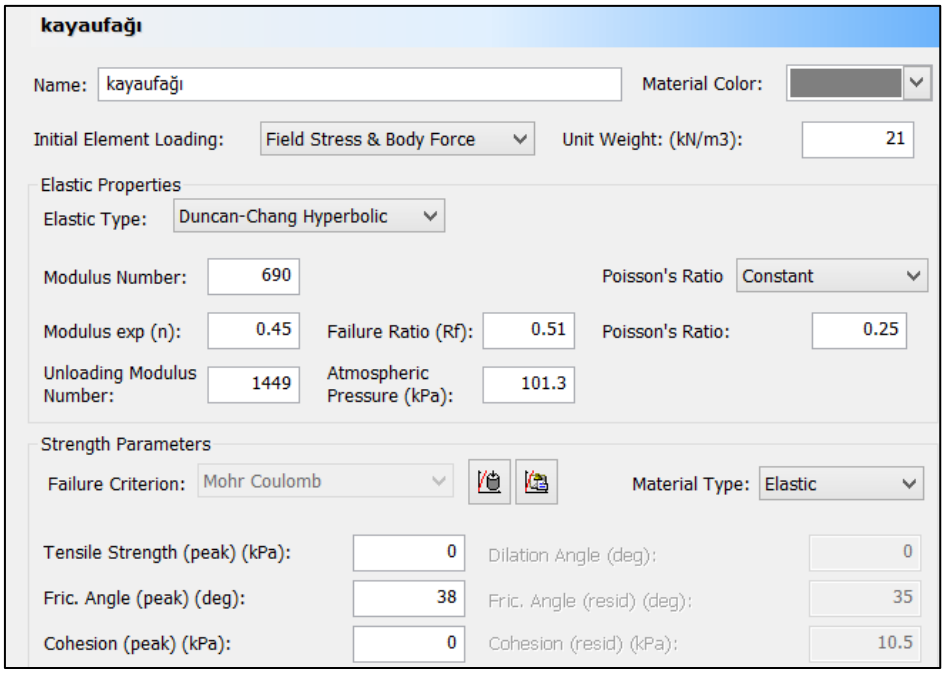
Kil çekirdek, filtre, kaya ufağı ve kaya dolgu malzemesi için belirlenmiş olan Duncan – Chang hiperbolik malzeme özellikleri Resim 4.7 (a), (b), (c), (d)'de görüldüğü üzere Phase2 sonlu elemanlar yazılımına girilmiştir.



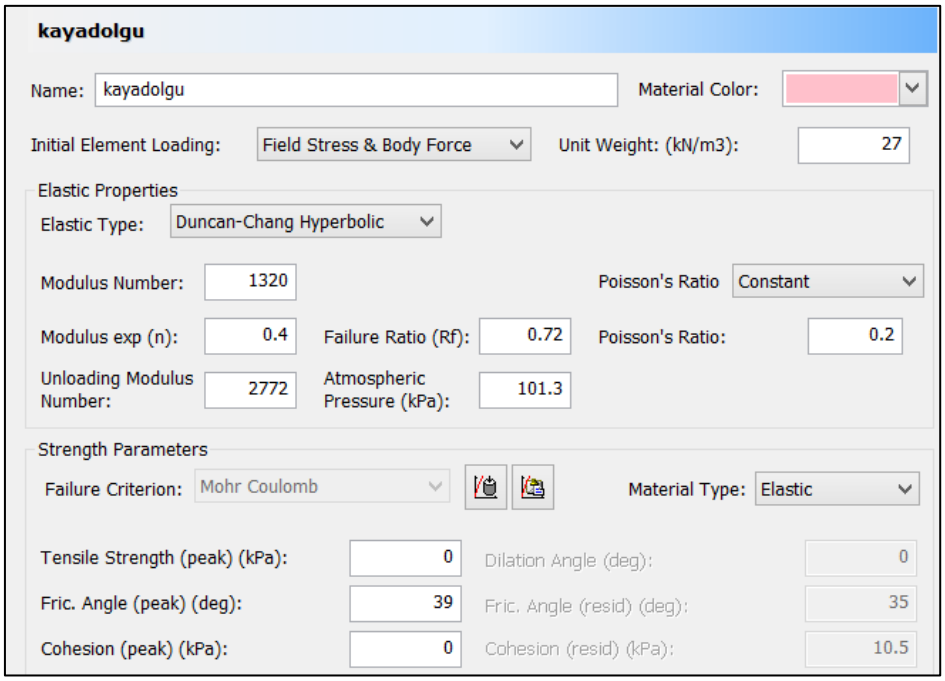
Resim 4.7.(a). Kil çekirdek malzeme özellikleri



Resim 4.7.(b). Filtre malzeme özellikleri

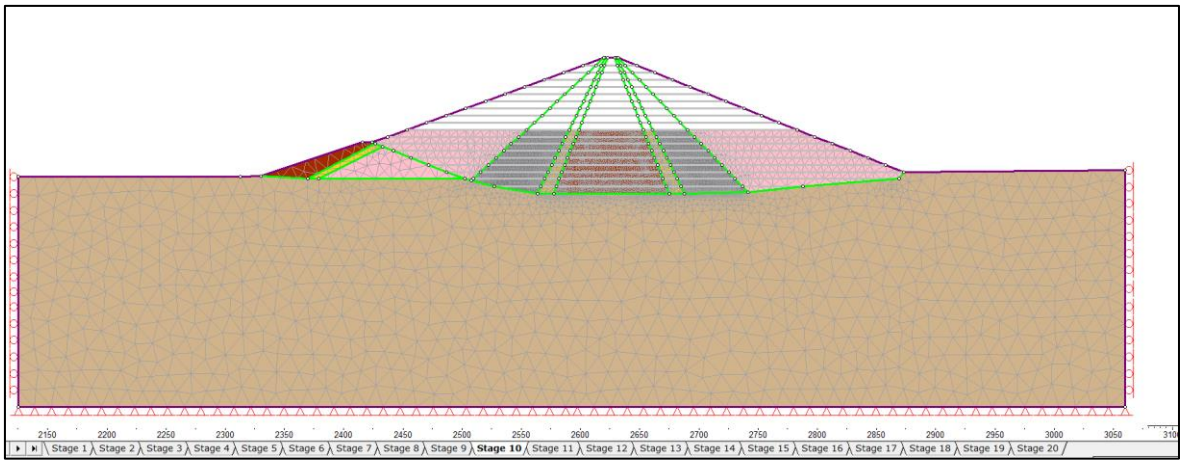


Resim 4.7.(c). Kaya Ufağı malzeme özellikleri



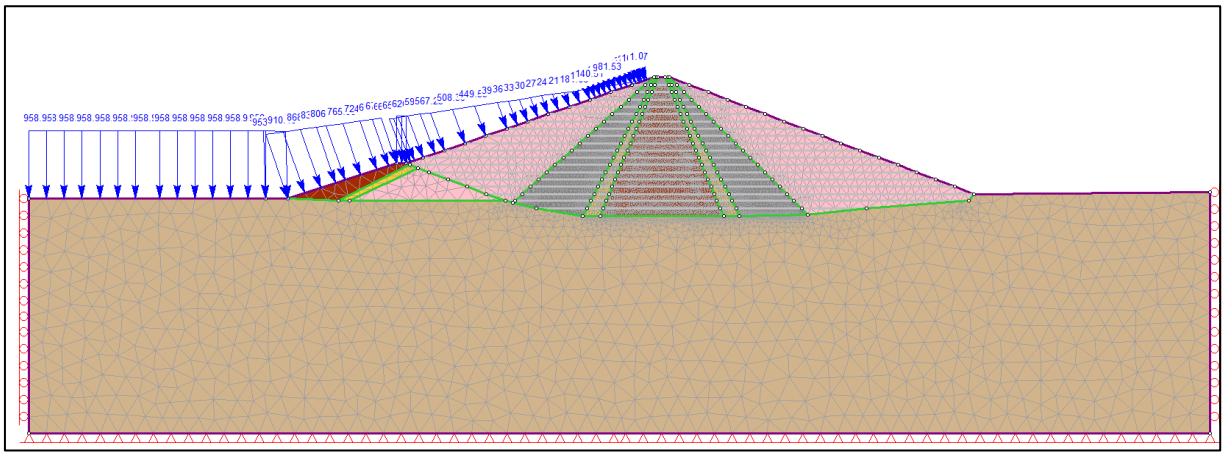
Resim 4.7.(d). Kaya dolgu malzeme özellikleri

Baraj gövdesi gerçek inşa koşullarında kademe kademe serilip sıkıştırılmaktadır. Bu davranışı temsil etmek amacıyla analizlerde gövde her biri 6 m yüksekliğinde olan 20 kademede inşa edilmiştir. Resim 4.8'de gövde dolgusunun toplam 20 kademe olarak modellendiği ve 10. Kademe yüklenmesi durumundaki hali görülmektedir.



Resim 4.8. Dolgunun kademeli inşası (10. Kademe)

Su tutmadan sonraki durumu temsil etmek amacıyla su gerçekte olduğu gibi dolgu inşaatınn bitmesiyle beraber kademeli olarak yüklenmiştir. Köprübaşı Barajı su tutma durumu sonlu elemanlar ağı Resim 4.9'da görülmektedir.

