AKKÖPRÜ BARAJININ OTURMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

İBRAHİM SAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2009
ANKARA

İBRAHİM SAK tarafından hazırlanan AKKÖPRÜ BARAJININ OTURMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. S. Oğuzhan AKBAŞ ……..
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL ……...
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan TOSUN ……..……..
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Osmangazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. S. Oğuzhan AKBAŞ ……...……
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih ...../……/……

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL …….
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İbrahim SAK

AKKÖPRÜ BARAJININ OTURMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İbrahim SAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2009

ÖZET

Bu çalışmada kil çekirdekli kaya dolgu tipindeki Akköprü Barajı'nın inşa aşamasında ve su tutma sırasındaki oturma davranışı incelenmiştir. Toplam gerilmelerin ve yer değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla iki boyutlu düzlem şekil değiştirme prensibi kullanılarak, sonlu elemanlar metodu analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaya dolgu malzemesinin doğrusal ve elastik olmayan, gerilme bağımlı davranışını temsil etmek için sertleşen zemin modeli kullanılmıştır. Malzeme model parametreleri, kil çekirdek malzemesi için üç eksenli basınç deney raporlarından, diğer malzemeler için ise önceki çalışmalar temelinde seçilmiştir. İnşaat sonrasına ait hesaplanan ve ölçülen deformasyonlar, büyüklük, zamanla değişim ve baraj gövdesindeki konumları itibarı ile uyumludur. En büyük oturma baraj gövde yüksekliğinin yaklaşık yarısında ortaya çıkmıştır. Su tutma aşamasındaki davranış da değerlendirilmiş, oturma ve gerilmeler için ilerisi için tahminlerde bulunulmuştur.

Bilim Kodu : **911.1.050**
Anahtar Kelimeler : **Sonlu elemanlar yöntemi, Plaxis, oturma, baraj, gerilme, kil çekirdek**
Sayfa Adedi : **134**
Tez Yöneticisi : **Yrd. Doç. Dr. S. Oğuzhan AKBAŞ**

ANALYSING THE SETTLEMENT BEHAVIOUR OF AKKÖPRÜ DAM BY FINITE ELEMENT METHOD

(M. Sc. Thesis)

İbrahim SAK

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
May 2009

ABSTRACT

In this study, settlement behavior of Akköprü Dam is investigated for the "end of construction" and "reservoir impoundment" loading conditions. Finite element method that are based on a 2-D plain strain solution are performed in order to determine the total stresses, displacements, and pore water pressures. Hardening soil model is used to represent the non-linear, inelastic, and stress-dependent behavior of rockfill. Material model parameters for clay are selected from triaxial compression test results. For the other materials, preliminary values for model parameters are based on the results from previous studies on dams consisting of similar materials. Calculated and measured displacements are in general agreement as a function of time, in terms of magnitude, and location for the end of construction condition. The maximum settlement is determined to be approximately at the middle of the dam height. Predictions are also made about stresses and displacements for reservoir filling conditions.

Science Code : **911.1.050**
Key Words : **Finite element method, Plaxis, settlement, dam, stress, clay core**
Page Number : **134**
Advisor : **Assist. Prof. Dr. S. Oğuzhan AKBAŞ**

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı hazırlarken yardımlarını esirgemeyen başta Prof. Dr. Nail ÜNSAL olmak üzere Yrd. Doç. Dr. S. Oğuzhan AKBAŞ'a ve İnş. Yük. Müh. Gülru S. YILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Akköprü Barajı ilgili gerekli verilerin elde edilmesinde yardımcı olan DSİ XXI. Bölge Müdürlüğü personelleri R. Kemal AYDIN ve Eyüp TAYTAN'a da teşekkür ederim.

Son olarak da sonsuz desteklerinden dolayı aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT.....v

TEŞEKKÜR.....vi

İÇİNDEKİLER.....vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiii

RESİMLERİN LİSTESİ.....xvii

HARİTALARIN LİSTESİ.....xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR.....xix

BÖLÜM

1. GİRİŞ.....1

2. AKKÖPRÜ BARAJI VE HES PROJESİ.....3

2.1. Projenin Maksadı.....6

2.2. Proje Karakteristikleri.....6

2.3. Baraj Yeri Jeolojisi.....12

2.3.1. Genel jeoloji.....12

2.3.2. Baraj yeri.....13

2.4. Baraj Dolgusu.....16

3. AKKÖPRÜ BARAJI'NDAKİ ÖLÇÜM ALETLERİ.....18

3.1. Elektrikli Piyezometreler.....24

Sayfa

3.2. Çapraz Kollu Çökme Ölçerler……..…….....…25

3.2.1. Çapraz kollu çökme ölçerin yerleştirilmesi…….....27

3.2.2. Çapraz kollu çökme ölçer ile ölçüm alınması……...……34

3.2.3. Çapraz kollu çökme ölçer okumalarının yazılması…….....37

4. KAYA DOLGU BARAJLARIN DEFORMASYON DAVRANIŞI……..39

4.1. Lineer Olmayan Malzeme Modelleri……..…….…….....39

4.1.1. Hiperbolik model...……...……39

4.1.2. Sertleşen model..……...……42

4.2. Deformasyonların Karakteristikleri……...……...……...…44

4.2.1. Genel....……...…….44

4.2.2. Rezervuar dolumunun kaya dolgu baraj deformasyonlarına etkisi..…44

4.2.3. Kaya dolgu modülünün belirlenmesi…….....46

4.3. Kaya Dolgu Barajların Deformasyon Analizi……...……...…48

4.3.1. Sonlu elemanlar yönteminin kaya dolgu barajlara uygulanması…..…54

4.3.2. İki boyutlu ve üç boyutlu sonlu eleman analiz sonuçlarının karşılaştırılması……61

4.3.3. IFRD'lerin (Ön yüzü geçirimsiz kaya dolgu baraj) ölçülen ve hesaplanan oturmaların karşılaştırılması……...63

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ……..…….…….....67

5.1. Malzeme Modeli ve Parametrelerinin Seçimi……...……..……...…67

5.2. Analizle İlgili Diğer Bilgiler…….....…….……75

5.3. İlk Analiz.....…….....…76

5.4. İnşaat Sonrası Analiz……...……78

5.5. Rezervuar Dolum Sonrası Analiz……..104

Sayfa

5.6. Harici Çökme Röper Okumalarının Değerlendirilmesi…….....……....114

6. SONUÇ……...……..117

KAYNAKLAR…….……120

EKLER…….….123
EK-1 Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arasındaki oturma-zaman eğrileri……..……124
EK-2 Akköprü Barajı gövde en kesiti km:0+370'teki harici çökme röperlerinin oturma-zaman eğrileri.....131

ÖZGEÇMİŞ……..134

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Akköprü Barajı'nın hidrolojik karakteristikleri……...…….7

Çizelge 2.2. Derivasyon tünelleri karakteristikleri……...……...…8

Çizelge 2.3. Gövde karakteristikleri……..…….……8

Çizelge 2.4. Dolusavak karakteristikleri……...……....9

Çizelge 2.5. Dipsavak karakteristikleri……..……..10

Çizelge 2.6. Hes karakteristikleri……11

Çizelge 2.7. Akköprü Barajı'nda kullanılan malzemeler……...…….16

Çizelge 3.1. Gövde en kesiti km: 0+320'deki boşluk suyu basıncı ölçüm cihazlarının kapasiteleri ve kablo boyları…….....20

Çizelge 3.2. Gövde en kesiti km: 0+370'teki boşluk suyu basıncı ölçüm cihazlarının kapasiteleri ve kablo boyları……..…….…..…21

Çizelge 3.3. Gövde en kesiti km: 0+420'deki boşluk suyu basıncı ölçüm cihazlarının kapasiteleri ve kablo boyları……..……...22

Çizelge 3.4. Su basıncı ölçüm cihazlarının kapasiteleri ve kablo boyları….…….22

Çizelge 3.5. Toplam basınç ölçen cihazların kapasiteleri ve kablo boyları…...…….23

Çizelge 3.6. Çapraz kollu çökme ölçerlerin tesisi çizelgesi……...…….27

Çizelge 3.7. Çapraz kollu çökme ölçer kayıt çizelgesi……...……...…….36

Çizelge 4.1. Bazı barajların E_{rc} ve E_{rf} değerleri……..……48

Çizelge 4.2. Düzlem şekil değiştirme analizi ve üç boyutlu analizin karşılaştırılması……...……...62

Çizelge 4.3. Gerilme azaltma faktörleri…….…...……..63

Çizelge 4.4. Gözlemlenen ve hesaplanan oturmaların inşa sonrası durum ve rezervuar dolu durumla karşılaştırılması……..……..…..…66

Çizelge 5.1. Üç eksenli basınç deneyi sonuçları…….……69

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.2. "m_v" değerleri tablosu……...69

Çizelge 5.3. "c_v" değerleri tablosu……70

Çizelge 5.4. Kilin elastisite modülünün belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları……70

Çizelge 5.5. Kilin kohezyonunun ve içsel sürtünme açısının belirlenmesi için literatürden alınan değerlerle yapılan parametrik çalışma sonuçları……71

Çizelge 5.6. Ana kayanın elastisite modülünün belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları……73

Çizelge 5.7. Ana kayada doğrusal-elastik modele göre yapılan parametrik çalışma sonuçları……....73

Çizelge 5.8. Filtre zonlarının elastisite modülünün belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları……74

Çizelge 5.9. Saboya ve ark., (1993) tarafından ilk analizde kullanılan hiperbolik malzeme parametreleri……...76

Çizelge 5.10. "E_{50}^{ref}" değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları……...77

Çizelge 5.11. "R_f" değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları……77

Çizelge 5.12. "m" değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları……77

Çizelge 5.13. Kaya dolgu için malzeme parametreleri……...78

Çizelge 5.14. Analizde kullanılan nihai malzeme parametreleri……....78

Çizelge 5.15. 17.11.2003 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler……81

Çizelge 5.16. 04.11.2004 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler……84

Çizelge 5.17. 22.12.2005 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler……87

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.18. 15.11.2006 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler…….....……..……90

Çizelge 5.19. 19.09.2007 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler..……...…93

Çizelge 5.20. Hesaplanan maksimum yatay yer değiştirmeler……...96

Çizelge 5.21. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam gerilmeleri……..……..98

Çizelge 5.22. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam yatay gerilmeleri…...……99

Çizelge 5.23. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam düşey gerilmeleri……..…..101

Çizelge 5.24. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam gerilmeleri……..……108

Çizelge 5.25. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam yatay gerilmeleri..……...109

Çizelge 5.26. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam düşey gerilmeleri……..…111

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Baraj gövde en kesiti……...……...17

Şekil 3.1. Gövde en kesiti km: 0+320, km:0+370 ve km:0+420'deki'deki piyezometreler……....19

Şekil 3.2. Gövde en kesiti km: 0+320'deki harici çökme röperleri…….……...23

Şekil 3.3. Gövde en kesiti km: 0+370'teki harici çökme röperleri…….……...24

Şekil 3.4. Maihak tip elektrikli piyezometre……...25

Şekil 3.5. Çapraz kollu çökme ölçer temel kısmı……..…….26

Şekil 3.6. NPU-8 demiri ve kilitleme levhası……..…...30

Şekil 3.7. Çapraz kollu çökme ölçer gövde kısmı…….....…31

Şekil 3.8. Çapraz kollu çökme ölçer baş kısmı……...…….....…33

Şekil 3.9. Ölçüm torpili……..……..35

Şekil 3.10. Ölçüm torpili ile ölçüm alınması…….....36

Şekil 4.1. Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi…….40

Şekil 4.2. Dönüştürülmüş hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi…..……..…...40

Şekil 4.3. Sertleşen model için hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi……...……...……..……44

Şekil 4.4. Bir kaya dolgu barajda rezervuar dolumunun etkisi……...……45

Şekil 4.5. El İnfiernillo Barajı'nın rezervuar dolumu boyunca davranışı……...……46

Şekil 4.6. Kaya dolgu modülünün belirlenmesi……...……...…47

Şekil 4.7. Lefkara Barajı gövdesindeki ölçüm aletleri……50

Şekil 4.8. S20 ve S28 kontrol istasyonlarının düşey yer değiştirme-zaman eğrisi….51

Şekil 4.9. Krette bulunan bütün istasyonların düşey yer değiştirme-zaman eğrileri..52

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.10. Kretin 3 m ve 95 m altındaki dahili oturma ölçerlerin düşey yer değiştirme-zaman eğrileri…….52

Şekil 4.11. Kretteki deformasyon ölçerlerin, kretin 3 m altındaki manyetik ekstensometrelerin ve sonlu elemanlar metodu sonuçlarının düşey yer değiştirme-zaman eğrileri.....……53

Şekil 4.12. Bir barajın "tek" ve "10 kademeli" analiz için gerilme dağılımı…….….55

Şekil 4.13. "Tek" ve "10 kademeli" analiz için yer değiştirme konturleri…….55

Şekil 4.14. Farklı kademe sayısı için oturma dağılımı a)1, b)3, c)5, d)8, e)15, f)31..57

Şekil 4.15. Malzeme parametreleri ile birlikte bir barajın en kesiti……58

Şekil 4.16. Yatay ve düşey yer değiştirmelerin temel modülüne bağlı değişimi.…...59

Şekil 4.17. Toulnustouc Barajı'nın en kesiti……..…….60

Şekil 4.18. Rezervuar dolum sonrası yer değiştirmeler a) kaya ve b) moren üzerinde..……...……...60

Şekil 4.19. Düşey yer değiştirme konturleri……...……61

Şekil 4.20. Pappadai Barajı'nın sonlu elemanlar ağı…….....64

Şekil 4.21. Pappadai Barajı'nın tahmin edilen ve ölçülen oturmalarının karşılaştırılması…….65

Şekil 4.22. Kürtün Barajı'nın sonlu elemanlar ağı……..…...66

Şekil 5.1. Akköprü Barajı'nın sonlu elemanlar ağı…….……68

Şekil 5.2. Gerçekleşen dolgu miktarı(m)-zaman eğrisi…….…….72

Şekil 5.3. Gerçekleşen dolgu kotu-zaman eğrisi…….……72

Şekil 5.4. Gövde en kesit km: 0+370'teki seçilen çapraz kollu çökme ölçerler…....79

Şekil 5.5. 2003 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu……..…...80

Şekil 5.6. 17.11.2003 tarihi itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi……...82

Şekil 5.7. 2004 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu…….83

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.8. 04.11.2004 tarihi itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi……..…85

Şekil 5.9. 2005 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu……..…...86

Şekil 5.10. 22.12.2005 tarihi itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi……...……..……88

Şekil 5.11. 2006 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu……...…89

Şekil 5.12. 15.11.2006 itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi……...……..…91

Şekil 5.13. 2007 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu……...92

Şekil 5.14. 19.09.2007 itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi……...……..…94

Şekil 5.15. İnşa sonrası için yatay yer değiştirmeler……...……...……96

Şekil 5.16. Muratlı Barajı'nın inşa sonrası yatay yer değiştirme konturleri……...……...……...…97