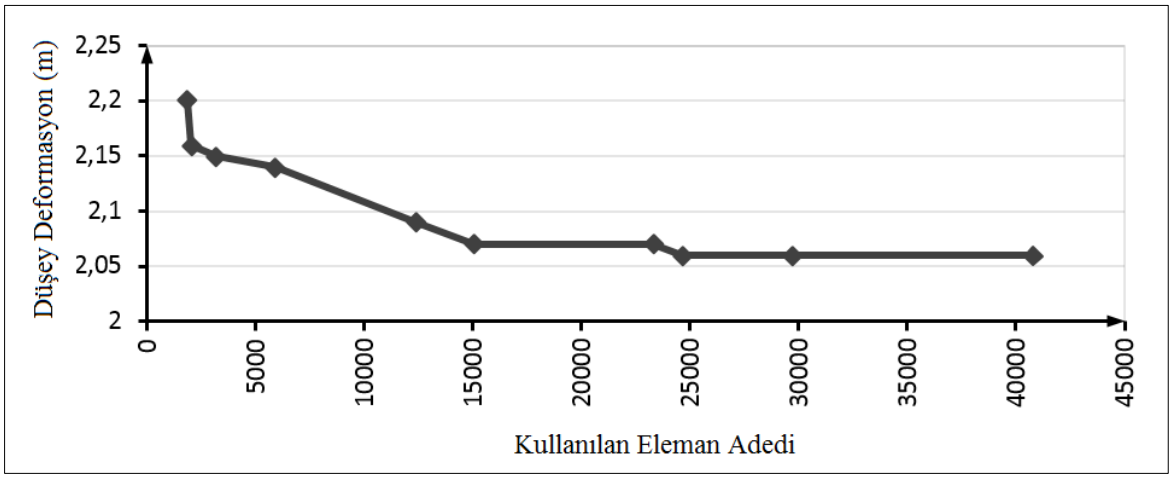


Resim 4.9. Köprübaşı Barajı sonlu elemanlar ağı - su tutma durumu

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Sonlu Eleman Sayısının Düşey Deformasyonlara Etkisi

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 5.1'de sonlu eleman adedi artışının deformasyonlarda meydana getirdiği değişim görülmektedir.

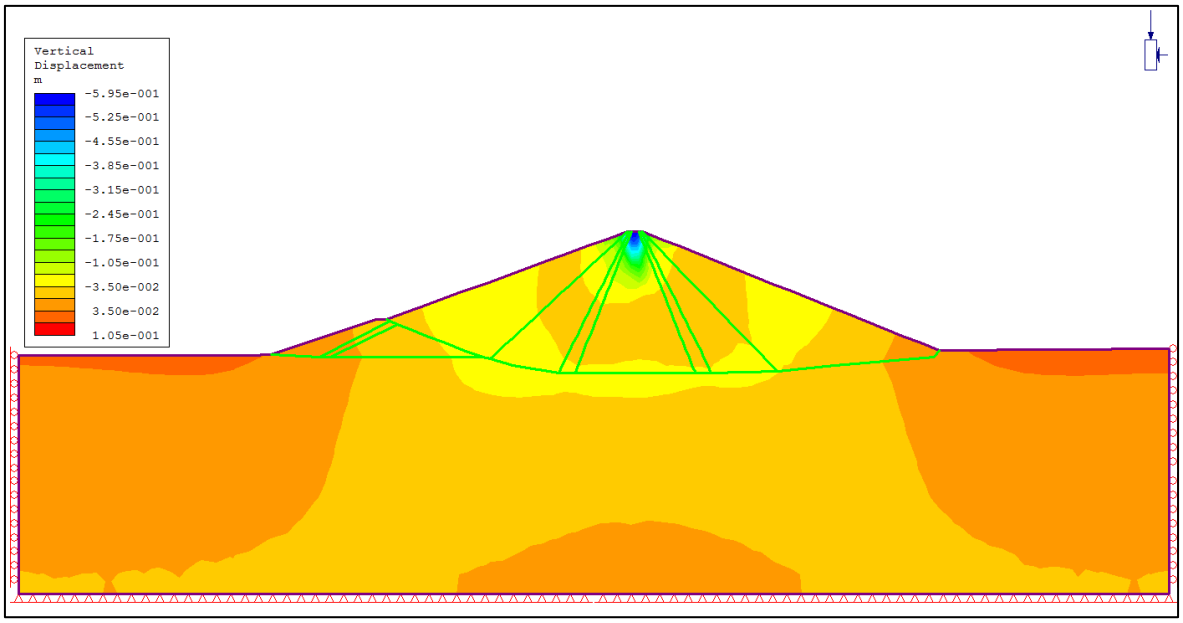


Şekil 5.1. Sonlu eleman adedinin artışının düşey deformasyonlara etkisi

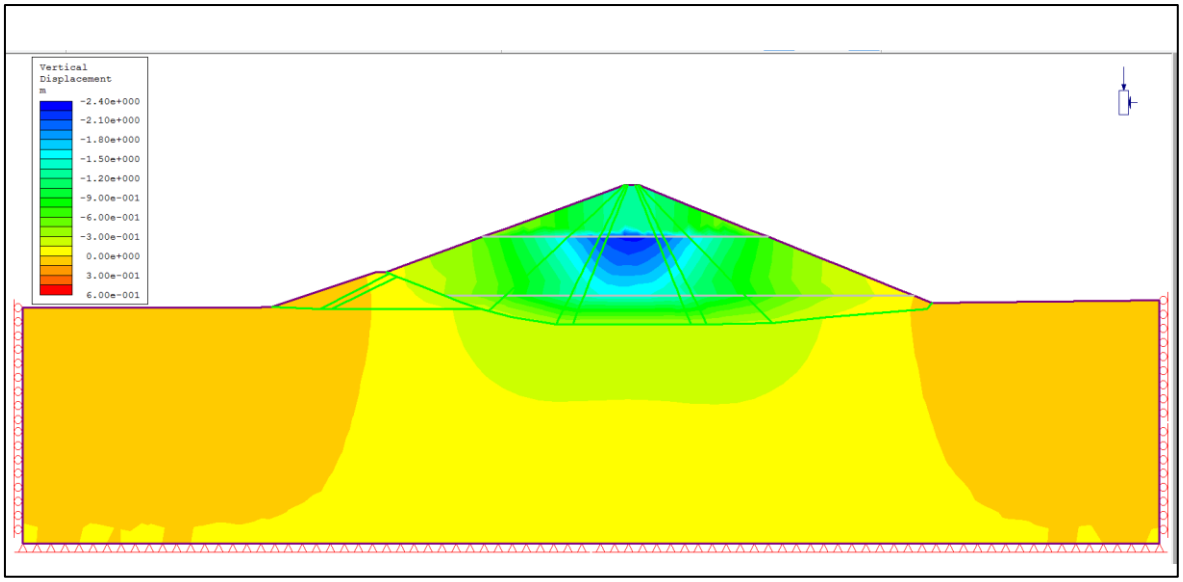
İlk olarak Köprübaşı Barajı gövde modeli 2000 adet üçgen sonlu elemana bölünmüştür. Sonlu elemanlar adedi arttırılarak analizler sürdürülmüştür. 15080 adet sonlu eleman ile yapılan analizlerden sonraki eleman artışlarının düşey deformasyonları çok küçük miktarda etkilediği görülmüştür. En optimum eleman adedi 15080 olarak belirlenmiş ve analizler bu eleman adedine göre yapılmıştır.

5.2. Gövdenin Kademeli Olarak Modellenmesi

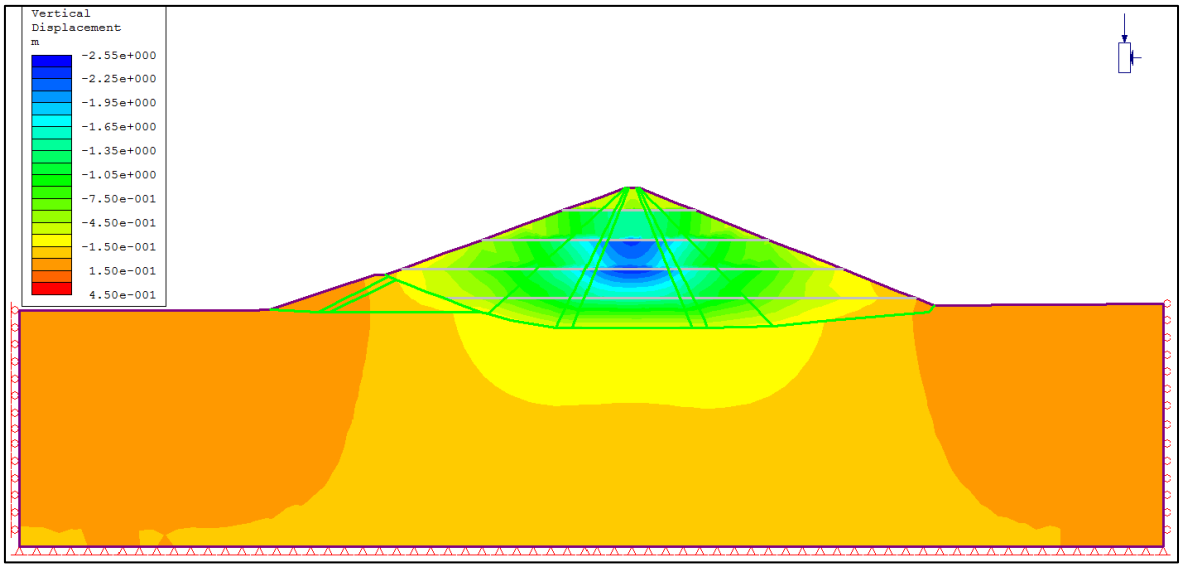
Analizlerde gövde kademeli olarak modellenmiştir. Kademeli dolgunun deformasyon miktarına etkisi gözlemlemek amacıyla 1, 4, 6, 10, 20, 39 aşamalı analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1 (a), (b), (c), (d), (e), (f)'de 1, 4, 6, 10, 20, 39 kademeli düşey deformasyon analiz sonuçları görülmektedir.



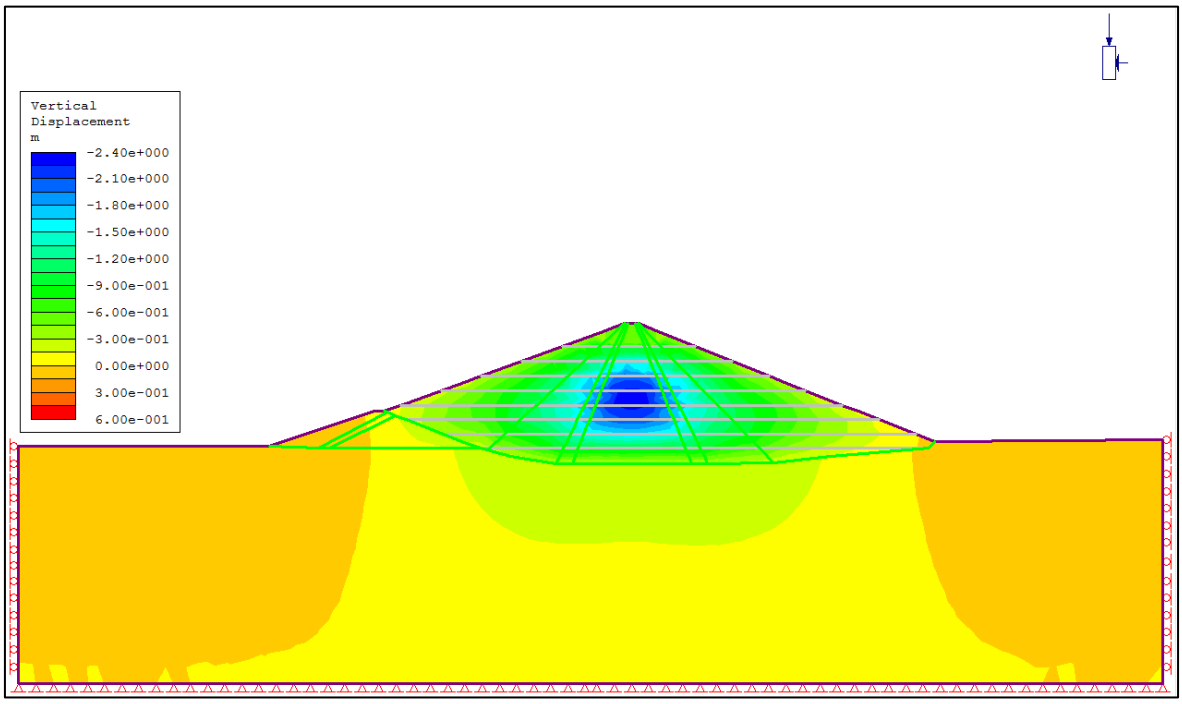
Resim 5.1.(a). Tek kademeli modelde düşey deformasyon



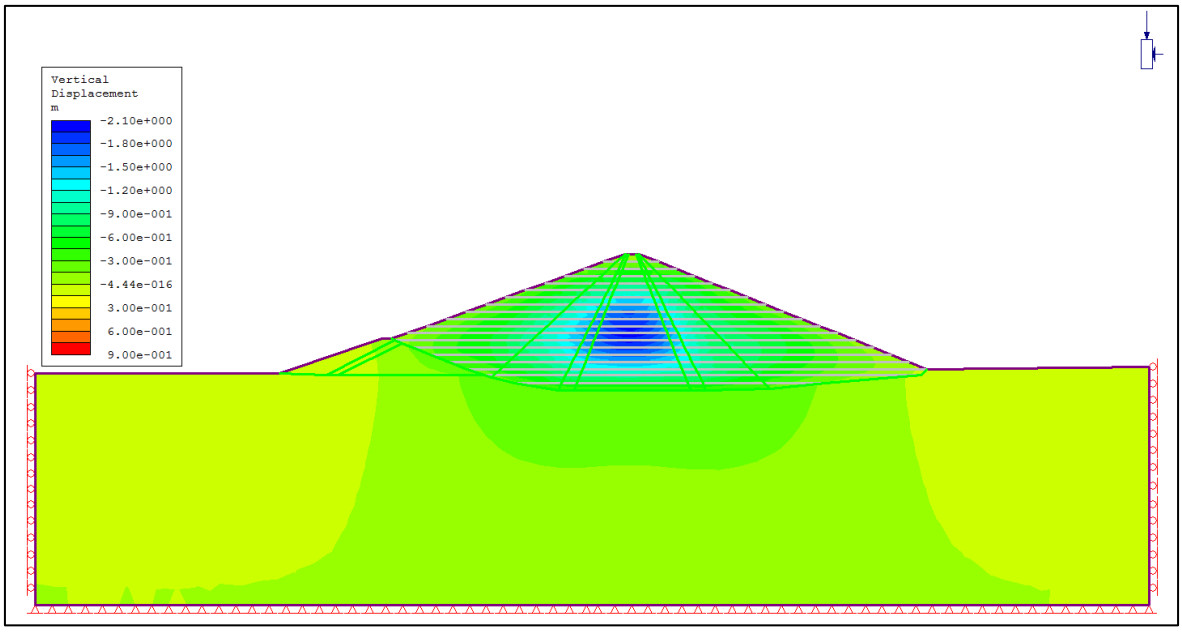
Resim 5.1.(b). 4 kademeli modelde düşey deformasyon



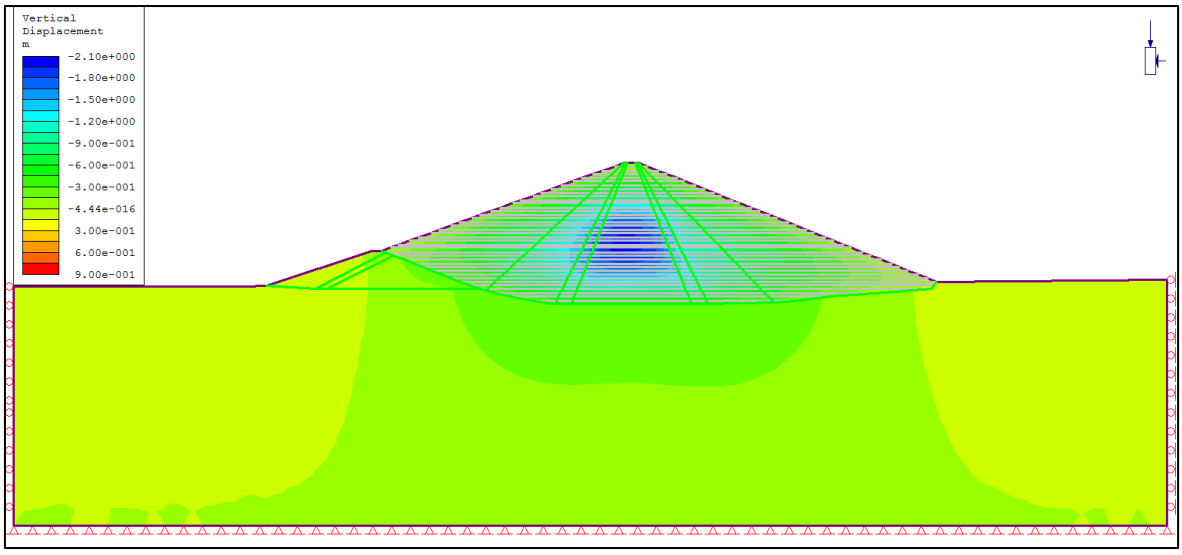
Resim 5.1. (c). 6 kademeli modelde düşey deformasyon