Şekil 5.17. Kürtün Barajı'nın inşa sonrası yatay yer değiştirme konturleri……97

Şekil 5.18. İnşa sonrası için toplam gerilmeler……...…….……..…98

Şekil 5.19. İnşa sonrası için toplam yatay gerilmeler……...……...……...……..100

Şekil 5.20. Kürtün Barajı'nın inşa sonrası yatay gerilme konturleri……100

Şekil 5.21. Muratlı Barajı'nın inşa sonrası yatay gerilme konturleri……101

Şekil 5.22. İnşa sonrası için toplam düşey gerilmeler……..……....……102

Şekil 5.23. Kürtün Barajı'nın inşa sonrası düşey gerilme konturleri……102

Şekil 5.24. Muratlı Barajı'nın inşa sonrası düşey gerilme konturleri……...103

Şekil 5.25. İnşa sonrası için kayma gerilmeleri……...…..…...103

Şekil 5.26. Kürtün Barajı'nın inşa sonrası kayma gerilme konturleri……..104

Şekil 5.27. Muratlı Barajı'nın inşa sonrası kayma gerilme konturleri……..104

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.28. Rezervuar dolum sonrası için düşey yer değiştirmeler…….....….105

Şekil 5.29. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için düşey yer değiştirme konturleri……....106

Şekil 5.30. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için düşey yer değiştirme konturleri……106

Şekil 5.31. Rezervuar dolum sonrası için yatay yer değiştirmeler…….....…...107

Şekil 5.32. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için yatay yer değiştirme konturleri……....107

Şekil 5.33. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için yatay yer değiştirme konturleri……107

Şekil 5.34. Rezervuar dolum sonrası için toplam gerilmeler…….……...……...108

Şekil 5.35. Rezervuar dolum sonrası için toplam yatay gerilmeler...……...……110

Şekil 5.36. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası yatay gerilme konturleri……....110

Şekil 5.37. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası yatay gerilme konturleri……111

Şekil 5.38. Rezervuar dolum sonrası için toplam düşey gerilmeler..……...……112

Şekil 5.39. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası düşey gerilme konturleri……....112

Şekil 5.40. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası düşey gerilme konturleri……113

Şekil 5.41. Rezervuar dolum sonrası için kayma gerilmeleri……...……113

Şekil 5.42. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için kayma gerilmesi konturleri……....114

Şekil 5.43. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için kayma gerilmesi konturleri……114

Şekil 5.44. Harici çökme röperlerine ait oturma-harici çökme röper numarası eğrisi.....……116

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Gövde profili (sol sahilden görünüm)……...……..…5

Resim 2.2. Mansaptan genel görünüm……...……...…5

Resim 2.3. Membadan genel görünüm……...……..6

Resim 2.4. Derivasyon tünelleri……...…….7

Resim 2.5. Baraj gövdesi……...……...…8

Resim 2.6. Dolusavak……...……....…9

Resim 2.7. Santral binası……....…10

Resim 2.8. Enerji tüneli…….....11

Resim 2.9. Cebri borular……...……..…12

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 2.1. Akköprü Barajı'nın Türkiye haritasındaki konumu……..……3

Harita 2.2. Akköprü Barajı genel vaziyet planı……4

Harita 2.3. Akköprü Barajı jeoloji haritası……...……...…14

Harita 2.4. Aşağı Dalaman Proje sahasının jeolojik kesitleri…….……15

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklama**
c	Kohezyon
$\mathbf{c}_v$	Konsolidasyon katsayısı
E_{rc}	Kaya dolgu modülü(inşa durumu)
E_{rf}	Kaya dolgu modülü(İlk dolum durumu)
ε	Eksenel şekil değiştirme
$\mathbf{E}_i$	Başlangıç tanjant modülü
E_t	Belirli bir gerilme seviyesindeki elastik tanjant modülü
E_{50}	İlk yükleme için gerilme bağımlı rijitlik modülü
E_{50}^{ref}	Referans rijitliğe karşılık gelen referans rijitlik modülü
E_{ur}^{ref}	Boşaltma ve yükleme için referans rijitlik modülü
GPa	Giga Pascal
H	Baraj yüksekliği
ha	Hektar
in	Inch
K	Modül sayısı
km	Kilometre
kPa	Kilo Pascal
m	Mobilizasyon faktörü, metre
mm	Milimetre
MPa	Mega Pascal
$\mathbf{m}_v$	Hacimsel sıkışma katsayısı
n	Hiperbolik üs sayısı

Simgeler	Açıklama
P_a	Atmosfer basıncı
q_f	Son deviatör gerilme
q_a	Kayma dayanımının asimptotik değeri
σ_{ref}	Referans basıncı
$\mathbf{R}_f$	Kırılma oranı
s	Oturma
$\boldsymbol{\sigma}_1$	En büyük asal gerilme
$\boldsymbol{\sigma}_3$	En küçük asal gerilme
Ø	İçsel sürtünme açısı
γ	Birim hacim ağırlık
δ_s	Oturma miktarı
δ_n	Oturma miktarı
υ_t	Tanjant poisson oranı
u_v	Düşey yer değiştirme
u_h	Yatay yer değiştirme
W_r	Nehir genişliği

Kısaltmalar	Açıklama
CFRD	Beton Yüzlü Kaya Dolgu Baraj
DSİ	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
HES	Hidroelektrik Santral
IFRD	Ön Yüzü Geçirimsiz Kaya Dolgu Baraj

1. GİRİŞ

Toprak ve kaya dolgu barajlar, temelde ve baraj gövdesinde deformasyonlara sebep olan dış yüklere maruz kalırlar. Barajın zati ağırlığı ve rezervuarın su basıncı, baraj gövdesindeki gerilme artışlarının başlıca sebeplerindendir. Bu yükler zamanla, yatay ve düşey yer değiştirmelere neden olarak barajın kalıcı davranışını meydana getirirler. Adım adım gerçekleşen bu süreçte barajın geometrik karakteristikleri, kullanılan malzemeler ve geoteknik parametreleri baraj davranışında önemli rol oynar.

Baraj davranışının entegre yaklaşımlarla izlenmesi, mevcut barajların kritik dizayn parametrelerinin doğrulanması ve yeni yapıların tasarım kavramlarının geliştirilmesine yardımcı olurlar. Ancak herhangi iki baraj, malzeme cinsi, geometri, yerleşim karakteristikleri gibi sebeplerden dolayı birbirine benzemez. Deformasyon gözlem verileri de tip, kayıt uzunluğu ve kalitesi açısından bir barajdan diğerine çok fazla çeşitlilik gösterebilir.

Bir barajın modellenmesinde model ve geoteknik parametrelerin seçimi çok önemlidir. Ancak kaya dolgu barajlarda kullanılan malzemelerin boyutlarının ve gerekli test ekipmanlarının büyük olması kaya dolgu özelliklerinin değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, çoğu zaman parametreler önceki çalışmalardan alınan sonuçlarla veya arazi ölçümlerine göre yapılan geri analizlerle tanımlanmak zorundadır.

Bu çalışmada, Muğla İline bağlı Köyceğiz İlçesinin 24 km doğusunda Dalaman Çayı üzerinde, kil çekirdekli kaya dolgu olarak inşa edilen, temelden yüksekliği 162,50 m olan Akköprü Barajı'nın inşaat sonrası oturma davranışının analizi Plaxis® v8.2 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmış, elde edilen sonuçlar baraj gövde dolgusuna yerleştirilmiş çapraz kollu çökme ölçerlerden alınan verilerle karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2'de Akköprü Barajı gövde dolgusuna yerleştirilmiş ölçüm aletleri hakkında bilgi verilerek, özellikle toprak ve kaya dolgularda düşey doğrultu boyunca dolgudaki hareket miktarlarını ölçmede kullanılan "Çapraz Kollu Çökme Ölçer" sisteminin çalışma prensipleri ve ölçülen verilerin değerlendirilmesi anlatılacaktır.

Bölüm 3'te Akköprü Barajı ile ilgili karakteristik bilgiler ve baraj yeri jeolojisi hakkında bilgi verilecektir.

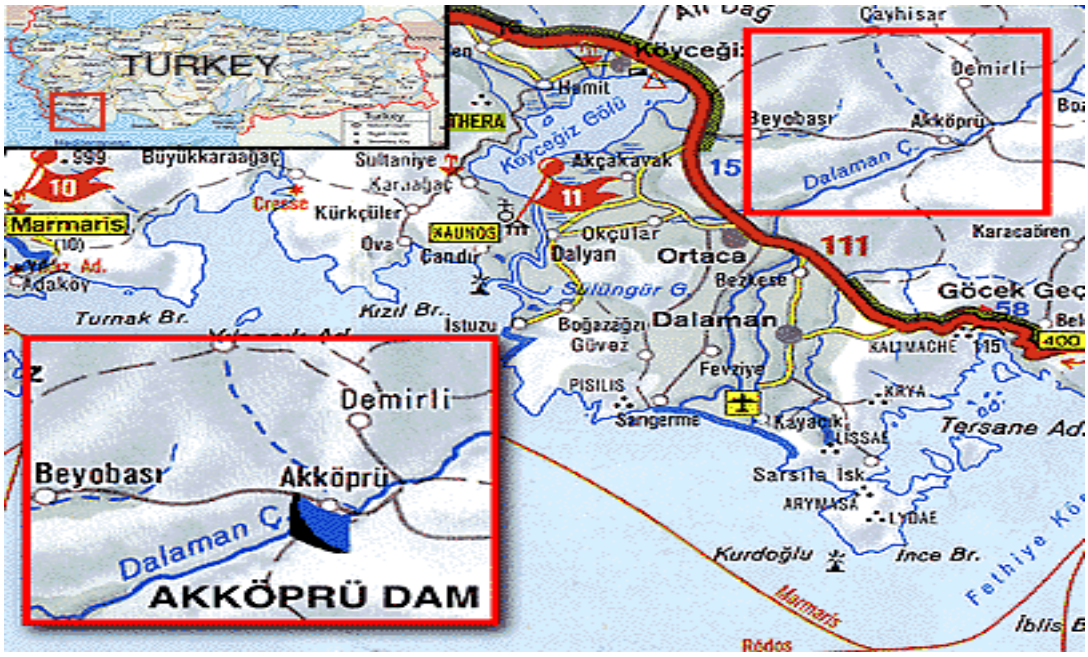
Bölüm 4'te kaya dolgu barajların deformasyon davranışı hakkında bilgi verilecektir.

Bölüm 5'te Plaxis programı kullanılarak yapılan sonlu eleman analizleri ve geoteknik parametrelerin seçimi irdelenecek, elde edilen sonuçların inşaat sonrası durum için gövde dolgusundaki çökme ölçerlerden elde edilen verilerle karşılaştırılması yapılacaktır. Ayrıca barajda henüz su tutulmadığı için ayrı bir analiz yapılarak baraj gövdesinde meydana gelebilecek oturma tahminlerine yer verilecektir. Yapılan hassasiyet analizi ile sonlu elemanlar yöntemi sonucu elde edilen deformasyonları en çok etkileyen parametreler incelenecektir.

Bölüm 6 çalışmanın özetini ve sonuçları içermektedir.

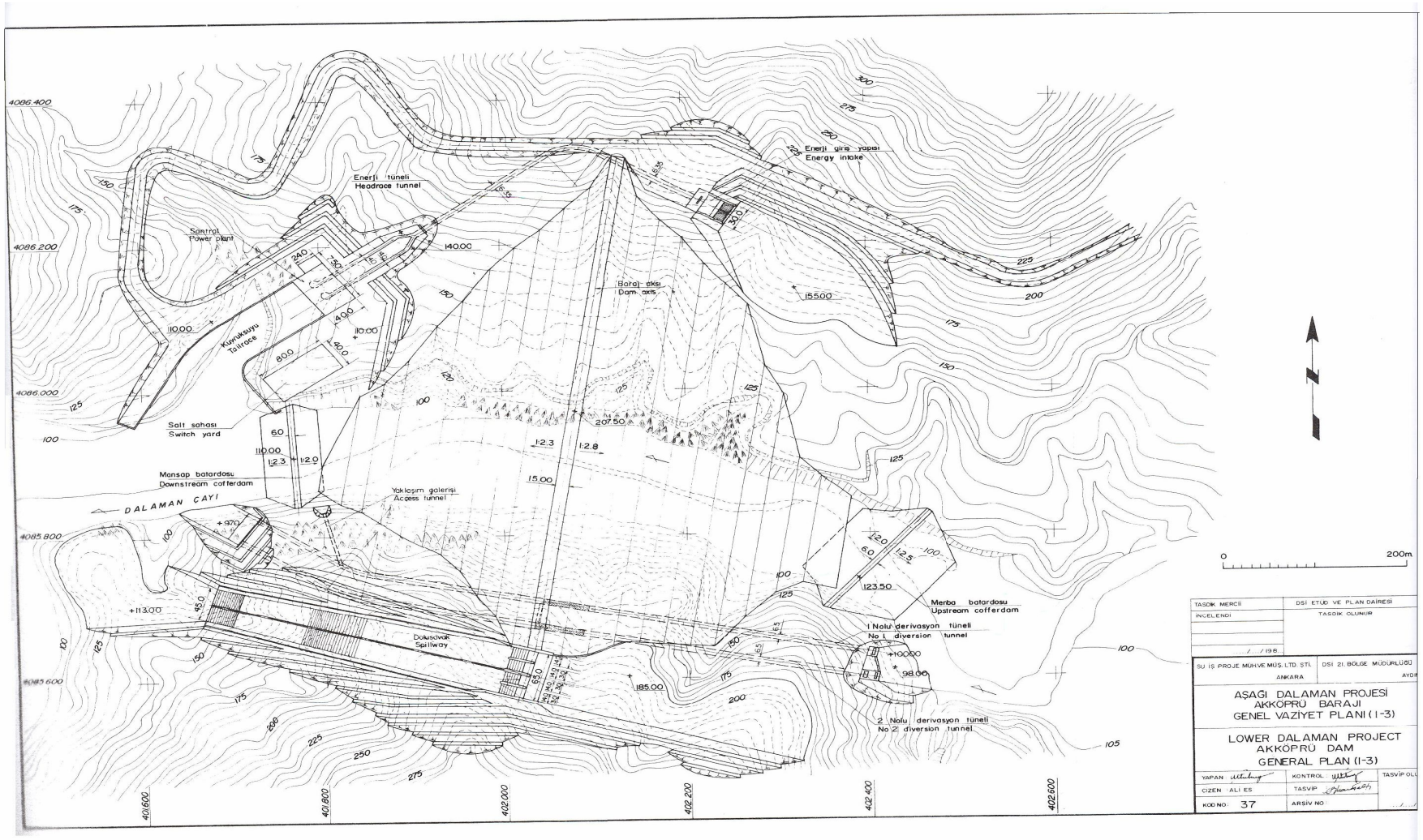
2. AKKÖPRÜ BARAJI VE HES PROJESİ

Akköprü Barajı ve Hidroelektrik Santrali Tesisleri, Muğla İline bağlı Köyceğiz İlçesinin 24 km doğusunda Dalaman Çayı üzerinde bulunmaktadır (Harita 2.1). İnşaatına 1995 yılında başlanan projenin gövde dolgu imalatına 15.09.2000 tarihinde geçilmiş, 2007 yılının son çeyreğinde bitirilmiştir. Akköprü Barajı'nın genel vaziyet planı Harita 2.2'de verilmiştir.



Harita 2.1. Akköprü Barajı'nın Türkiye haritasındaki konumu

Baraj gövdesi, derivasyon tünelleri, dolusavak, HES yapısı, enerji tüneli ve cebri borulara ait fotoğraflar Resim 2.1 - Resim 2.9 arasında görülmektedir.