Resim 5.1. (d). 10 kademeli model modelde düşey deformasyon

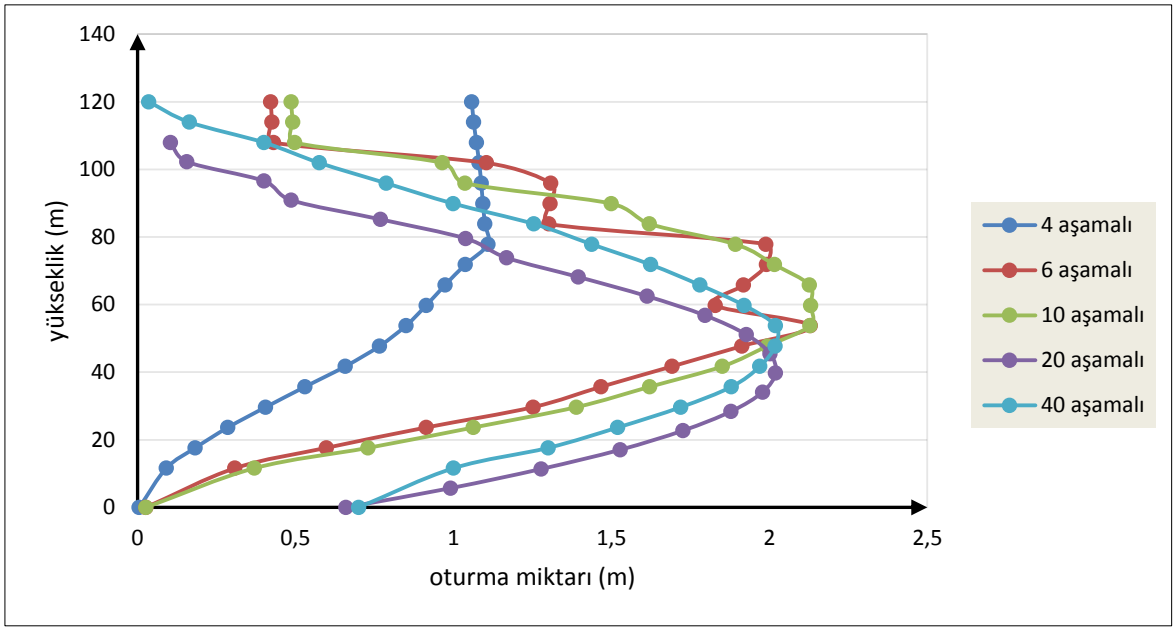


Resim 5.1. (e). 20 kademeli modelde düşey deformasyon



Resim 5.1. (f). 39 kademeli modelde düşey deformasyon

Kademe sayısının arttırılmasının hesaplanan düşey deformasyon miktarında meydana getirdiği değişim Şekil 5.2 ‘de gösterilmektedir.

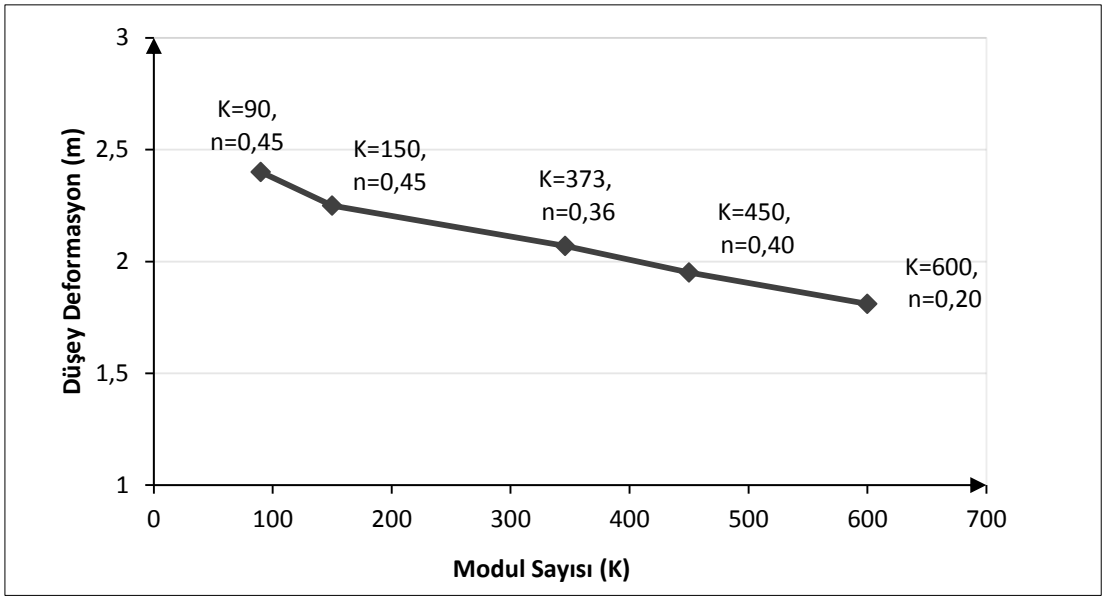


Şekil 5.2. Aşama sayısına bağlı olarak düşey deformasyonun değişimi

Gövdenin 3 m yerleştirilip sıkıştırılması durumu (39 aşama) ile 6 m yerleştirilip sıkıştırılması durumunda (20 aşama) sonuçların birbirine çok yakın çıktığı görülmüştür. Dolgunun birden yüklendiği durumda ise maksimum deformasyon krette meydana gelmektedir. Aşama sayısı arttıkça maksimum deformasyon gövdenin ortası ile alt kısımları arasında oluştuğu görülmüştür.

5.3. Duncan - Chang Hiperbolik Malzeme Modeli Parametrelerinin Düşey Deformasyonlar Üzerindeki Etkisi

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= 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= 373, n= 0.36 R_f= 0.89 ve literatürde kullanılmış olan kil malzemesi parametre değerleri kullanılarak düşey deformasyonlar hesaplanmıştır [41]. Malzeme parametrelerinin düşey deformasyonlarda meydana getirdiği değişim Şekil 5.3'te verilmektedir.



Şekil 5.3. Kil çekirdek malzemede farklı Duncan - Chang hiperbolik malzeme modeli parametreleri kullanılarak düşey deformasyonların hesaplanması

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 büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Modül sayısı K'nin artması ile düşey deformasyonların azaldığı görülmüştür.

5.4. Malzemenin Dayanım Parametrelerinin Düşey Deformasyonlara Etkisi

Değerlendirilen diğer bir husus ise kil çekirdek malzemenin dayanım parametrelerinde meydana gelen değişimin deformasyonlara olan etkisidir. USBR (1988) tarafından 1100 adet zemin numunesi üzerinde deneyler yapılmış ve deney sonuçlarına göre her zemin sınıfı için ortalama malzeme özellikleri derlenmiştir. Bu çalışmaya göre CL zemin sınıfı için ortalama olarak önerilen kohezyon değeri c=90 kPa, içsel sürtünme açısı değeri ϕ=25°'dir [42]. Önerilen dayanım parametreleri esas alınarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. İlk olarak ortalama kohezyon değeri sabit tutularak (c=90 kPa), içsel sürtünme açısı 15° ve 30° ile deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak ortalama içsel sürtünme açısı değeri (ϕ=25°) 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 ϕ=10° değerleriyle deformasyon analizi yapılmıştır. Analizlerde sonlu eleman sayısı 15080, Duncan_ Chang hiperbolik malzeme modeli parametreleri K=346, n=0,17, R_f=0,84'tir ve dolgu 20 kademede modellenmiştir. Çizelge 5.1'de kohezyon ve içsel

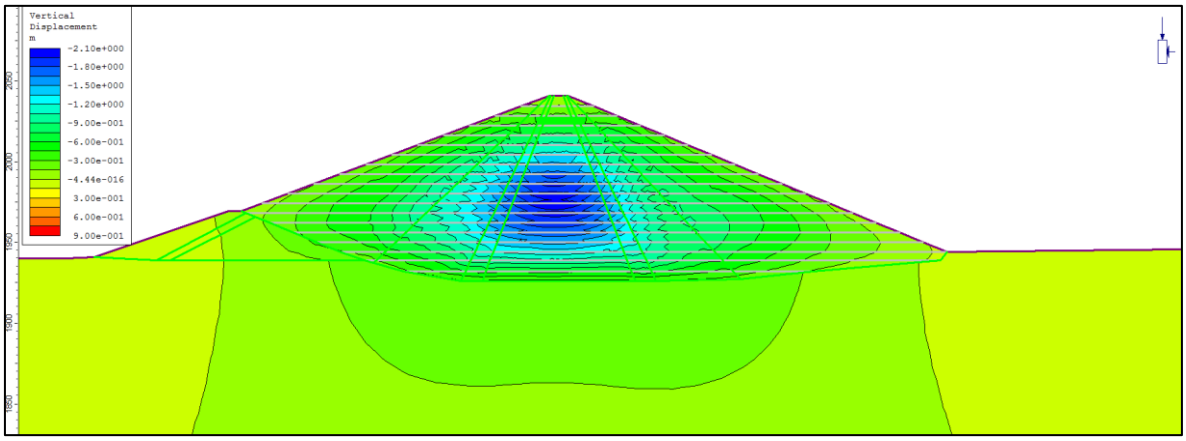
sürtünme açısı değerlerinin değiştirilmesiyle elde edilen düşey deformasyon değerleri özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Kohezyon ve içsel sürtünme açısının değiştirilmesiyle elde edilen düşey deformasyonlar