Harita 2.2. Akköprü Barajı genel vaziyet planı



Resim 2.1. Gövde profili (sol sahilden görünüm)



Resim 2.2. Mansaptan genel görünüm



Resim 2.3. Membadan genel görünüm

2.1. Projenin Maksadı

Sulama, enerji ve taşkın koruma amaçlı inşa edilen Akköprü Barajı'nın işletmeye açılmasıyla birlikte 115 MW kurulu güçle yılda 343 GWh enerji üretilmesi ve 14 192 ha arazinin sulanması planlanmaktadır.

2.2. Proje Karakteristikleri

Hidroloji

Çizelge 2.1'de Akköprü Barajı'nın hidrolojik karakteristikleri özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Akköprü Barajı'nın hidrolojik karakteristikleri

Yağış Alanı	5 132,60 km²
Yıllık Ortalama Akım	1 627,40 hm³/yıl
Kadastrofal Feyezan Piki	5 730,00 m³/s
Derivasyon Feyezan Piki	1 689,10 m³/s
Çekilen Su	849,70 hm³/yıl
Regülasyon Oranı	52%
Minimum İşletme Seviyesi	173,00 m
Normal Su Seviyesi	200,00 m
Maksimum Su Seviyesi	204,00 m
Maksimum Su Seviyesinde Göl Hacmi	419,00 hm³
Maksimum Su Seviyesinde Göl Alanı	9,00 km²

Derivasyon tüneli

Toplam 1575,43 m uzunluğunda, Ø 6,50 m iç çapında iki adet tünelin deşarj kapasitesi 893,00 m³/s olup, 22 Temmuz 1998 tarihinde Dalaman Çayı derivasyon tünellerine çevrilmiştir.



Resim 2.4. Derivasyon tünelleri

Çizelge 2.2. Derivasyon tünelleri karakteristikleri

Yeri	Sol sahilde
Kesit Tipi-Sayısı ve Çapı	Dairesel kesitli 2 adet ve 6,50 m iç çapındadır.
Toplam deşarj kapasitesi	893,00 m³/s
Boyu	T1=766,89 m ve T2= 808,54 m

Baraj gövdesi

Baraj gövdesi dolgusunda 2 106 448 m³ kil, kum ve çakıl ocaklarından 779 808 m³ filtre dolgu malzemesi ve 9 389 532 m³ kaya dolgu malzemesi kullanılmıştır.



Resim 2.5. Baraj gövdesi

Çizelge 2.3. Gövde karakteristikleri

Gövde Tipi	Kil çekirdekli kaya dolgu
Gövde Dolgu Hacmi	12 hm³
Kret Kotu	207,50 m
Kret Uzunluğu	688,27 m
Gövde Yüksekliği (Talvegden)	112,50 m
Gövde Yüksekliği (Temelden)	162,50 m

Dolusavak

Akışa göre sol sahilde bulunan karşıdan alışlı radyal kapaklı tipindeki dolusavak yapısının toplam deşarj kapasitesi 5 730 m³/s'dir.



Resim 2.6. Dolusavak

Çizelge 2.4. Dolusavak karakteristikleri

Yeri	Sol sahil
Tipi	Karşıdan alışlı radyal kapaklı
Kapak Sayısı ve Boyutu	4 adet 11,60x15,71 m
Deşarj Kanalı Uzunluğu	445,00 m
Deşarj Kapasitesi	5 730 m³/s
Enerji Kırıcı Tesis Tipi	Sıçratma Uçlu

Dipsavak

Akışa göre sol sahilde bulunan dairesel tipli dipsavak yapısının kapasitesi 145 m³/s'dir.

Çizelge 2.5. Dipsavak karakteristikleri

Yeri	Sol sahil
Tipi	Dairesel
Uzunluğu	315,00 m (her ünite)
Tehlike Vanaları	180x180 Sürgülü
Ayar Vanaları	Konik, 1 adet 2000 mm
Dipsavak Kapasitesi	145 m³/s

Hidroelektrik santral yapısı

Santral binası barajın mansabında yarı gömülü tipte 30,45 m genişliğinde, 42,70 m boyunda ve 30,00 m yüksekliğindedir.



Resim 2.7. Santral binası

Çizelge 2.6. HES karakteristikleri

Santral Tipi	Yarı gömülü tip (30,45 m 42,70 m 30,00 m)
Enerji Tünel Tipi Çapı ve Boyu	D=6,50 m L=532,00 m
Ünite Sayısı	2 adet
Türbin Tipi	Düşey Eksenli Francis
Kurulu Güç	115 MW
Toplam Enerji	343 GWh/yıl

Enerji tüneli

Sağ sahilde 532 m. uzunluğunda, 6,50 m. çapında betonarme tünel olarak inşa edilmiştir.



Resim 2.8. Enerji tüneli

Cebri borular

Toplam uzunluğu 554 m'dir. Enerji tünelinde çelik kaplama ve açıkta olmak üzere inşa edilmiştir. Bir hat iki branşman olarak projelendirilmiştir. Çapı 6,50 m'dir. Boyu 204 m'dir.



Resim 2.9. Cebri borular

2.3. Baraj Yeri Jeolojisi

2.3.1. Genel jeoloji

Akköprü Barajı inceleme alanında Mesozoyik yaşlı Cehennem Deresi kireçtaşları, Kretase yaşlı Demirli Melanjı ile Peridotit, Serpantinit, Tersiyer yaşlı Aktaş kireçtaşı ile Gökseki flişi kuvarterner yaşlı teras, eski alüvyon, alüvyon ve killi yamaç molozu mevcuttur.

Aktaş kireçtaşı ve Gökseki flişlerinden oluşan otoktan birimlerin üzerine Cehennem Deresi kireçtaşı şariye olmuştur. Daha sonra Cehennem Deresi üzerine Demirli melanjı şariye olmuş, üzerine peridotit serisi naplanmıştır.

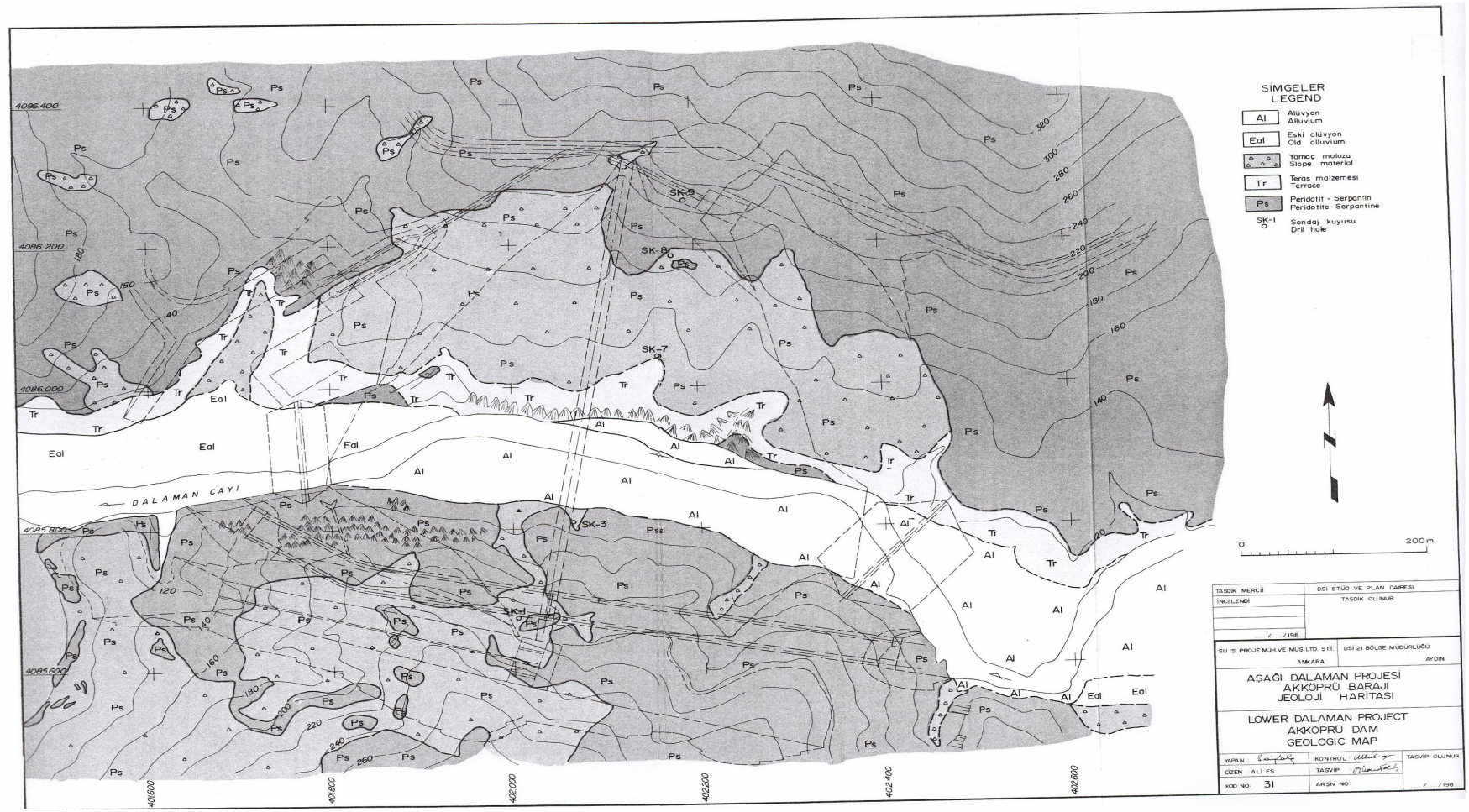
2.3.2. Baraj yeri

Baraj yeri her iki yakadaki peridotit-serpantinit üzerine sadece sağ yakada teras çökelmiş, üzerlerine killi yamaç molozu ve alüvyon gelmiştir. Baraj yerine ait jeoloji haritası ile Aşağı Dalaman Projesi proje sahasının jeolojik kesitleri Harita 2.3 ve Harita 2.4'te görülmektedir.

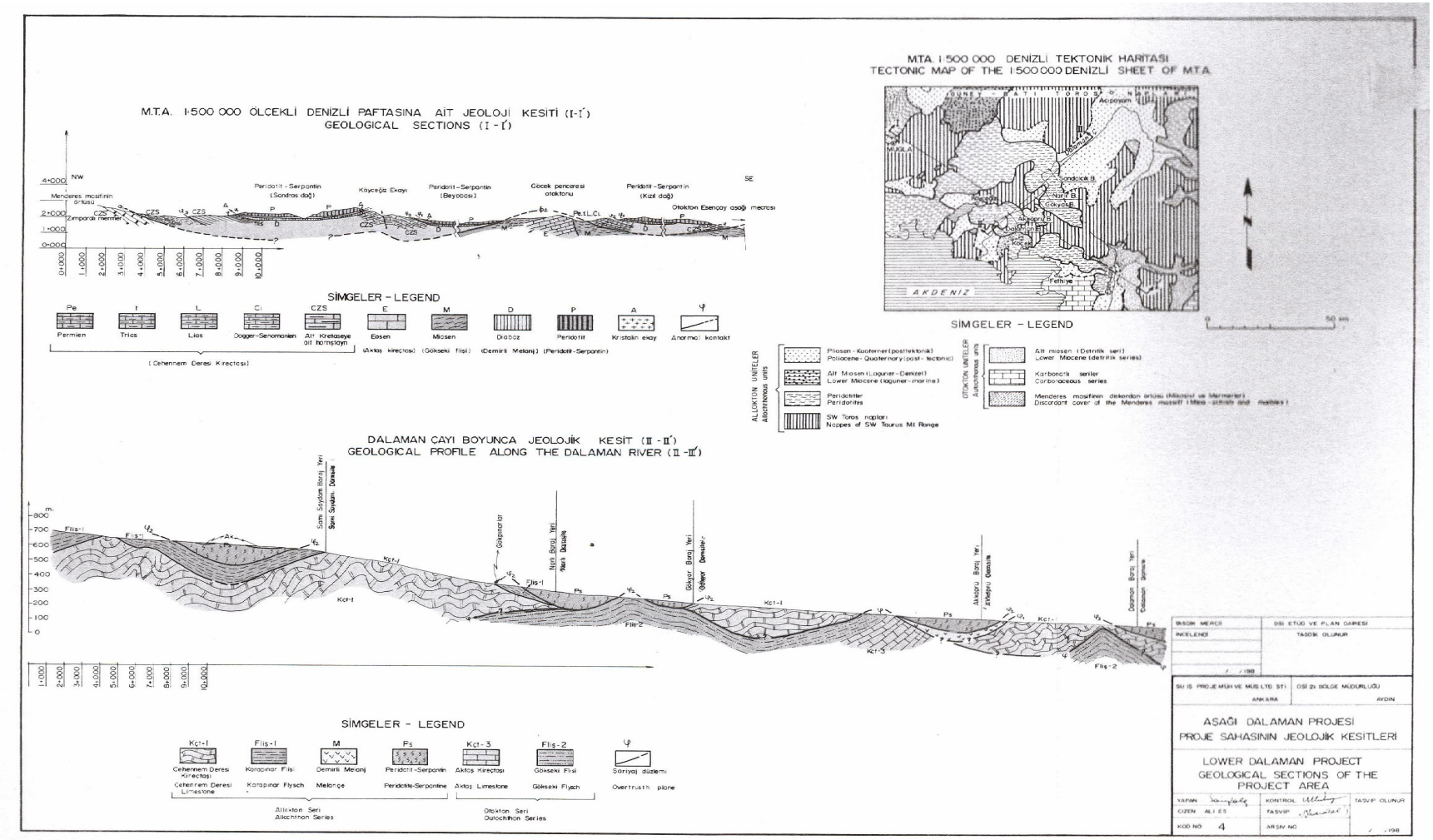
Baraj yerinde ana kaya durumundaki peridotitler bol eklemli, genellikle serpantinleşme gösteren, eklem boyunca derinlerde de serpantinleşmesi süren bir birim olup geçirimsiz kaya olarak tanımlanmıştır. Ortalama RQD değeri 63,50, karot yüzdesi % 96,22'dir.

Peridotit-serpantinitin üzerine uyumsuz olarak gelen teras, peridotit-serpantinit-kireçtaşı-çört kökenli çakıllardan karbonatın çimentolanması ile oluşmuştur. Yarı geçirimli, RQD değeri 39,33, karot yüzdesi % 93,98, orta sıkı çimentolu bir birimdir. Akışa göre sağ sahildeki teras, yamaç molozu ve alüvyon gövde dolgusu başlamadan önce alınmıştır.

Talvegdeki alüvyon 15-42 m arası değişen kalınlıkta, geçirimli-yarı geçirimli bir birimdir. Granülometrik analizlere göre % 10,73 ince malzeme, % 75,21 kum, % 13,13 çakıl, % 0,93 oranında blok içermektedir. Talvegdeki alüvyon gövde dolgusu başlamadan önce alınmıştır.