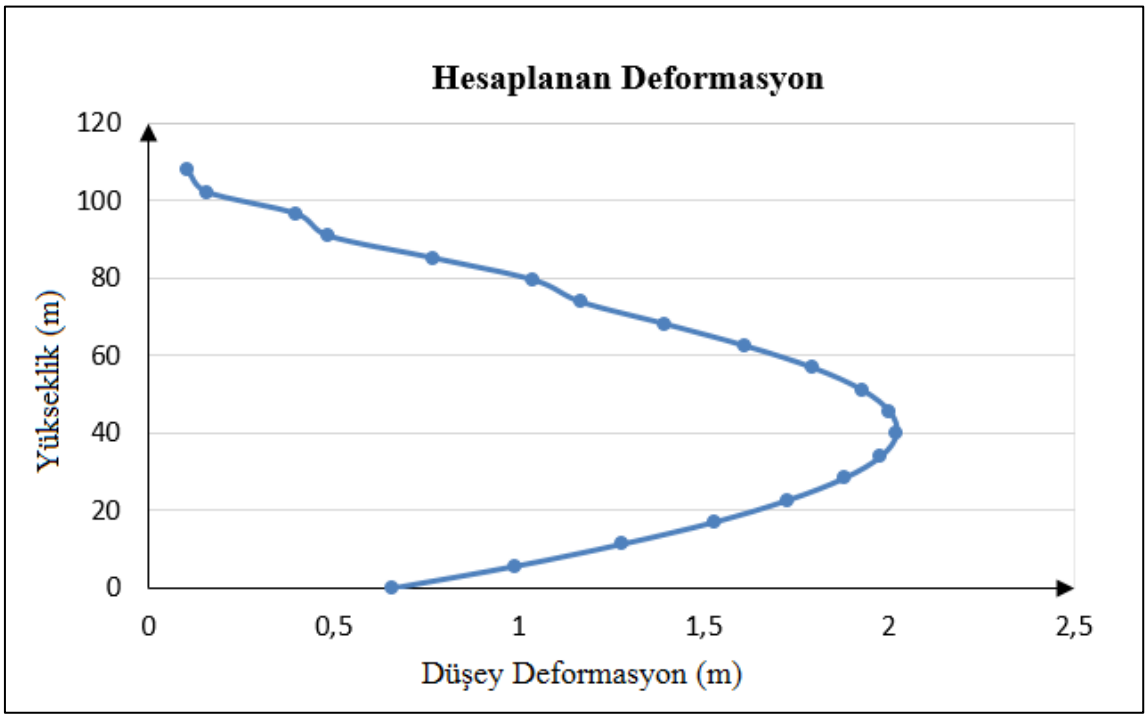
Kohezyon (kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (°)	Düşey Deformasyon Miktarı (m)
90	15	2,32
90	25	2,07
90	30	2,04
80	25	2,11
70	25	2,12
100	25	2,05
100	10	2,4

Kohezyon değeri sabit tutularak (c = 90 kPa) içsel sürtünme açısının %40 azaltılması düşey deformasyon miktarını %12 artmıştır, içsel sürtünme açısının %20 arttırılması düşey deformasyon miktarını %1,4 azalmıştır. İçsel sürtünme açısı değerinin sabit tutularak (ϕ = 25°) kohezyon değerinin %22 azaltılması düşey deformasyon miktarını %2,4 arttırmıştır. Buradan görüleceği üzere dayanım parametrelerindeki değişimler düşey deformasyon miktarını sınırlı miktarda etkilemektedir.

Yukarıdaki parametrik çalışmaların değerlendirilmesiyle nihai olarak 15080 adet üçgen ağ elemana bölünen ve 20 kademede inşa edilen sonlu elemanlar analiz sonuçlarında maksimum düşey deplasman 2,05 m olarak hesaplanmıştır. Deformasyon analizlerinde en fazla deformasyonun baraj gövdenin 0,4 H yüksekliğinde gerçekleştiği baraj kretinde ise deformasyonların çok küçük olduğu Resim 5.2'den gözlemlenmiştir. Şekil 5.4'de düşey deformasyonların kil çekirdek içerisindeki değişim grafiği verilmektedir.

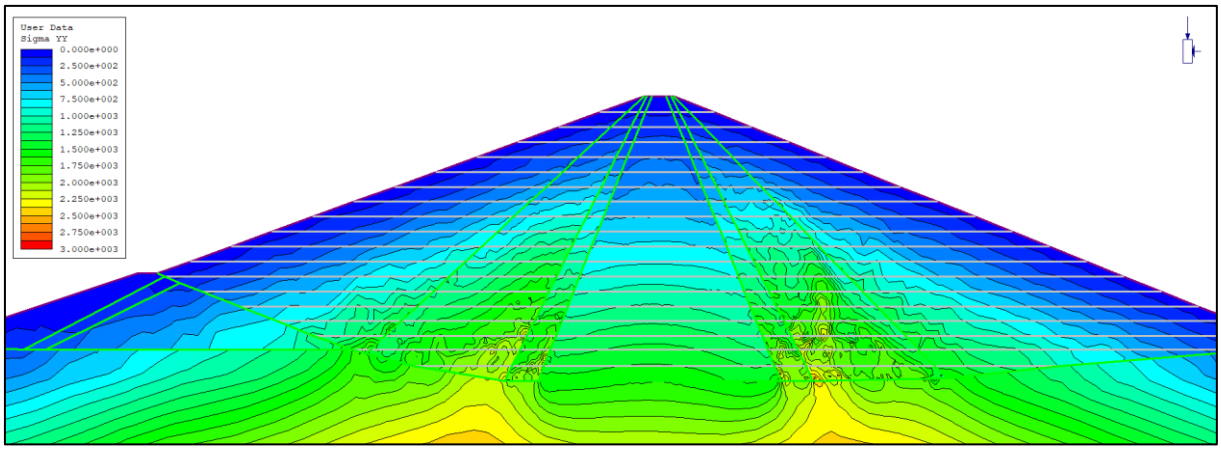


Resim 5.2. Sonlu elemanlar analizi sonucu baraj gövdesinde hesaplanan düşey deformasyon



Şekil 5.4. Sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen düşey deformasyon grafiği

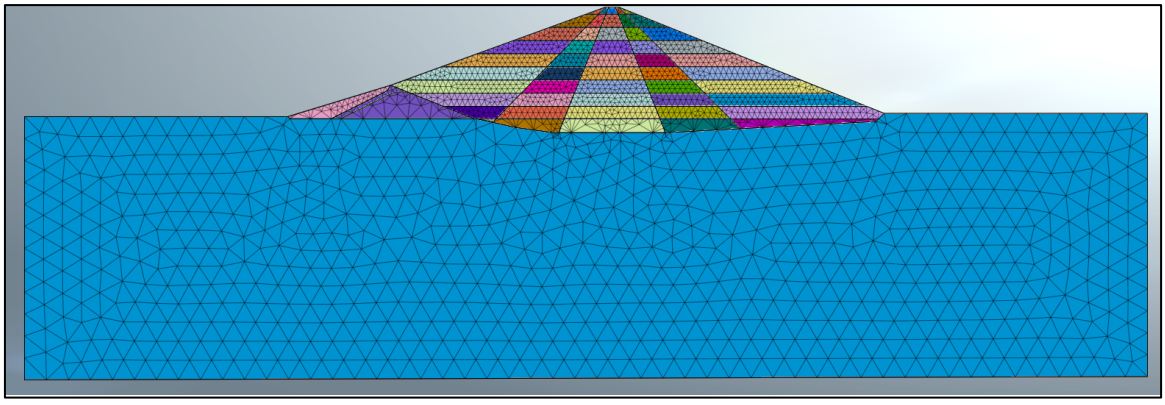
Köprübaşı Barajında kil çekirdek ile kabuk malzemesinin farklı deformasyon modüllerine sahip olmasından dolayı (kilin daha çok oturma eğiliminde olması) aralarında farklı oturma davranışı olmasına sebep olmuştur. Bu farklılık çekirdekten kabuğa bir yük transferine sebep olmaktadır. Köprübaşı Barajında kemerlenme etkisi olduğu Resim 5.3'te görülmektedir.



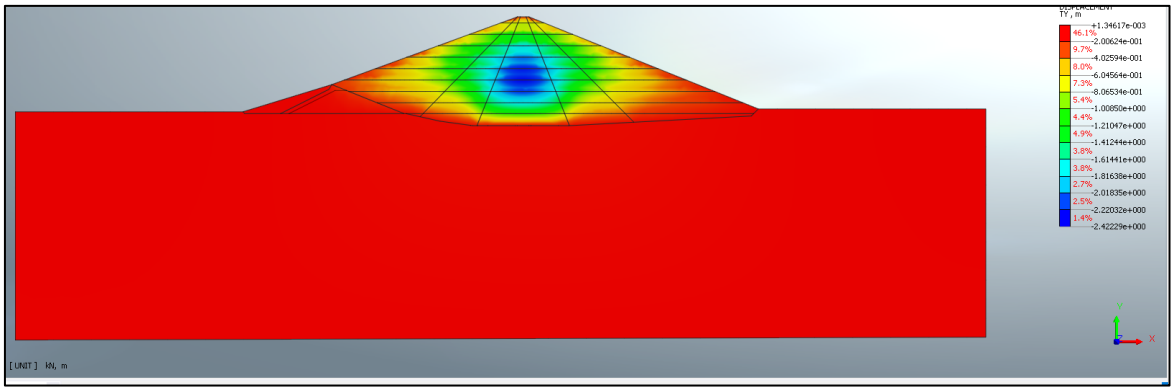
Resim 5.3. Köprübaşı Barajı düşey gerilmeleri

Su tutmadan sonraki durum için yapılan analizlerde gövdede meydana gelen düşey deformasyon 2,12 m olarak hesaplanmıştır. Su tutma durumunda inşaat sonu durumuna göre oturma miktarında çok büyük değişim gözlemlenmemiştir.

Köprübaşı Barajı gövdesinin Midas NTS NX sonlu elemanlar yazılımı ile de deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Midas NTS NX sonlu elemanlar yazılımı ile Phase2 sonlu elemanlar yazılımlarından elde edilen düşey deformasyonlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda her iki yazılımda birbirine uyumlu düşey deformasyon değeri hesaplanmıştır. Midas NTS NX modeli ve analiz sonuçları Resim 5.4 ve Resim 5.5'te verilmiştir.

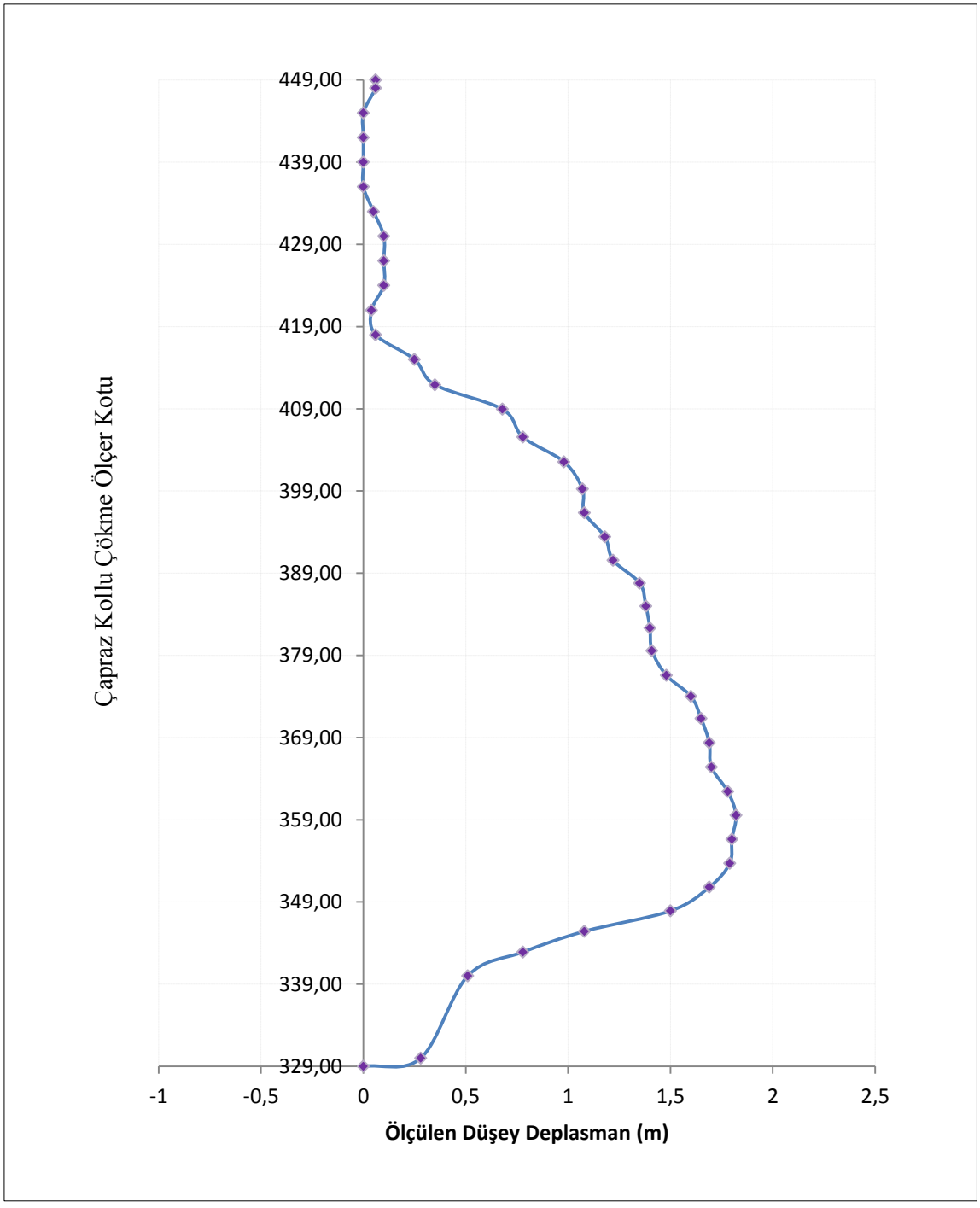


Resim 5.4. Midas NTS NX sonlu elemanlar yazılımı ile gövdenin modellenmesi



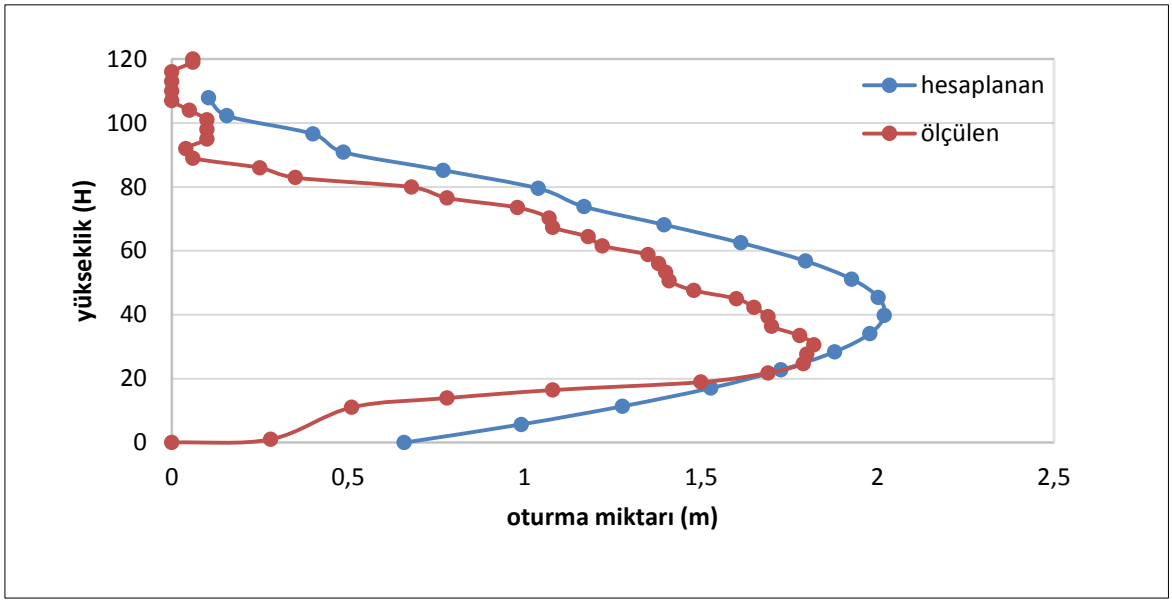
Resim 5.5. Midas NTS NX sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan düşey deformasyon

Baraj gövdesi km 0+650'de bulunan 39 adet manyetik halka ile gövdede oluşan oturmalar belirli periyotlar ile izlenmiştir. 01.09.2009 tarihinde ilk okuma yapılmıştır. 01.05.2011 tarihinde ise su tutmasından sonraki okumalar alınmaya başlanmıştır. Şekil 5.5'te düşey deplasmanın gövde içerisindeki kotlardaki değişimi gösterilmektedir. Yapılan okumalarda gövdede maksimum oturmanın 1.91 m olduğu ölçülmüştür.



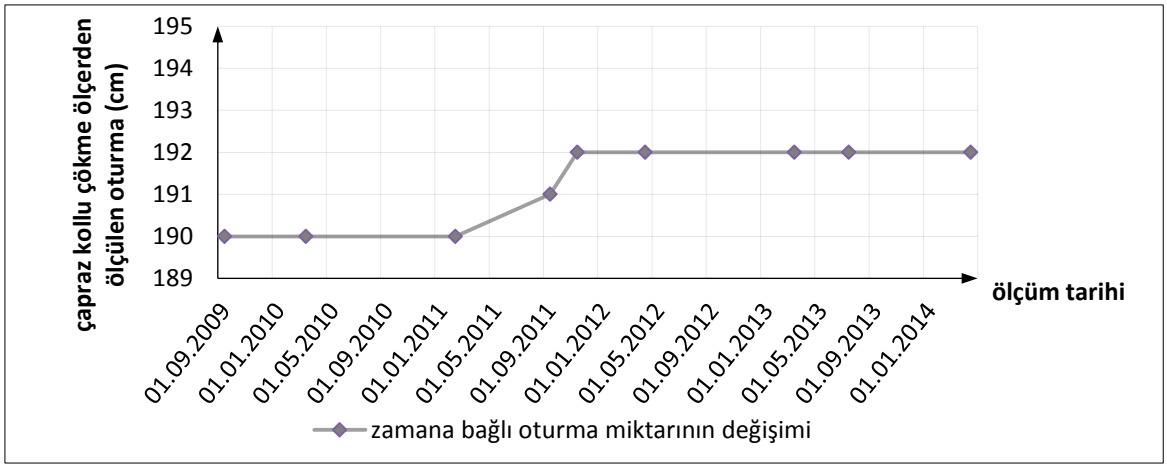
Şekil 5.5. Km 0+650'de bulunan çapraz kollu çökme ölçerlerden ölçülen düşey deformasyonlar [38]

Şekil 5.6'da ölçülen ve hesaplanan düşey deformasyonlar karşılaştırılmıştır. Deformasyonların benzer olduğu görülmüştür.