Harita 2.3. Akköprü Barajı jeoloji haritası



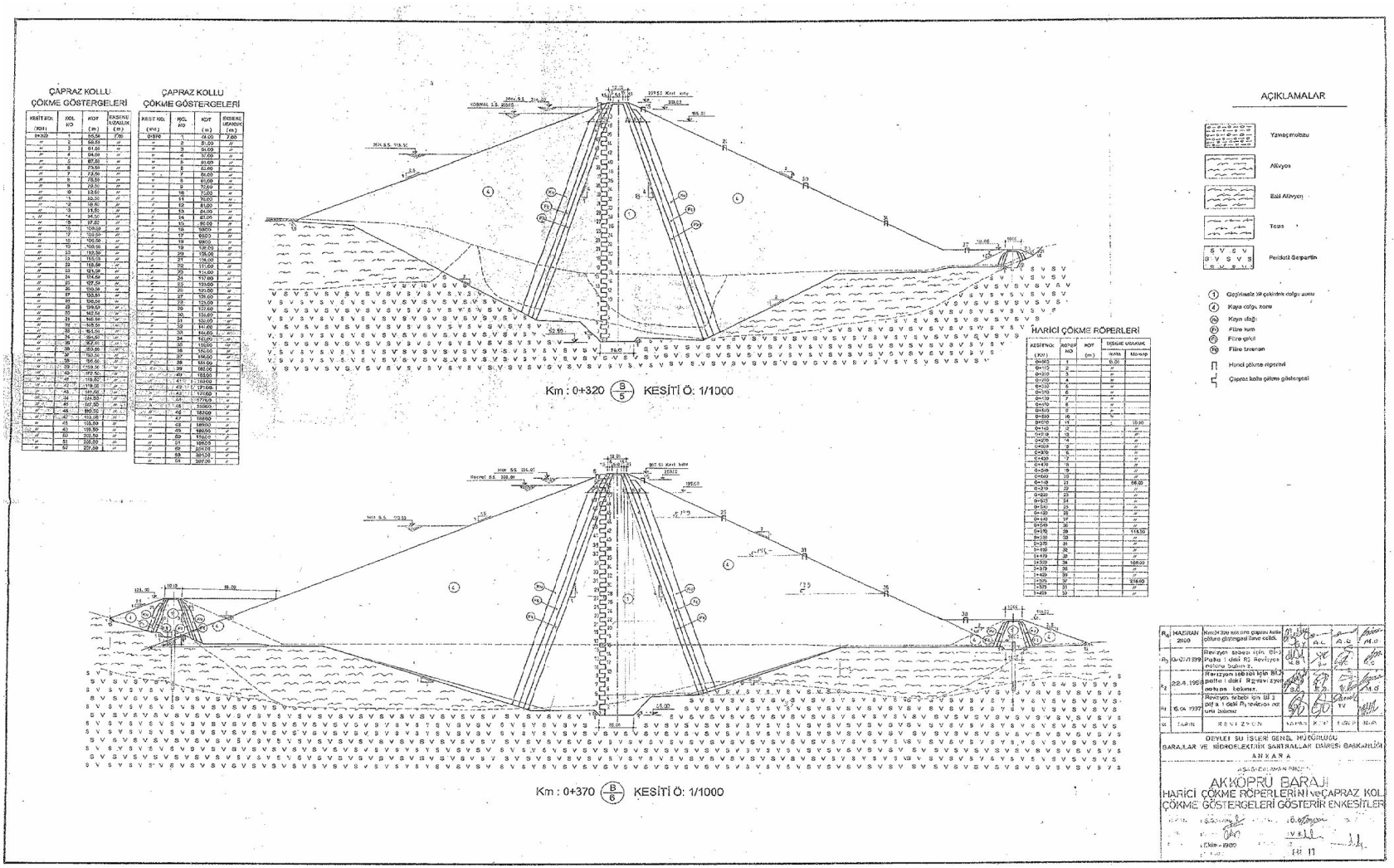
Harita 2.4. Aşağı Dalaman Proje sahasının jeolojik kesitleri

2.4. Baraj Dolgusu

Akköprü Barajı kil çekirdekli kaya dolgu bir baraj olup gövde dolgusu kum ve çakıl filtre zonlarını da kapsamaktadır. Baraj gövde kesiti Şekil 2.1'de görülmektedir. Baraj yüksekliği temelden 162,50 m, talvegden 112,50 m'dir. Kret uzunluğu 688,27 m, genişliği 12 m'dir. Gövde dolgu hacmi 12 hm³'tür. Barajın mansap şevi 1 düşey (D) / 2 yatay (Y) eğiminde, memba şevi ise 1 (D) / 2,5 (Y) eğimindedir. Akköprü Barajı'nda kullanılan malzemeler Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Akköprü Barajı'nda kullanılan malzemeler

Malzeme cinsi	Max.dane çapı(mm)	Tabaka kalınlığı(m)	Sıkıştırma
Alüvyon(tüvenan)	100	0,15	8 t / 2 pas
Alüvyon(ince malzeme)	150	0,15	8 t / 2 pas
Kaya ufağı(kaba,ince)	250	0,20	12 t / 4 pas
Kaya malzeme 1	600	-	-
Kaya malzeme 2	800	0,60	18 t / 5 pas
Karışık dolgu	120	0,25	12 t / 4 pas
Kil	-	0,15	32 t / 12 pas
Filtre malzemesi	76,2	0,30	8 t / 4 pas
Riprap	900	0,90	8 t / 4 pas
Koruyucu örtü	-	-	-



Şekil 2.1. Baraj gövde enkesiti

3. AKKÖPRÜ BARAJI'NDAKİ ÖLÇÜM ALETLERİ

Akköprü Barajı'na baraj davranışını gözlemlemek amacıyla gövde içerisine, memba ve mansap şevlerine ölçüm aletleri yerleştirilmiştir. 5 çeşit ölçüm aleti kullanılmıştır:

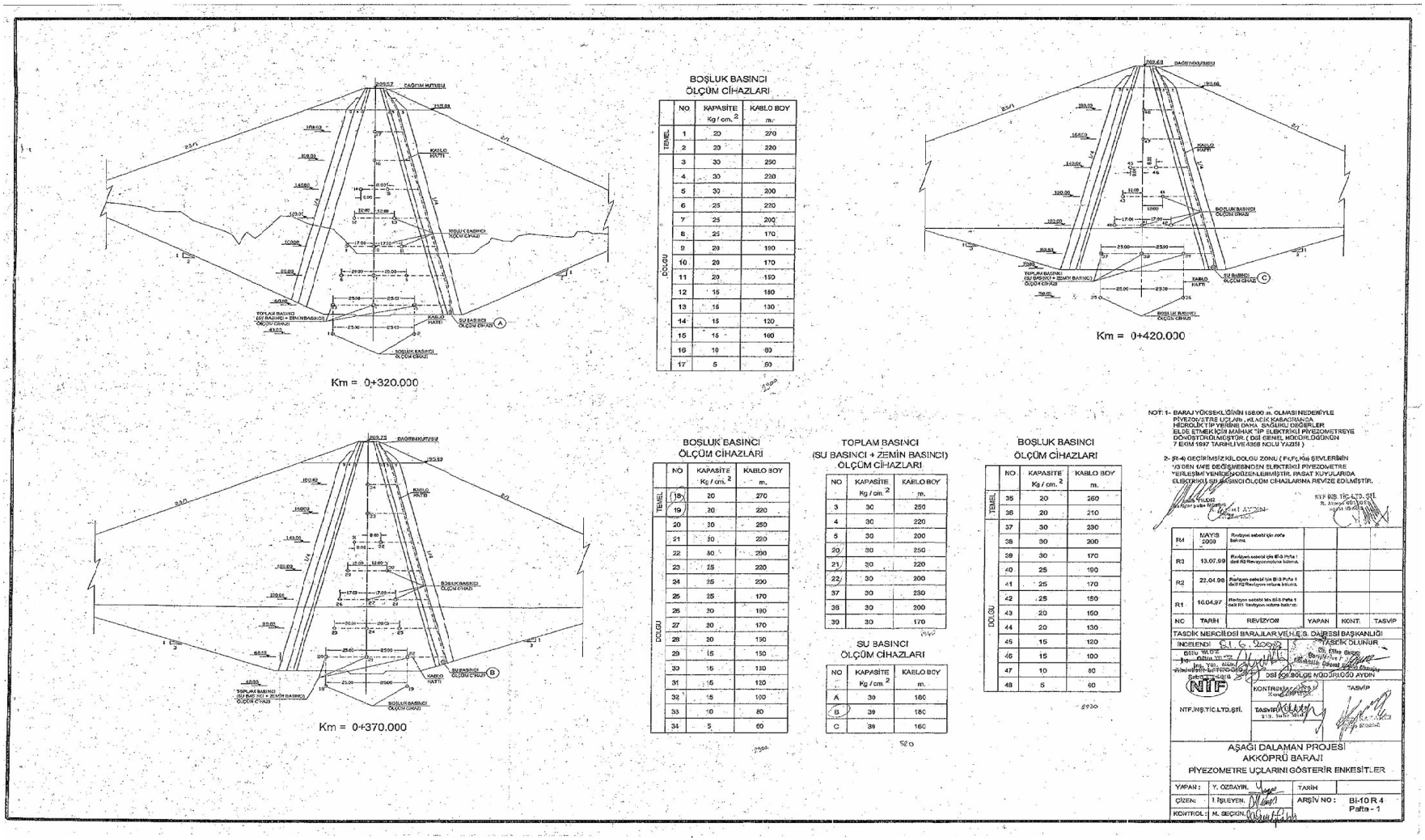
- Çapraz kollu çökme ölçer (ÇK), kil çekirdek içerisinde,
- Boşluk suyu basıncı ölçüm cihazları (BB), kil çekirdek içerisinde,
- Toplam basınç ölçer piyezometreler (TB), kil çekirdek içerisinde,
- Su basıncı ölçüm cihazları (SB), kil çekirdek içerisinde,
- Harici çökme röperleri (HR), memba ve mansap şevinde.

Kil çekirdek içerisinde, gövde km: 0+320'de 52 adet, km: 0+370'te 54 adet olmak üzere toplam 106 adet çapraz kollu çökme ölçer (ÇK) bulunmaktadır. Çapraz kollu çökme ölçerler baraj ekseninden 7,00 m memba tarafında ve baraj temelinden krete kadar bir hat üzerinde 3 m aralıklarla yerleştirilmiştir. Dolgu içerisindeki çapraz kollu çökme ölçerler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Boşluk suyu basıncını ölçmekte kullanılan piyezometre uçları (BB), gövde km: 0+320'de 17 adet, km: 0+370'te 17 adet ve km: 0+420'de 14 adet olmak üzere toplam 48 adettir.

Su basıncı ölçmek amacıyla gövde km: 0+320'ye 1 adet, km:0+370'ye 1 adet ve km: 0+420'ye 1 adet olmak üzere 3 adet su basıncı ölçüm cihazı (SB) yerleştirilmiştir.

Toplam basıncı (su basıncı+zemin basıncı) ölçmek amacıyla km: 0+320'ye 3 adet, km:0+370'ye 3 adet ve km: 0+420'ye 3 adet olmak üzere 9 adet toplam basınç ölçüm cihazı (TB) yerleştirilmiştir. Toplam basınç ölçen piyezometreler hem boşluk suyu basıncını hem de zemin basıncını ölçmektedirler. Dolgu içerisindeki piyezometreler Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Gövde enkesiti km: 0+320, km: 0+370 ve km: 0+420'deki piyezometreler

Dolgu içerisindeki boşluk suyu basıncını ölçmekte kullanılan piyezometrelerin, su basıncı ölçüm cihazlarının ve toplam basınç ölçen piyezometrelerin kapasitelerini ve kablo boylarını gösteren Çizelge 3.1, Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5 ilgili paftalarından alınarak aşağıda verilmektedir.

Çizelge 3.1. Gövde enkesiti km: 0+320'deki boşluk suyu basıncı ölçüm cihazlarının kapasiteleri ve kablo boyları

	No	Kapasite (kN/m²)	Kablo boyu(m)
TEMEL	1	1960	270
	2	1960	220
DOLGU	3	2940	250
	4	2940	220
	5	2940	200
	6	2450	220
	7	2450	200
	8	2450	170
	9	1960	190
	10	1960	170
	11	1960	150
	12	1470	150
	13	1470	130
	14	1470	120
	15	1470	100
	16	980	80
	17	490	60

Çizelge 3.2. Gövde enkesiti km: 0+370'deki boşluk suyu basıncı ölçüm cihazlarının kapasiteleri ve kablo boyları

	No	Kapasite (kN/m²)	Kablo boyu(m)
TEMEL	18	1960	270
	19	1960	220
DOLGU	20	2940	250
	21	2940	220
	22	2940	200
	23	2450	220
	24	2450	200
	25	2450	170
	26	1960	190
	27	1960	170
	28	1960	150
	29	1470	150
	30	1470	130
	31	1470	120
	32	1470	100
	33	980	80
	34	490	60

Çizelge 3.3. Gövde enkesiti km: 0+420'deki boşluk suyu basıncı ölçüm cihazlarının kapasiteleri ve kablo boyları

	No	Kapasite (kN/m²)	Kablo boyu(m)
TEMEL	35	1960	260
	36	1960	210
DOLGU	37	2940	230
	38	2940	200
	39	2940	170
	40	2450	190
	41	2450	170
	42	2450	150
	43	1960	150
	44	1960	130
	45	1470	120
	46	1470	100
	47	980	80
	48	490	60

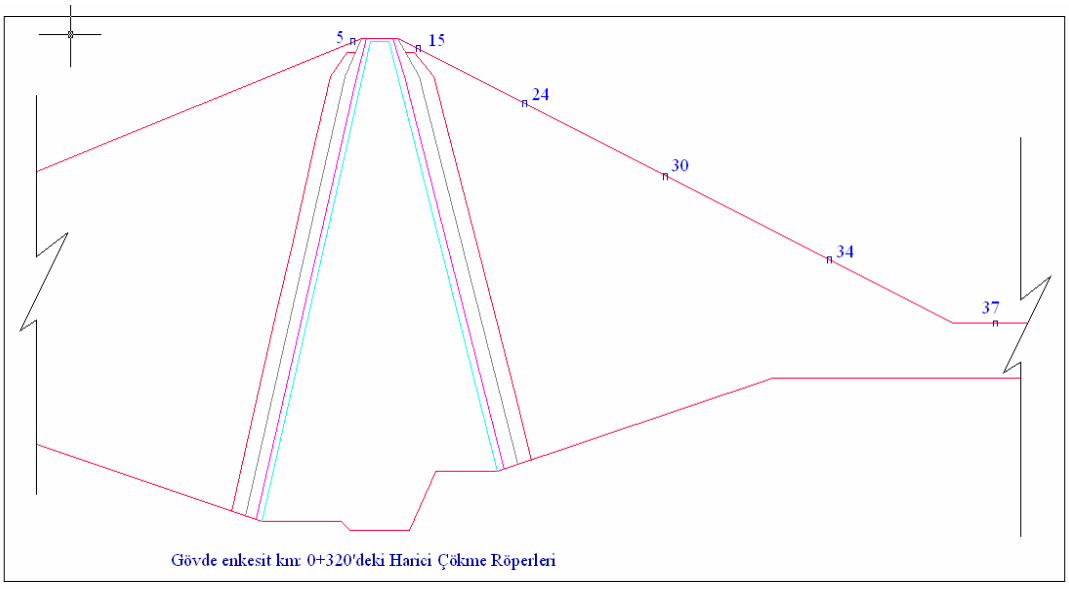
Çizelge 3.4. Su basıncı ölçüm cihazlarının kapasiteleri ve kablo boyları

	No	Kapasite (kN/m²)	Kablo boyu(m)
	A	2940	180
	B	2940	180
	C	2940	160

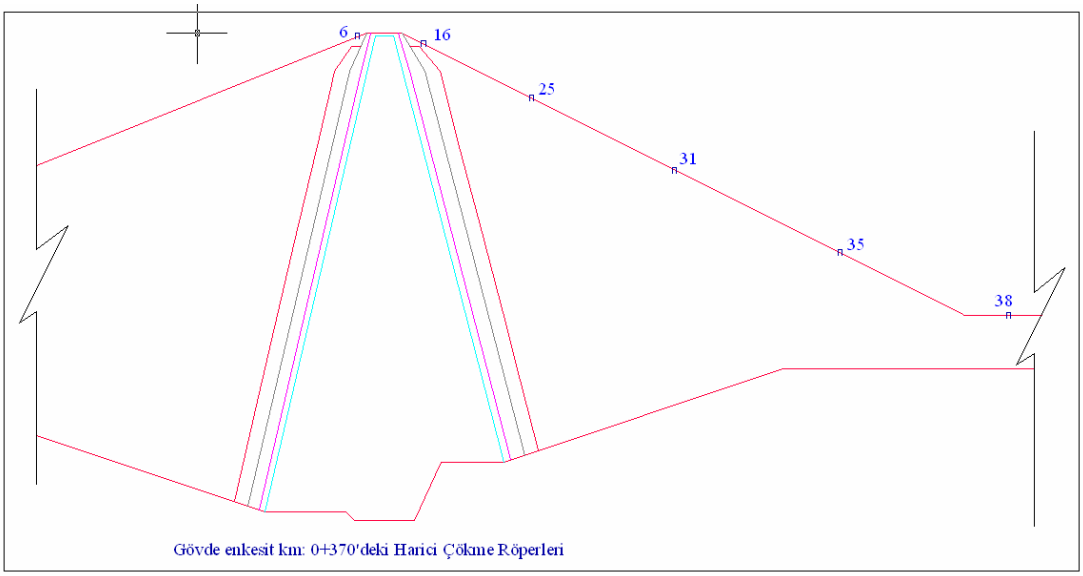
Çizelge 3.5. Toplam basınç ölçen cihazların kapasiteleri ve kablo boyları

No	Kapasite (kN/m²)	Kablo boyu(m)
3	2940	250
4	2940	220
5	2940	200
20	2940	250
21	2940	220
22	2940	200
37	2940	230
38	2940	200
39	2940	170

Memba ve mansap şevleri üzerinde 39 adet de harici çökme röperi (HR) bulunmaktadır. Gövde enkesiti km:0+320 ve km:0+370'teki harici çökme röperleri ilgili paftalarındaki bilgiler ışığında yeniden çizilerek Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Gövde enkesiti km:0+320'deki harici çökme röperleri



Şekil 3.3. Gövde enkesiti km:0+370'deki harici çökme röperleri

3.1. Elektrikli piyezometreler

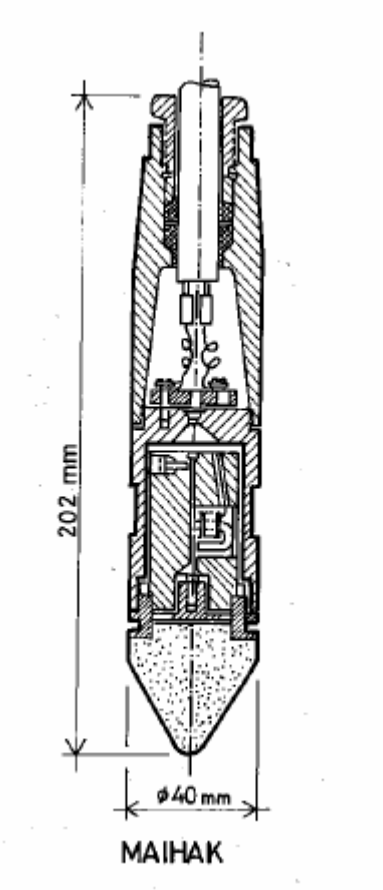
Akköprü Barajı'nda boşluk suyu basıncını ölçmek amacıyla "Maihak Tipi Elektrikli Piyezometreler" kullanılmıştır. Bu bölümde elektrikli piyezometreler hakkında kısa bilgi verilecektir.

Küçük boyutlu olmaları, karşılık verme sürelerinin kısa olması, don etkisinden etkilenmemeleri bu tip piyezometrelerin tercih edilme sebeplerindendir. Hava boşaltıcı sistemleri olmaması, kalibrasyon için başka piyezometrelere ihtiyaç duyulması, ısı farklarından zarar görmeleri ve zeminlerin permeabilitesi hakkında herhangi bir bilgi vermemeleri ise elektrikli piyezometrelerin dezavantajları arasındadır [Durgunoğlu ve ark., 1972].

Çalışma prensibi

Alet ucundaki diyaframın boşluk suyu basıncı altındaki hareketinin elektrikli iletici uçlar (transducer) vasıtası ile ölçülmesidir.

1955 yılından bugüne kadar basınç farkından dolayı gerginliği değişen çelik bir telin özgül frekanslarının tesbiti esasına dayanan elektrikli piyezometreler geliştirilmiştir. Özgül frekanslardaki fark, verici uçta elektrik titreşimine çevrilir ve alıcı uçta mevcut osiloskop ünitesi ile tesbit edilir. Bunların klasik elektrikli piyezometrelere nazaran avantajı, okumaların tel direncine bağlı olmayışıdır. Maihak Tip Elektrikli Piyezometre Şekil 3.4'te gösterilmiştir [Durgunoğlu ve ark., 1972].



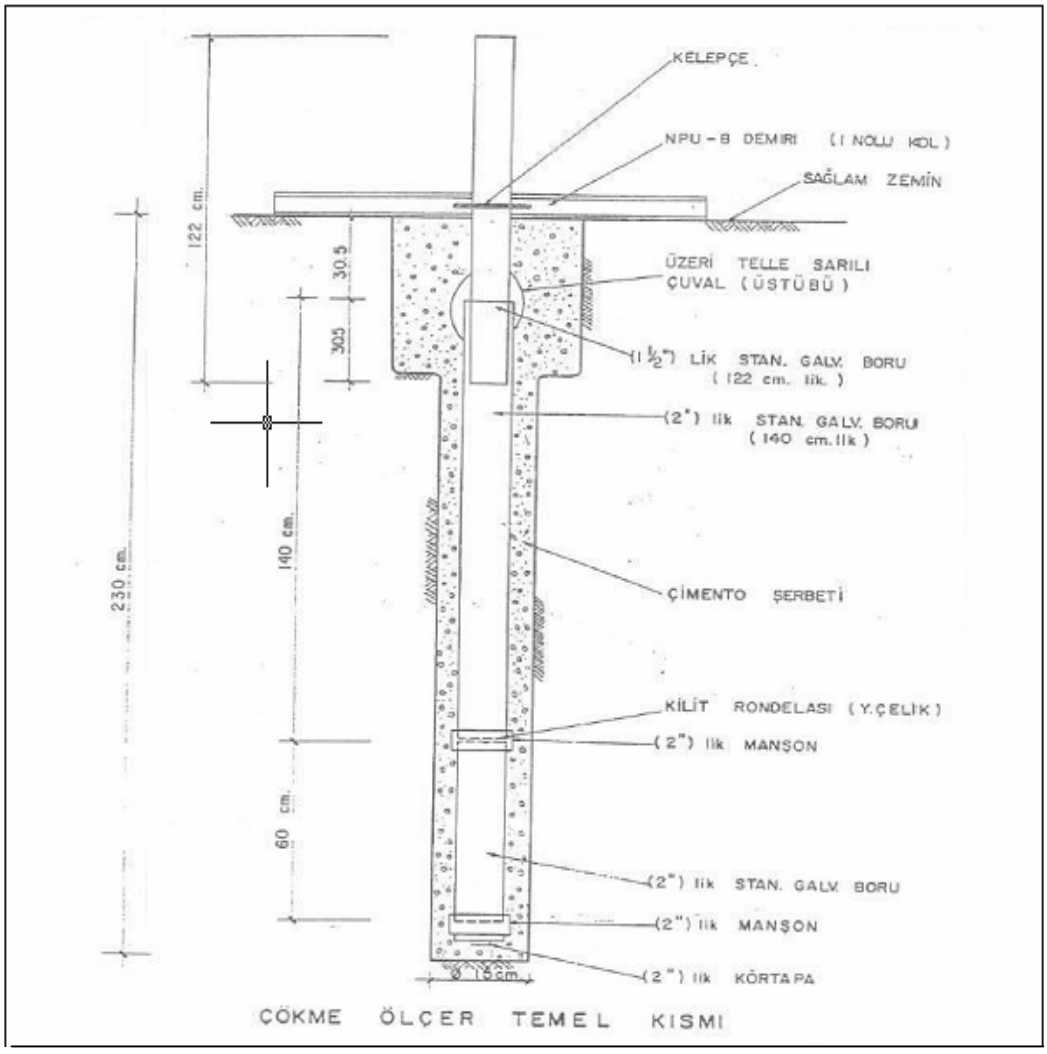
Şekil 3.4. Maihak tip elektrikli piyezometre (Durgunoğlu ve ark., 1972)

3.2. Çapraz Kollu Çökme Ölçerler

Toprak ve kaya dolgularda düşey doğrultu boyunca dolgudaki hareket miktarlarını ölçmede "Çapraz Kollu Çökme Ölçer" sistemi kullanılır. Sistem genel olarak 2 inçlik (50,80 mm) ve 1,5 inçlik (38,10 mm) galvanizli 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.

Yerleştirme işlemi temelden başlar. İlk yerleştirilen kol numarası (1)'dir. Dolgunun yüksekliğine göre önceden belirlenen aralıklar boyunca kol demirleri dolgu içerisine inşaat süresince yerleştirilir. Çapraz kollu çökme ölçerlerin temel kısmı Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Çapraz kollu çökme ölçer temel kısmı (Solakoğlu, 1983)

Çizelge 3.6. Çapraz kollu çökme ölçerlerin tesisi çizelgesi (Solakoğlu, 1983)

Projesi Barajı

ÇAPRAZ KOLLU ÇÖKME GÖSTERGELERİNİN TESİSİ

Yeri

Gösterge kol numarası	Yerleştirme tarihi	Kolun yerleştirilme kotu (m)	Notlar ve Düşünceler

Mühendis Rasat

3.2.1. Çapraz kollu çökme ölçerin yerleştirilmesi

Temel kısım

Temel kısım, (1) numaralı kol demirinin yerleştirilmesi için daha önceden temel zeminde yapılan çalışmaları içerir.

Kullanılan malzemeler

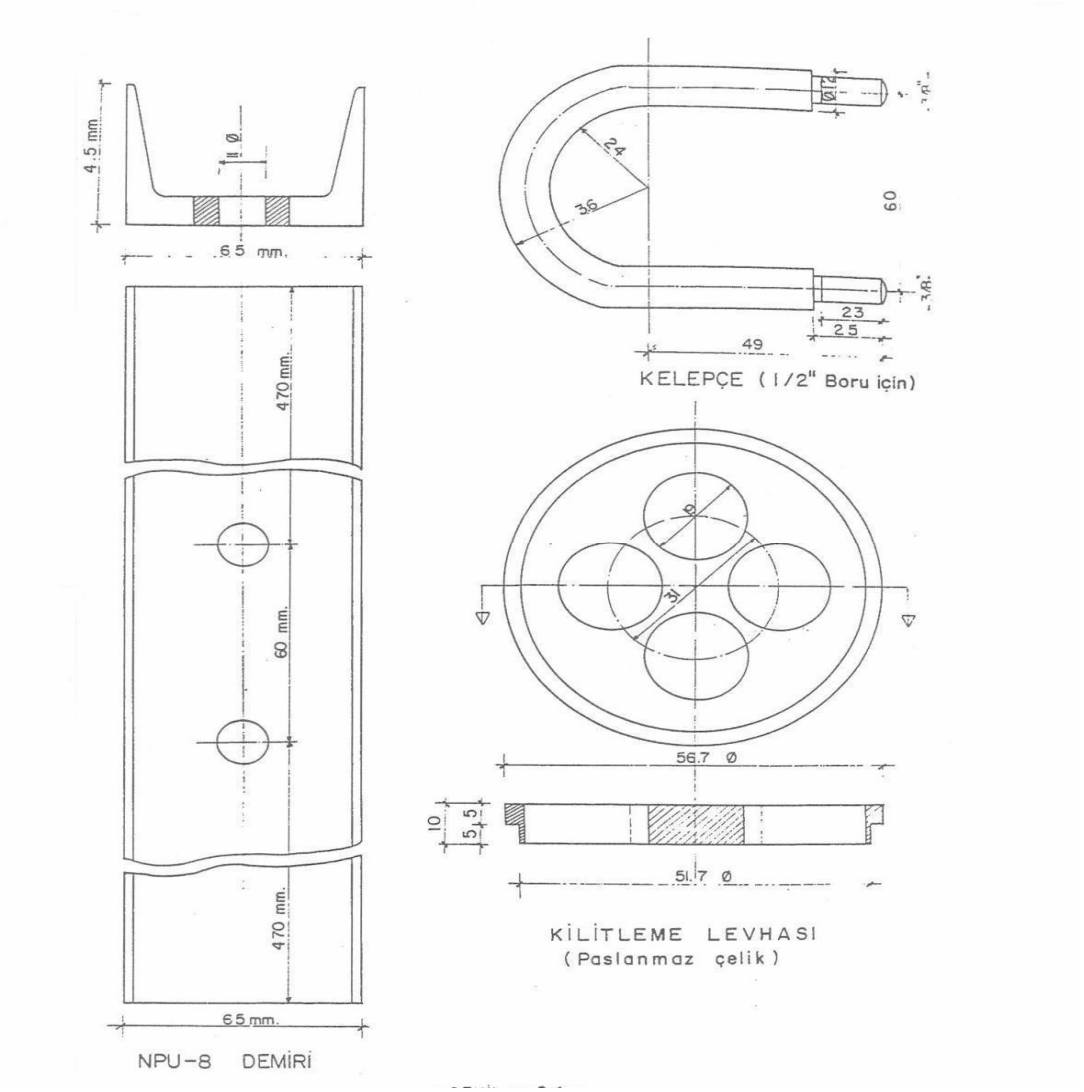
1. *Standart galvanizli boru*, 2 inç (50,80 mm), 1400 mm uzunluğunda, bir ucuna diş açılmış, Şekil 3.5'te 1 adet,
2. *Standart galvanizli boru*, 2 inç (50,80 mm), 600 mm uzunluğunda, iki ucuna diş açılmış, 1 adet
3. *Standart galvanizli boru*, 1,5 inç (38,10 mm), 1220 mm uzunluğunda, iki ucu dişsiz, 1 adet,
4. *Kol demiri*, NPU-8'lik profil demir, 1000 mm uzunluğunda, 1 adet,
5. *Kör tapa*, 2 inç (50,80 mm), üzerine delik açılmamış, 1 adet,
6. *Standart galvanizli manşon*, 2 inç, 1 adet,
7. *Kilitleme(mandallama) rondelası (levhası)*, paslanmaz çelikten, 56,7 mm. çapında, 10 mm. kalınlığında, üzerinde 19 mm çaplarında 4 adet dairesel delik
8. *Kelepçeler*, Ø12'lik inşaat demirinden, "U" biçiminde, uçlarına diş açılmış, ikişer adet somun ve rondelası üzerinde, 1 adet,
9. *Üstübü, kanaviçe, çuval ve yumuşak tel(galvanizli),*
10. *Çimento şerbeti için gerekli malzemeve avadanlık,*
11. *Kot taşımak için gerekli alet ve avadanlık.*

Yukarıda önceden hazırlanan bu parçalar, yerleştirme işleminden önce bazı parçaları birbirleriyle birleştirilir. Bu işlemler sırasıyla, 2 inçlik (50,80 mm) ve 600 mm uzunluğundaki standart galvanizli borunun bir ucuna kör tapa takılır. Aynı borunun diğer ucuna yine 2 inçlik (50,80 mm) standart galvanizli boru eklenecektir. 600 ve 1400 mm uzunluklarındaki 2 inçlik (50,80 mm) galvanizli boruların birleştirme yerine Kilitleme rondelası konulacaktır. Ortasında dört eşit büyüklükte delik bulunan paslanmaz çelikten yapılmış parçanın bu iki boru arasına konulması önemlidir. Bu parça, iki boru arasına çaplarının farklı olmalarından yararlanılarak yerleştirilir. Öte yandan, 1220 mm'lik standart galvanizli boru ile NPU-8'lik profil demirinin birleştirmesi yapılacaktır. Şekil 3.6'dan görüleceği gibi bu iki parça tam ortalarından birbirlerine dik konumda olacak biçimde kelepçe ile bağlanır.