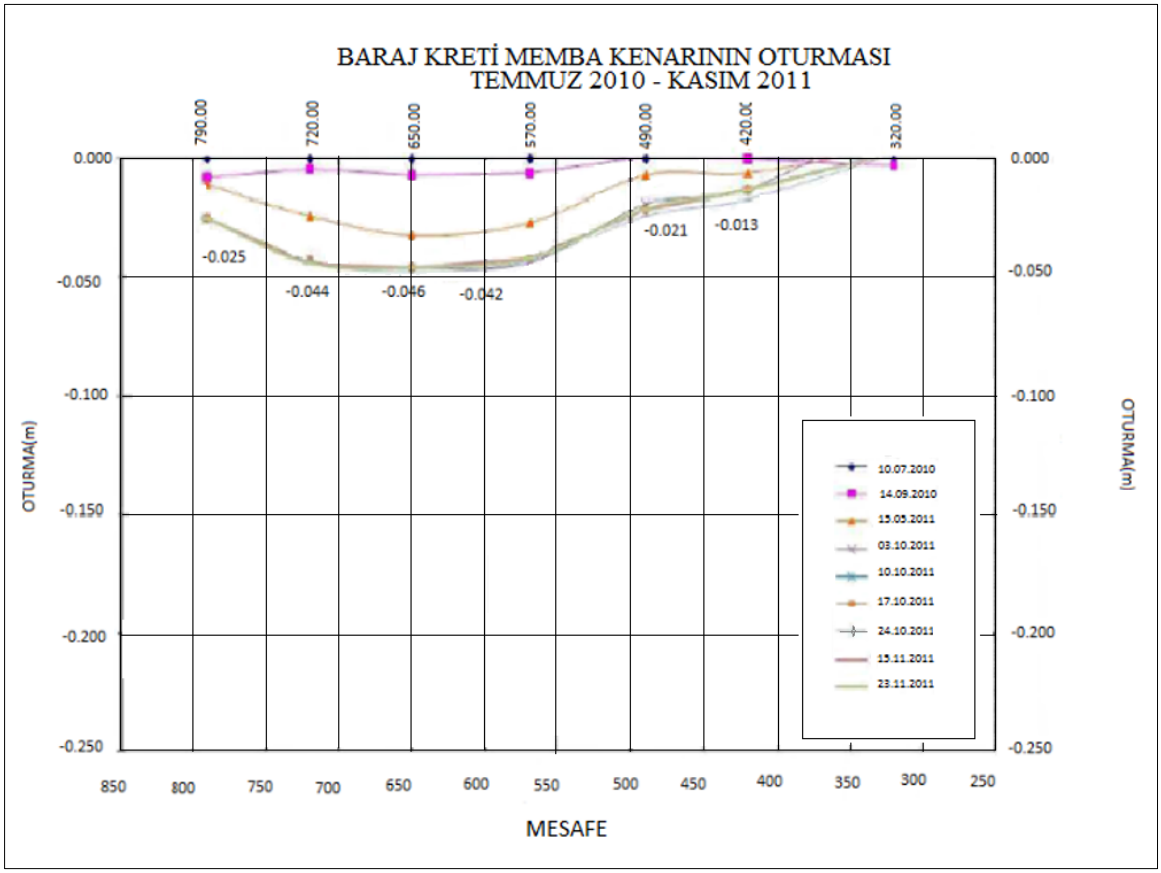
Şekil 5.6. Ölçülen ve hesaplanan düşey deformasyon

Çapraz kollu çökme ölçerde ilk inşaat sonu okumasından su tutma işlemine kadarki periyotta yapılan ölçümlerde düşey deformasyon miktarında kayda değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Şekil 5.7'de belirli periyotlarda yapılan ölçümlerde düşey deformasyonun değişimi görülmektedir. 01.09.2012 tarihinde yapılan okumalarda düşey deformasyonun olağan artıştan farklı olarak 194 cm olarak ölçüldüğü ancak devam eden periyodik okumalarda deformasyonların 191 cm olarak devam ettiği görülmüştür. 01.09.2012 tarihinde yapılan ölçümün hatalı olduğu düşüldüğünden grafiğe yansıtılmamıştır. Çapraz kollu çökme ölçerden su tutma durumundan sonra yapılan düşey deformasyon ölçümleri incelendiğinde ciddi bir artışın olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum hesaplanan düşey deformasyonlarla ölçüm sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermektedir.

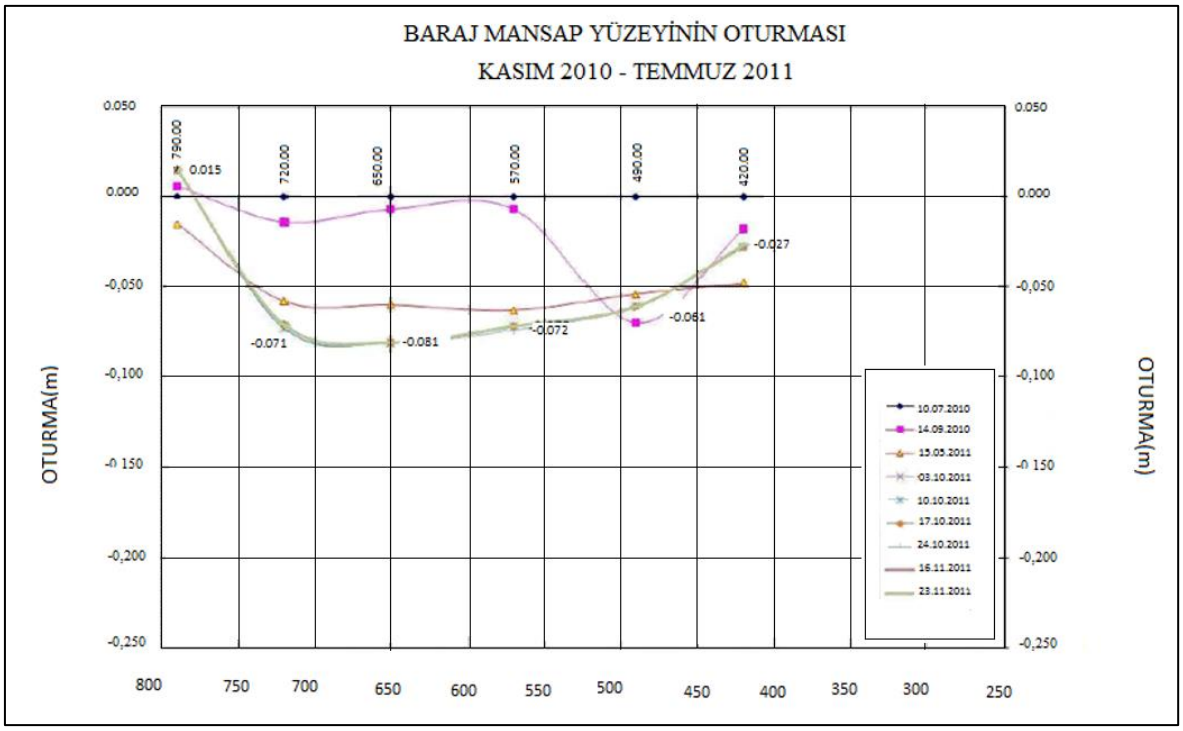


Şekil 5.7. Baraj gövdesinde ölçülen düşey deformasyon miktarının zamana göre değişimi

Baraj gövdesinde kret memba kenarı, kret mansap kenarı, memba ve mansap şevleri üzerine yerleştirilmiş olan harici çökme ölçerlerden belirli periyotlarda düşey deformasyon ölçümleri alınmıştır. Şekil 5.8'de baraj kretine ve Şekil 5.9'da baraj mansabına yerleştirilen harici çökme ölçerlerden okunan inşaat sonu ve su tutma durumlarındaki düşey deformasyonlar görülmektedir. Bu ölçüm sonuçlarına göre inşaat sonu durumunda krette ve mansap şevinde deformasyon oluşmadığı görülmüştür. Su tutma durumunda ise krette 0,046 m, mansap şevinde ise 0,081 m olarak ölçülmüştür [38]. Su tutma durumda düşey deformasyonlar krette 0.025 m, mansap şevinde 0.056 m olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.8. Harici çökme ölçerden okunan baraj kreti oturması [38]



Şekil 5.9. Harici çökme ölçerden okunan baraj mansap şevi oturması [38]

6. SONUÇLAR

Temelden yüksekliği 120 m olan kil çekirdek kaya dolgu tipindeki Köprübaşı Barajı gövdesinin 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 elemanlara bölünerek modellenmiştir. Deformasyonların beklendiği bölgelerde eleman sayısı arttırılmıştır. Gövde üzerinde sonlu eleman sayısının arttırılmasıyla gerçekleştirilen analizlerde deformasyonların daha gerçekçi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Gövde inşa koşullarını temsil etmek amacıyla baraj kademeli olarak modellenmiştir. 4, 6, 10, 20, 39 aşamalı yapılan analizlerde, aşama sayısının artmasıyla deformasyonların 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 %1,72 civarı deformasyon oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum baraj gövdesine yerleştirilmiş olan çapraz kollu çökme ölçerlerden okunan deformasyonlarla karşılaştırılmış olup uyumlu olduğu görülmüştür.