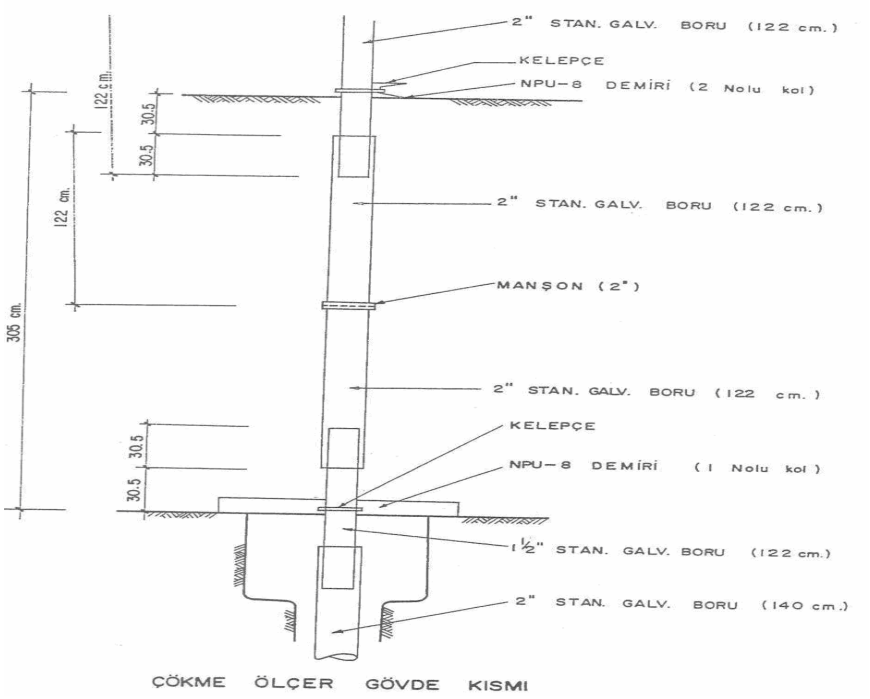
Bu birleştirmeler yapılmadan önce (1) numaralı kol demirinin yerleştirileceği kotun altında kalan zemin içerisine 150-200 mm çapında ve 2300 mm derinliğinde bir delik açılır, Delik içi temizlenir, delik dibine 30-40 mm kadar çimento şerbeti atılır. Birbirine eklenen 2 inçlik (50,80 mm) borular açılan deliğe tam düşey doğrultuda yerleştirilir. Delik içinde düşeyliği sağlanan boru delik içinde ortalanır. Boru

çevresine çimento şerbeti dökülür. Çimento, delik dibinden itibaren 1700 mm yüksekliğe kadar atılır. Zemin üst kotundan 600 mm aşağıya kadar boru çevresi betonlanır. Sonra, deliğin üst kotundan itibaren 600 mm'lik kısmı çapı yaklaşık 400 mm olacak şekilde açılır. Dökülen çimento şerbetinin sertleşmesi beklenir. Çapraz olarak birleştirilen 1,5 inçlik (38,10 mm) boru ile NPU-8'lik kol demirinin yerleştirmesine geçilir. Kol demiri tabii zemin üzerine yatay konumda yerleştirilir. Kol demirinin oturduğu zemin iyice düzlenmelidir. Düşey konumda kalan 1,5 inçlik (38,10 mm) boru da düşeyde 2 inçlik (50,80 mm) boru içerisine sokulur. Ölçülere gerekli özen gösterilirse iki borunun iç içe geçme boyu 305 mm kadardır. Böylece (1) numaralı kol yerleştirilmiş olunur. İç içe girme yeri üstübü-kanaviçe ile sarılır. Üzeri de galvanizli tel ile bağlanır. İki borunun bu bağlantısını yaparken iki borunun birbiri içinde kayması sağlanmalıdır.

(1) numaralı kol yerleştirildikten sonra (1) numaralı kol demirine dik (düşey) konumda bağlanan 1,5 inçlik (38,10 mm) galvanizli borunun alt ucunun kotu alınır. Bu kot, (1) numaralı kolun kotu olmaktadır. Bu değer Çizelge 3.6'ya yazılır. Daha sonra (1) numaralı kolun yerleştirildiği tabii zeminden örselenmemiş numune alınır. Zemin dışında kalan 1,5 inçlik (38,10 mm) borunun 610 mm'lik kısmı korunmalıdır.



Şekil 3.6. NPU-8 demiri ve kilitleme levhası (Solakoğlu, 1983)



Şekil 3.7. Çapraz kollu çökme ölçer gövde kısmı (Solakoğlu, 1983)

Dolgu kısmı

Bu kısım, dolgu inşaatı süresince devam eder. Dolgu inşaatı sırasında kolların projesindeki kotlarına ulaşıldıkça yerleştirme yapılır. 2 numaralı kolun yerleştirilmesi anlatılacaktır. Çapraz kollu çökme ölçerin gövde veya dolgu kısmı Şekil 3.7'de görülmektedir.

Kullanılan malzemeler

1. *Standart galvanizli boru*, 2 inç (50,80 mm), 1220 mm uzunluğunda, bir ucuna diş açılmış, 2 adet,
2. *Standart galvanizli boru*, 1,5 inç (38,10 mm), 1220 mm uzunluğunda, uçları dişsiz, 1 adet
3. *Standart galvanizli manşon*, 2 inç (50,80 mm), 1 adet,
4. *Kol demiri*, NPU-8'lik profil demir, 1000 mm uzunluğunda, 1 adet,
5. *Kelepçe*, Ø12'lik inşaat demirinden, "U" biçiminde, uçlarına diş açılmış, 1 adet,
6. *Üstübü, kanaviçe, çuval ve yumuşak tel(galvanizli)*
7. *Nivo-mira-şeritmetre***,** kot taşımak için.
8. *Ölçüm torpili,*
9. *Gerekli olabilecek diğer alet ve malzemeler.*

2 inçlik (50,80 mm) standart galvanizli borular manşon ile birleştirilir. 1,5 inçlik (38,10 mm) standart galvanizli boru ile kol demiri dikey konumda tam ortalarından rijit olarak kelepçeleriyle birleştirilir.

(1) ile (2) numaralı kollar arasına birleştirilmiş iki adet 2 inçlik (50,80 mm) galvanizli borular gelmiştir. Bu boru yine altta ve üstte (1 ve 2 numaralı kol demirinin bağlı olduğu) 1,5 inçlik (38,10 mm) galvanizli boruların üzerine geçer. İki boru iç içe 305 mm kadar girer. Bu iç içe giriş kısımları yine üstübü-kanaviçe ile sarılıp yumuşak galvanizli tel ile sarılır.

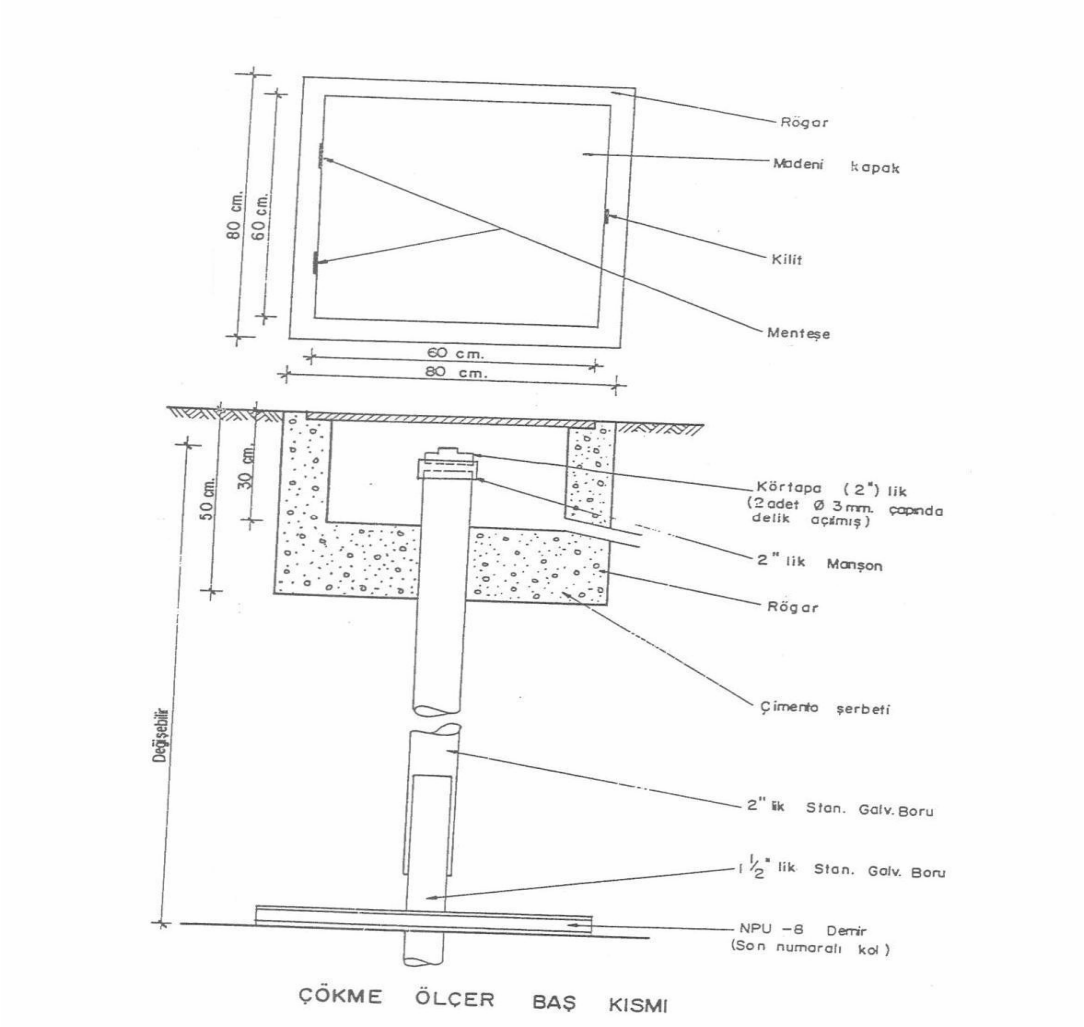
(2) numaralı kolun yerleştirilmesinde yapılması gereken üç işlem vardır:

Birincisi yerleştirilen (2) numaralı kolun kotu ölçülür. Yani bu o kolun bağlı bulunduğu 1,5 inçlik (38,10 mm) boru alt ucunun kotu olmaktadır.

İkincisi, bu kot alındıktan sonra ölçüm torpili ile bir önce yerleştirilmiş olan (1) numaralı ucun kotu ölçülür.

Üçüncü olarak dolgu malzemesinden numune alınır.

2 numaralı kolun yerleştirilmesinde şu durum dikkate alınır. 1 numaralı kol demiri Doğu-Batı doğrultusu boyunca temel zemin üzerine yerleştirilmiş ise 2 numaralı kol demiri Kuzey-Güney doğrultusu boyunca dolgu düzlemi üzerine yerleştirilir.



Şekil 3.8. Çapraz kollu çökme ölçer baş kısmı (Solakoğlu, 1983)

Baş kısmı

Dolgu inşaatı boyunca yerleştirilen kollardan SON KOL yerleştirildikten sonra dolgu dışına kadar uzanan boru kısmının tamamına "Baş Kısmı" denilir. Çapraz kollu çökme ölçerin baş kısmı Şekil 3.8'de görülmektedir.

Kullanılan malzemeler

1. *Standart galvanizli boru*, 2 inç (50,80 mm), uzunluğu son kol demirinden dolgu dışına 500-600 mm kadar, 1 adet,
2. *Standart galvanizli manşon*,
3. *Kör tapa*, 2 inç (50,80 mm), üzerinde, Ø3-4 mm. çapında iki delik açılmış, 1 adet,

4. *Nivo-mira-şeritmetre***,** kot taşımak için.
5. *Ölçüm torpili***,**
6. *Tespit betonu için gerekli malzeme ve avadanlık.*

Boru, dolgu dışına ya mansap şevinden ya da kret üzerinden çıkar. Son koldan sonra yerleştirilen 2 inçlik (50,80 mm) borunun dişsiz kısmı son kol demirine bağlı 1,5 inçlik (38,10 mm) galvanizli boru ile iç içe sokulur. Bilindiği gibi üstübü kanaviçe ile sarılıp tel ile bağlanır. Borunun diğer ucu dolgu dışına çıkarılır. Dolgu dışına çıkan borunun dolgu dışındaki uzunluğunun normal şartlarda 500-600 mm dolaylarında olması uygundur. En son konulan bu 2 inçlik (50,80 mm) borunun bu ucu dişli olmalıdır. Çünkü bu uç delikli kör tapa ile kapatılacaktır.

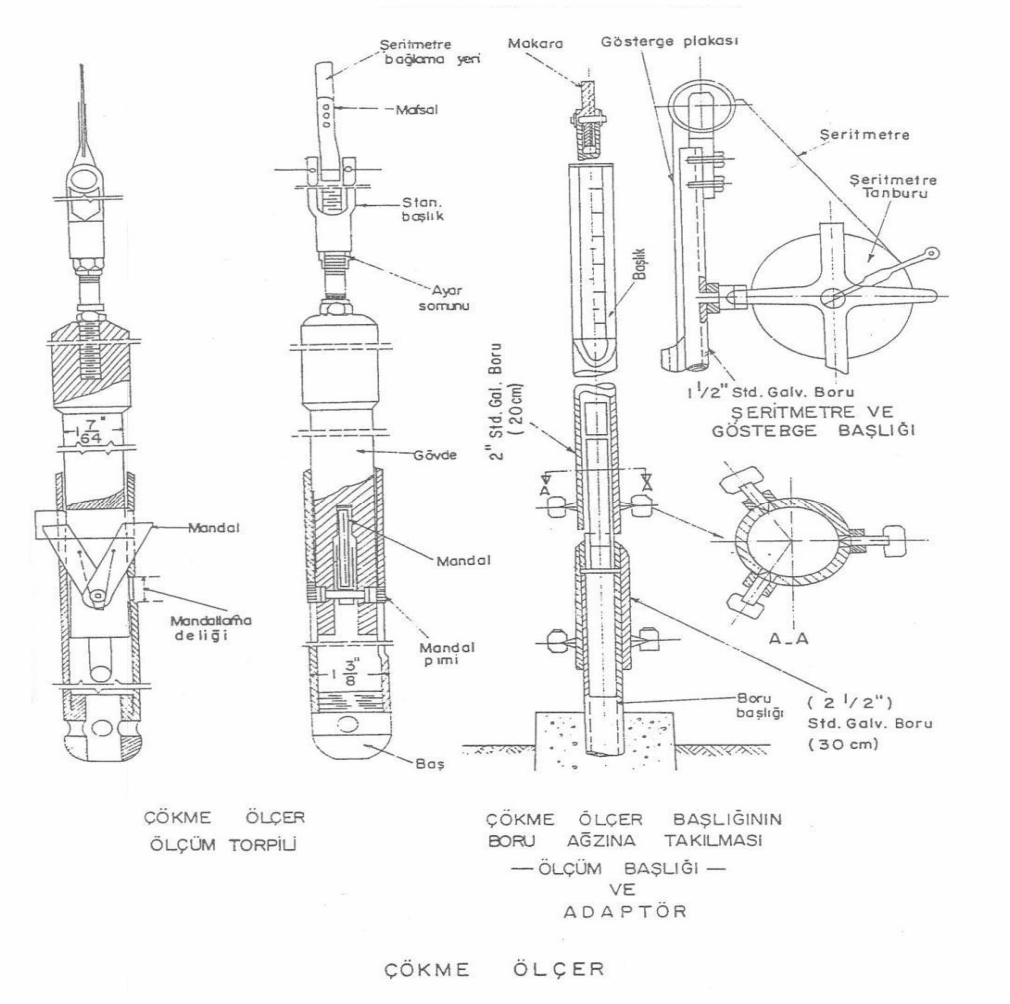
Betonun şev üzerinden dolgu dışına çıkması halinde boru dibine tesbit betonu atılır. Üzerine gerekli bilgiler silinmeyecek biçimde yazılır.

Borunun kret üzerinden çıkması durumunda ise yine aynı biçimde bir uygulama yapılabilir. Ancak bu durumda borunun zarar görmesi muhtemel olduğundan Şekil 3.8'deki gibi rögar içerisine alınması mümkündür.

Son kol yerleştirildikten sonra, son kolun bağlı olduğu 1,5 inçlik (38,10 mm) borunun alt uç kotu ölçülür. Bu değer tarihi ile birlikte Çizelge 3.6'daki çizelgeye yazılır. İkinci olarak da ölçüm torpili ile bütün kolların kotları ölçülür. Bu değerler ayrı bir listeye yazılır.

3.2.2. Çapraz kollu çökme ölçer ile ölçüm alınması

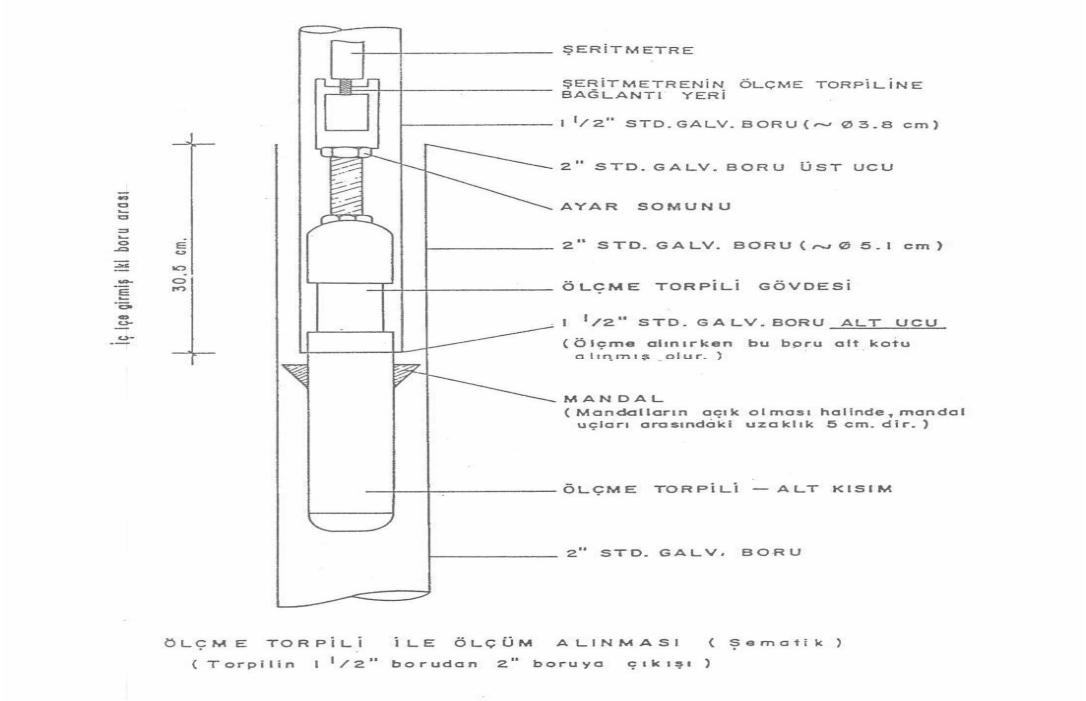
Çapraz kollu çökme ölçer ile ölçme yapmak için en ideal yöntem torpilin göstergeli ölçüm başlığı kullanarak ölçüm alınmasıdır. Şeritmetre ucuna bağlanmış ölçüm torpili ile de ölçme yapılabilir.



Şekil 3.9. Ölçüm torpili (Solakoğlu, 1983)

<u>Ölçüm alınmasında kullanılan parçalar:</u>

1. Ölçüm torpili
2. Ölçüm başlığı
3. Şeritmetre
4. Topografik aletler



Şekil 3.10. Ölçüm torpili ile ölçüm alınması (Solakoğlu, 1983)

Çizelge 3.7. Çapraz kollu çökme ölçer kayıt çizelgesi (Solakoğlu, 1983)

KOLLU ÇÖKME ÖLÇER OKUMALARI .....SAYFA

GÖSTERGE NO : . . . . . KESİT NO : . . . . . .PROJESİ

GÖL SU KOTU (m) : . . . . . BARAJI

ÖLÇÜM TARİHİ : / / BÖLGESİ

ÖLÇÜMÜ YAPAN : . . . . . .

① GÖSTERGE KOL NUMARASI	② GÖSTERGE KOLUNUN ORİJİNAL KOTU (m)	③ GÖSTERGE KOLUNUN ŞİMDİKİ KOTU (m)	④ (+) KOLDAKİ OTURMALAR (2) ile (3) ün farkı (+ —)	⑤ GÖSTERGE KOLLARI ARASINDAKİ ORİJİNAL UZAK. (*) Nota bak.	⑥ GÖSTERGE KOLLARI ARASINDAKİ ŞİMDİKİ UZAKLIK (3) Farkı	⑦ (+) GÖSTERGE KOLLARI ARASINDAKİ DEĞİŞİM (5) (6) Farkı

* 2. Sütundaki orijinal kotların farkı değildir. Son kol yerleştirilir. Kotu ölçülür. Aynı anda bir önceki kolun kotuda ölçülür. Bu iki kot farkıdır.

\+ Fark (+) (—) çıkabilir (+) Aşağı doğru hareketi ,(—) yukarı doğru hareketi ifade eder. Yani, oturmayı (+), (—) şişmeyi gösterir.

KONTROL EDEN :

3.2.3. Çapraz kollu çökme ölçer okumalarının yazılması

(Gösterge kol numarası) 1.sütun

Dolgu içerisine yerleştirilen kol demirlerinin yerleştirme sırasına göre verilen numaralarıdır. İlk konulan kol demiri (1), en son yerleştirilen kol demiri numarası da (20) olsun. Bu sütuna yukarıdaki sıralamaya göre yazım sırası aşağıya doğru (20, 19, 18,..3, 2, 1) biçiminde yazılır.

(Gösterge kolunun orijinal kotu) 2.sütun

NPU-8'lik kol demiri yerleştirilir. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra kol demirine bağlı bulunan 1,5 inçlik (38,10 mm) borunun alt ucunun kotu alınır. Bu değer Çizelge 3.7'deki çizelgeye not edilir. Bu işlem, yerleştirme sırasında yapılan bir önemli son işlem idi. Bu kola ait alınan kot o kolun orijinal kotu olarak bu sütuna yazılır.

(Gösterge kolunun şimdiki kotu) 3.sütun

Kollu çökme ölçerde ölçüm yapıldığında bulunan kol kotları bu sütuna yazılır.

(Koldaki oturmalar) 4.sütun

Bu sütundaki değerler, orijinal kot ile şimdiki kot arasındaki fark olmaktadır. Yani, bu sütuna 2. ve 3. sütunlardaki değerlerin farkı yazılır.

Orijinal kot, şimdiki kot değerinden büyük olması halinde kolda oturma olmuştur. İşareti (+) olup değerin başına yazılmaz. Bunun aksi durumunda yani orijinal kot şimdiki kot değerinden küçük olması halinde kolda oturmanın tersi olarak şişme olduğu kabul edilir ve değerin başına (-) işareti konulur.

(Gösterge kolları arasındaki orijinal uzaklık) 5.sütun

Bu değer, bir kolun yerleştire sonunda alınan orijinal kotu ile bir önce yerleştirilmiş olan kolun hemen ölçülen kotu arasındaki farktır.

(Gösterge kolları arasındaki şimdiki uzaklık) 6.sütun

Ölçüm alındığı sırada bulunan kollara ait kot farklarıdır. Yani 3. sütundaki kot farklarıdır.

(Gösterge kolları arasındaki değişim) 7.sütun

Kollar arasındaki uzaklığın değişim sonucudur. 5. ve 6. sütunlardaki değerlerin farkıdır.

4. KAYA DOLGU BARAJLARIN DEFORMASYON DAVRANIŞI

Bir kaya dolgu barajın deformasyonu, efektif gerilmelerin artmasına sebep olan inşa faaliyetiyle başlar. Sonraki deformasyonlar rezervuarın ilk dolumuna bağlı olarak oluşur. Rezervuar dolduktan sonra, su seviyesindeki dalgalanmalar haricinde deformasyonun zamanla değişim oranı azalır. Kaya dolgu barajların deformasyonları düşey ve yatay bileşenleriyle bağlantılı olarak değerlendirilebilir. Yatay deformasyonlar ise, memba-mansap yönleri ve enine-vadi yönleri olmak üzere iki kategoride incelenebilir.

4.1. Lineer Olmayan Malzeme Modelleri

Barajlar modellenirken lineer olmayan, elastik olmayan ve gerilme-bağımlı malzeme modellerinin kullanılması daha gerçekçi bir yöntemdir. Bu çalışmada, lineer olmayan model olarak "sertleşen zemin modeli" seçilmiştir. "Sertleşen zemin modeli", Duncan ve Chang tarafından geliştirilen hiperbolik model temel alınarak geliştirilmiştir [Schanz ve ark., 1999]. Aşağıda hiperbolik ve sertleşen modelin temel özellikleri özetlenecektir.

4.1.1. Hiperbolik model

Kaya dolgu malzemesinin lineer olmayan malzeme parametreleri, Kondner (1963) tarafından geliştirilen ve Duncan ve Chang (1970) ve Kulhawy ve Duncan (1972) tarafından genişletilen hiperbolik gerilme-şekil değiştirme fonksiyonunu temel alır. Kullanılan kırılma kriteri Mohr-Coulomb'tur.

Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. σ_1 ve σ_3 en büyük ve en küçük asal gerilmeler, ε eksenel şekil değiştirme, E_i başlangıç tanjant modülü ve a ve b deney sonucu tanımlanan sabitlerdir. Şekil 4.1, Şekil 4.2'deki gibi yeniden çizilirse a ve b daha kolay tanımlanabilir [Duncan ve Chang, 1970].

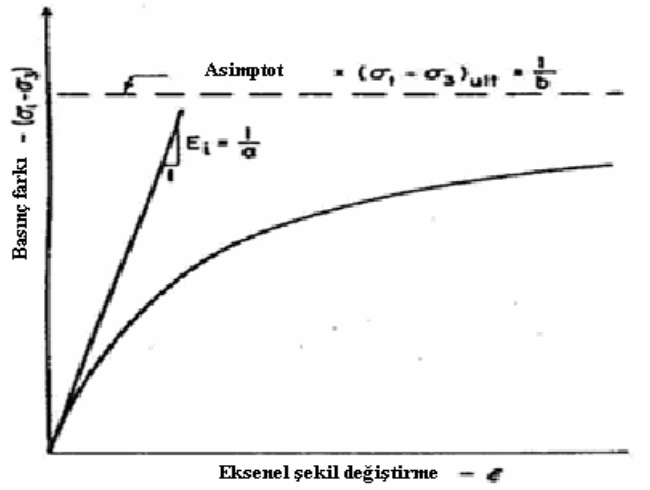
Hiperbolün asimptotik değeri, R_f ile gösterilen, basınç dayanımı ile ilgili faktörle Eş. 4.1'de şu şekilde ilişkilendirilebilir:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f.(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \tag{4.1}$$

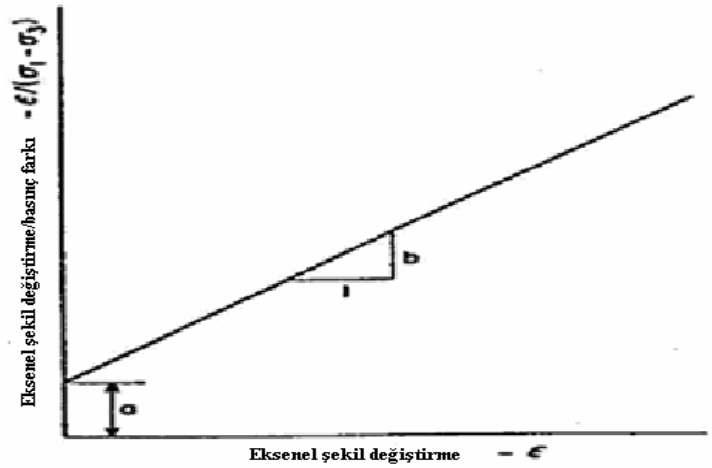
$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: Basınç dayanımı veya kırılma anındaki gerilme farkı

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: Gerilme farkının asimptotik değeri

R_f : Kırılma oranı (0,75 ile 1,00 arası, basınçtan bağımsız)



Şekil 4.1. Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Duncan ve Chang, 1970)



Şekil 4.2. Dönüştürülmüş hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Duncan ve Chang, 1970)

Başlangıç tanjant modülü, E_i, Janbu (1963)'nun deneysel çalışmaları sonucu Eş. 4.2'deki gibi tanımlanmıştır:

$$E_i = K.P_a.\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \tag{4.2}$$

P_a: Atmosfer basıncı

σ_3: Küçük asal gerilme

K: Modül sayısı

n: Hiperbolik üs sayısı

İlk olarak Kondner (1963) tarafından önerilen Duncan ve Chang gerilme-şekil değiştirme modeli temelli elastik tanjant modülü Eş. 4.3'te verilmiştir:

$$E_t = \left(1 - R_f.m\right)^2.E_i \tag{4.3}$$

E_t: Belirli bir gerilme seviyesindeki elastik tanjant modülü

R_f: Kırılma oranı, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$

m: Mobilizasyon faktörü, $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)_f$

E_i: Belirli bir basınç altındaki başlangıç elastisite modülü

Elastik tanjant modülünü tanımlamada Mohr-Coulomb kırılma kriteri kullanılarak elde edilen Eş. 4.4 aşağıdaki gibidir:

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f.(1-\sin\phi).(\sigma_1 - \sigma_3)}{2.c.\cos\phi + 2.\sigma_3.\sin\phi}\right]^2.E_i \tag{4.4}$$

c: Zeminin kohezyonu

ϕ: İçsel sürtünme açısı

σ_1, σ_3: En büyük ve en küçük asal gerilmeler

Kulhawy ve Duncan (1972) tarafından üç eksenli basınç deneyi boyunca meydana gelen hacim değişikliklerini tanımlamak için geliştirilen Tanjant Poisson oranı υ_t, Eş. 4.5'te verilmiştir:

$$\upsilon_t = \frac{G - F.\log\frac{\sigma_3}{P_a}}{\left\{1 - \frac{d.(\sigma_1 - \sigma_3)}{K.P_a.\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n.\left[1 - \frac{R_f.(1-\sin\phi).(\sigma_1-\sigma_3)}{2.c.\cos\phi + 2.\sigma_3.\sin\phi}\right]}\right\}^2} \tag{4.5}$$

G, F, d: Poisson oranı parametreleri

4.1.2. Sertleşen model

Hiperbolik model, zemin davranışını iyi kavramasına ve modelin uygulanması sonucunda önemli sonuçlara ulaşmasına rağmen, yükleme ve boşaltma şartlarını ayrı ayrı değerlendirmediği için önemli bir zayıf noktaya sahiptir. Sertleşen model hiperbolik modelin geliştirilmiş halidir. Bu yeni model elastisite teorisi yerine plastisite teorisini temel almaktadır ve ayrıca zeminin hacim artışını da hesaba katmaktadır [Schanz ve ark., 1999].