Gövde geçirimsiz çekirdeğine ait Duncan – Chang modül parametrelerindeki değişimin deformasyon miktarına olan etkisinin incelenmesi amacıyla K, 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.

Midas NTS NX sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan düşey deformasyon analiz sonuçları Phase2 v8.005 sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan düşey deformasyon analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Her iki yazılımda da birbirine yakın sonuçlar elde edildiği 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 uyumlu olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2003). *Baraj Emniyet Rehberi*. Ankara: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 1.

2. Ağıralioğlu, N. (2005). *Baraj Planlama ve Tasarım Kriterleri Cilt 2.* (İkinci Baskı*).* İstanbul: Su Vakfı Yayınları, 16-20.

3. İnternet: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, (2007). Zonlu Toprak ve Kaya Dolgu Barajlar İnşaat Teknik Şartnamesi. Web: https://www.jmo.org.tr/mevzuat/mevzuat_detay.php?kod=228 adresinden 29 Mart 2019 tarihinde alınmıştır.

4. Kutzner, C. (1997). *Earth and Rockfill Dam Principles of Design and Construction*. (First Edition). Netherlands: A.A Balkema, 4-6.

5. İnternet: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.emo.org.tr%2Fgenel%2Fbizden_detay.php%3Fkod%3D49952&date=2019-04-29, Erişim Tarihi: 29.04.2019.

6. İnternet: International Commission on Large Dam, URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.icold-cigb.org%2FGB%2Fdams%2Frole_of_dams.asp&date=2019-04-29, Erişim Tarihi: 29.04.2019.

7. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2011). *Embankment dams;* Washington: U.S.: Department of the Interior Bureau of Reclamation, 16-28.

8. Daniel, D. E., Benson, C. H. (1990). Water cortent - density criteria for compacted clay liners. *Journal of Geotecnical Engineering,* 116(12), 1811-1830.

9. Daniel, D. E., Wu Y. (1993). Compacted clay liners and covers for arid sites. *Journal of Geotechnical Engineering,* 119(2), 223-236.

10. Brandon, T. L., Duncan J.M., Gardner W.S. (1990). Hydrocompression settlement of deep fill. *Journal of Geotecnical Engineering,* 116(10), 1536-1548.

11. Güler, E., Baykal, G., Kavak, A. (1993, Eylül). *Sıkıştırma su muhtevasının dolgu barajlardaki oturmalara etkisi.* Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumunda sunuldu, İzmir.

12. Nobari, E. S., Duncan, J. M. (1972). Effect of reservoir filling on stresses and movement in earth and rockfill dams; University of California, *UC Report,* California, 5-7.

13. Marsal, R. J., Arellana, L. R. (1967). Performance of El İnfiernillo Dam 1963-1966. *Journal of Soil Mechanics and Foundations,* 93(4), 265-298.

14. Ansal, A. M., Sezen, A. (1993, Eylül). *Zonlu barajlarda kil çekirdeğin konsolidasyon davranışı.* Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumunda sunuldu, İzmir.

15. Squier, L. R. (1967). Evaluation of Cougar Dam embankment performance. *Journal of Soil Mechanics and Foundations,* 93(4), 253-277.

16. Penman, A. D. M., Mitchell, P. B. (1970). *Initial behaviour of Scammonden Dam.* Paper presented at the 10th Conference of International Commission On Large Dams, Montreal.

17. Durgunoğlu, T., Yazıcığlu, A. (1993, Eylül). *Kaya dolgu barajlarda gerilme ve deformasyon hesabına ait bir uygulama.* Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Problemleri Sempozyumunda sunuldu, İzmir.

18. Emiroğlu, M. E., Korkmaz, M., Aydın S. (2011). Dolgu barajlarda malzeme rijitliği ile çekirdek ve kabuk şev eğimi değişiminin gerilme – deformasyon davranışına etkisi. *DSİ Teknik Bülteni,* 111(5), 45-60.

19. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2011). *Embankment dams design standards.* Washington DC: USBR, 2-8.

20. Pagano, L., Desideri,A., Vinale, F. (1998). Interpreting settlement profiles of earth dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* 124(10), 923-932.

21. Hunter, G., Fell, R. (2003). The deformation behaviour of embankment dams; The University of New South Wales, *NSW Report,* Australia, 21-115.

22. Ormaz, A., Vafaeian. M. 2004. *Analysing of the parameters affecting the arching inside the earth dam core (in Persian).* Paper presented at the First National Civil Engineering Congress of Iran, Tehran.

23. Topçu, S. (2017). Kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda hidrolik çatlama potansiyelinin tahmin edilmesi. *DSİ Teknik Bülteni,* 125(1), 1-7.

24. Naylor, D. J., Maranha, J. R., Maranha, E., Pinto A. A. V. (1996). A back-analysis of Beliche Dam. *Geotechnique*, 47(2), 221-233.

25. Nayebzadeh R., Mohammadi M. (2011). The effect of impervious clay core shape on the stability of embankment dams. *Geotechnical and Geological Engineering,* 29(1), 627-635.

26. Ghafari A., Nikraz H. R., Sanaeirad, A. (2016). Finite element analysis of deformation and arching inside the core of embankment dams during construction. *Australian Journal of Civil Engineering*. 14(1), 13-22.

27. Bostancı, T. (2002). *Eğri eksenli çubukların titreşimlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

28. Clough, R. W., Woodward, R. J. (1967). Analysis of embankment stresses and deformations. *Journal of Soil Mechanics and Foundation,* 93(4), 529-549.

29. İnternet: İMO İstanbul URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fimoistanbul.org%2Fimoarsiv%2Fgeoteknik-kurs-notlari-2016%2F2.hafta%2Fmehmet-berilgen Say%25C4%25B1sal_Yontemler-2016.pdf&date=2019-04-30 Erişim Tarihi: 30.04.2019.

30. Şengün, E. (2013). *Oyuk genişlemesi probleminin sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu sayısal analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

31. Bahadır, A. A., Onur, M. İ. (2017, Kasım). *Derin kazı destek sistemi tasarımında zemin modeli seçimi: bir vaka analizi.* 7. Geoteknik Sempozyumunda sunuldu, İstanbul.

32. Duncan, J. M., Wong, K. S. (1984). Hyperbolic stress – strain parameters for nonlinear finite element analyses of stresses and movements in soil masses; University of California, *UC Report*, California, 1-86.

33. Dong, W., Hu, L., Yu Y.Z., Lv H. (2013). 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*, 2013(1), 1-12.

34. Derakhshandi, M., Pourbagherian, H. R., Baziar, M. H., Shariatmadari, N., Sadeghpour, A. H. (2014). Numerical analysis and monitoring of a rockfill dam at the end of construction (case study: Vanyar Dam). *International Journal of Civil Engineering*, 12(4), 326-337.

35. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, (2000). Köprübaşı Barajı ve HES Projesi tanıtım raporu; Devlet Su işleri Genel Müdürlüğü, *DSİ Raporu,* Ankara, 1-28.

36. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, (1999). Filyos Projesi Köprübaşı Barajı ve HES kesin proje aşaması doğal yapı gereçleri raporu; Devlet Su İşleri 23. Bölge Müdürlüğü, *DSİ Raporu,* Kastamonu, 12-36.

37. İkiler, H. (2000). Baraj ölçüm tesislerinin yerleştirilmesi ve okunması; Devlet Su İşleri 12. Bölge Müdürlüğü, *DSİ Raporu, Kayseri*, 1-27.

38. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, (2011). Köprübaşı Barajı ve Hidroelektrik Santrali Projesi baraj gözlemlerinin değerlendirilmesi raporu; Dolsar Mühendislik, *DSİ Raporu,* Ankara, 5-16.

39. Kulhawy, F. H., Duncan, J. M. (1970). Nonliear finite element analysis of stresses and movements in Oroville Dam; University of California, *UC Report*, Berkeley, 58-64.

40. Yüksel Proje, (2007). Geoteknik Tasarım Esasları; Yüksel Proje, *YP Raporu,* Ankara, 27-49.

41. Yetimoğlu, T.(1997). Modifiye Duncan Hiperbolik Zemin Modeli kullanılarak sıkı kumların gerilme - deformasyon - hacim değişimi davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi,* 8(2), 1397-1408.

42. Department of the Interior Bureau of Reclamation, (1998). *Earth Manuel.* (Third Edition). Colorado: Department of the Interior Bureau of Reclamation, 50-51.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : ARSLAN, Gözde

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 17.02.1990, Ankara

Medeni hali : Evli

e-mail : gozde.acikgoz@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Erciyes Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2013
Lise	Ankara Atatürk Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	Devlet Su İşleri	İnşaat Mühendisi
2013-2014	Geogis Müh. Müş. İnş. Tic. AO.	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Ünsal, N., Tekin, E., Arslan, G. (2019). Köprübaşı Barajının oturma davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanması. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(1), 101-114.

Hobiler

Doğa Yürüyüşü



GAZİ GELECEKTİR...