Düşey şekil değiştirme ε_1 ile deviatör gerilme q arasındaki hiperbolik ilişki, drenajlı üç eksenli basınç deneyi kullanılarak Eş. 4.6'da gösterilmiştir:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2.E_{50}}.\frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{q< } q_f \text{ için} \tag{4.6}$$

q_f : Son deviatör gerilme

q_a : Kayma dayanımının asimptotik değeri

E_{50} : İlk yükleme için gerilme-bağımlı rijitlik modülü

q_f ve q_a için elde edilen Eş. 4.7 aşağıdaki gibidir:

$$q_f = (c.\cot\phi - \sigma_3)\frac{2\sin\phi}{1-\sin\phi},\ q_a = \frac{q_f}{R_f} \tag{4.7}$$

c, ϕ_p : Dayanım parametreleri

İlk yükleme için, E_{50} basınç-bağımlı modül için kullanılır. E_{50} için geliştirilen Eş. 4.8 aşağıdaki gibidir:

$$E_{50} = E_{50}^{\ ref}.\left(\frac{c.\cos\phi - \sigma_3\sin\phi}{p^{ref}\sin\phi + c.\cos\phi}\right)^m \tag{4.8}$$

p_{ref} : Referans basınç, $-\sigma_3$

m: Gerilme bağımlılık miktarı

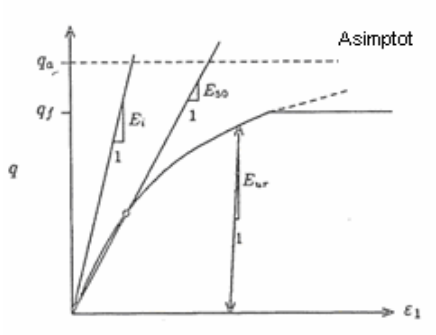
E_{50}^{ref} : Referans rijitliğe karşılık gelen referans rijitlik modülü

Bu ilişki Şekil 4.3'te gösterilmiştir. R_f, 1,00'den küçük olmalıdır ve başlangıçta 0,90 alınabilir. Gerilme-bağımlı parametre "m" yumuşak zeminler için 1, sıkı zeminler için 0,50 olarak kabul edilebilir [Schanz ve ark., 1999].

Boşaltma ve yükleme durumları için, E_{ur} parametresi kullanılır:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref}.\left(\frac{c.\cos\phi - \sigma_3\sin\phi}{p^{ref}\sin\phi + c.\cos\phi}\right)^m \tag{4.9}$$

E_{ur}^{ref} : Referans basınç p^{ref}'e karşılık gelen boşaltma ve yükleme için referans rijitlik modülü



Şekil 4.3. Sertleşen model için hiperbolik gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Schanz ve ark., 1999)

4.2. Deformasyonların Karakteristikleri

4.2.1. Genel

Baraj deformasyonlarının izlenmesi, baraj güvenliğinin değerlendirilmesi açısından yardımcı olacak ipuçları sunabilir. Barajlar genellikle yıkılmadan önce, deformasyon oranının artması, şekil değiştirme düzensizlikleri, çatlamalar, sızma veya boşluk suyu basıncının artması gibi uyarıcı sinyaller gönderir.

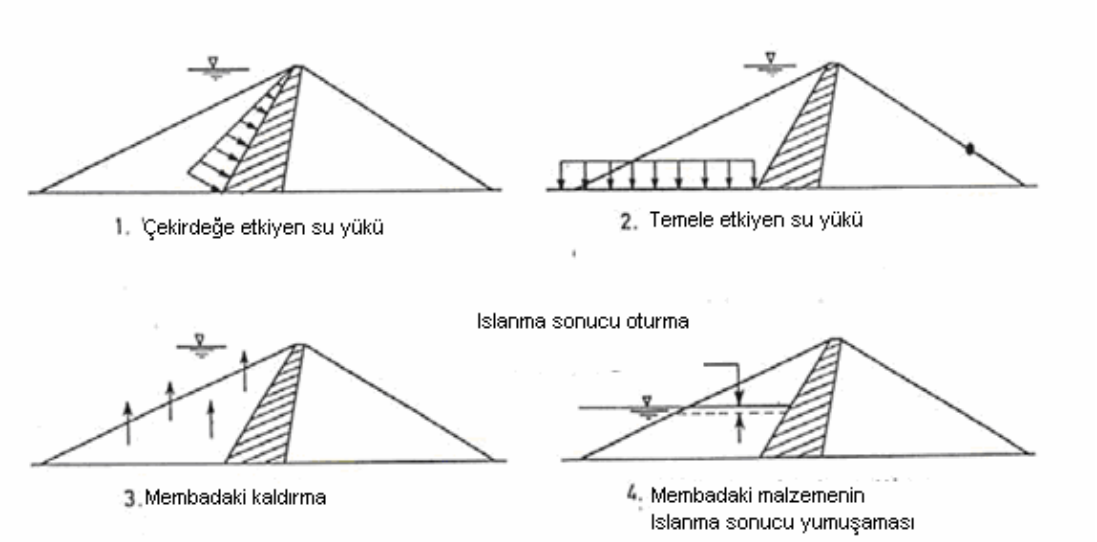
Sağlam, sıkı, iyi derecelenmiş kaya kullanılarak ve düşük kalınlıklı tabakaların sıkıştırılması suretiyle kademeli olarak inşa edilen kaya dolgu barajların göreceli olarak küçük deformasyonlar yapması beklenir. Bu deformasyonların büyük miktarı inşa aşamasında ortaya çıkar [Singh ve Varshney, 1995].

4.2.2. Rezervuar dolumunun kaya dolgu baraj deformasyonlarına etkisi

Yapılan araştırmalar, bir barajda önemli hasarların -yüksek miktarda yatay ve düşey hareketler gibi- genellikle rezervuar dolumuna bağlı olarak oluştuğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Rezervuar dolumuna bağlı olarak gelişen deformasyonların temelde iki önemli nedeni vardır. Birincisi oluşan su yükünün kaya dolgu ve temel üzerindeki etkisi, ikincisi dolgu malzemesinin ıslanma sonucu yumuşaması ve zayıflamasıdır. İlk neden standart sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilebilir, ikinci standart sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilemez. Yumuşama ve ıslanma, toprak dolgu

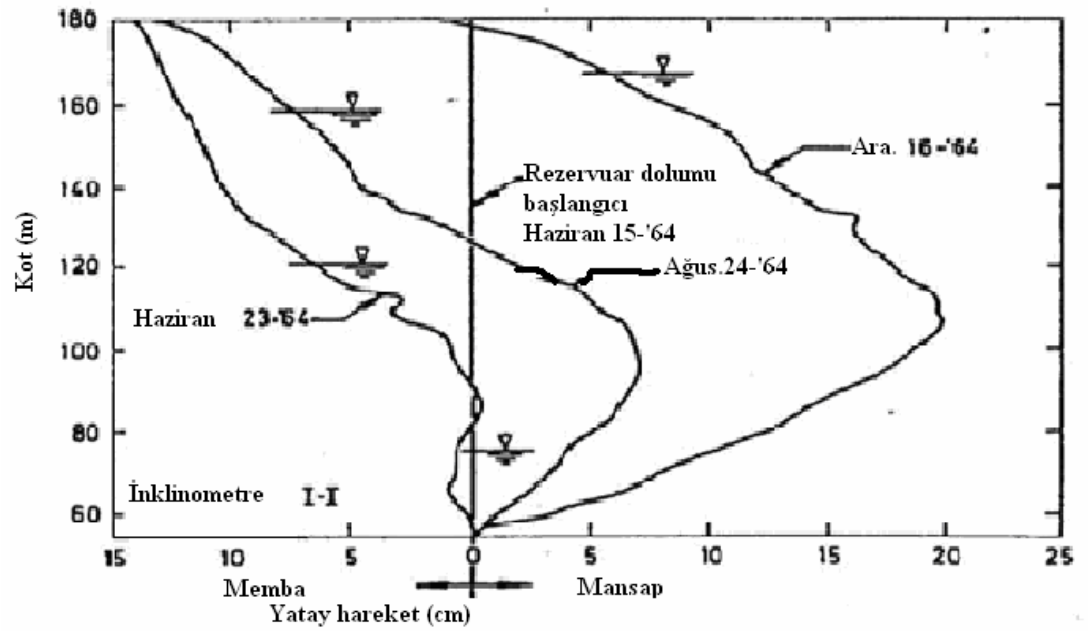
barajların genellikle ıslak bölümlerindeki önemli gerilme değişimlerine bağlı olarak değerlendirilir [Nobari ve Duncan, 1972].

Rezervuar dolum etkileri Şekil 4.4'te basit bir şekilde gösterilmiştir. İlk üç şekil su yükünü, dördüncü şekil ise memba tarafı kaya dolgu malzemesinde oluşan yumuşama ve ıslanmayı ifade etmektedir.



Şekil 4.4. Bir kaya dolgu barajda rezervuar dolumunun etkisi (Nobari ve Duncan, 1972)

Bu konuda ilgi çekici bir örnek olması açısından, El İnfiernillo Barajı'nın çekirdeğindeki rezervuar dolumuna bağlı deformasyonlar Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Çekirdeğin ilk hareketi, memba koruyucu malzemesinin yumuşamasına bağlı olarak rezervuar kotunun 80 m'den 120 m'ye yükseldiğinde görülmektedir. Deformasyonların yönü membaya doğrudur. Sonra, su seviyesi 160 m'ye ulaştığında küçük bir mansap hareketi meydana gelmektedir. Son olarak, su seviyesi 170 m kotuna ulaştığında büyük bir mansap hareketi oluşmaktadır. Rezervuar dolumunun başlangıcında, yumuşama hareketi baskındır. Fakat ikinci bölümün dolumu göz önüne alındığında su yükünün baskın olduğu görülmektedir [Nobari ve Duncan, 1972].



Şekil 4.5. El İnfiernillo Barajı'nın rezervuar dolumu boyunca davranışı (Nobari ve Duncan, 1972)

4.2.3. Kaya dolgu modülünün belirlenmesi

Fitzpatrick ve ark. (1985), kaya dolgunun deformasyon davranışının tarifinde iki kaya dolgu modülü tanımlamıştır. Birincisi E_{rc} inşa davranışını, diğeri E_{rf} ise ilk dolum davranışını göstermektedir (Şekil 4.6). E_{rc} ve E_{rf} 'nin formülleri Eş. 5.2 ve Eş. 5.3'te aşağıdaki gibidir:

$$E_{rc} = \gamma.H.d_1 / \delta_s \tag{5.2}$$

$$E_{rf} = \gamma_w.h.d_2 / \delta_n \tag{5.3}$$

E_{rc} : MPa boyutundadır.

E_{rf} : MPa boyutundadır.

γ : Kaya dolgu birim hacim ağırlığı, (kN/m³).

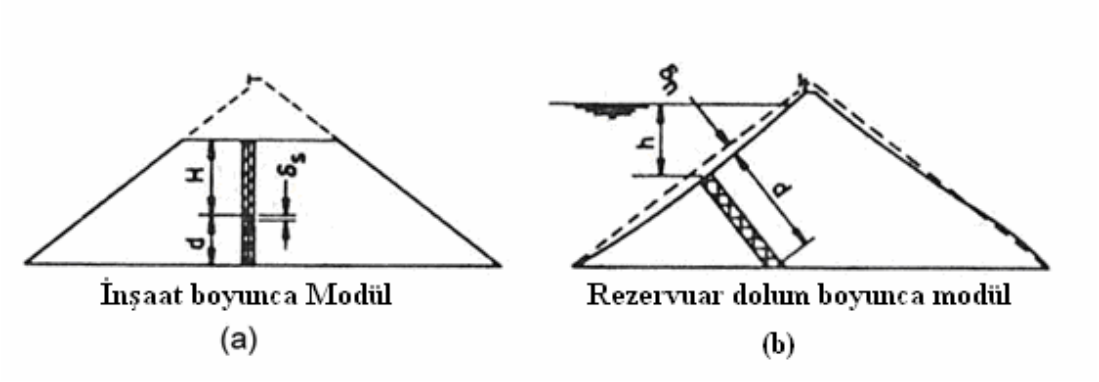
δ_s : Şekil 5.3'te gösterilen H'nin inşasına bağlı olarak seçilen d_1 kalınlığının oturması (mm).

δ_n : Rezervuar dolumuna bağlı olarak baraj yüzünün su yüzeyinin "h" derinliğindeki sapması (mm).

H: Yükseklik, metre boyutundadır.

d_1, d_2 : metre boyutundadır.

E_{rf} sadece baraj yüzeyi deformasyonlarının tayininde kullanılır. "Gerçek" bir modül olarak değerlendirilmemelidir (Hunter ve Fell, 2003).



Şekil 4.6. Kaya dolgu modülünün belirlenmesi (Fitzpatrick ve ark., 1985)

Bazı barajlar için seçilen E_{rc} ve E_{rf} değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelgeden görülmektedir ki, inşa faaliyeti esnasında ölçülen modülle rezervuar dolum esnasında ölçülen modül aynı değere sahip değildir. Rezevuar dolum aşamasındaki modül, eğer su tutma işlemi kısa sürede tamamlandıysa inşa aşamasındaki modülden büyüktür. Su tutma işlemi uzun sürede tamamlandıysa inşa aşamasındaki modülden küçük bir değer alacaktır [Fitzpatrick ve ark., 1985].

Çizelge 4.1. Bazı barajların E_{rc} ve E_{rf} değerleri (Fitzpatrick ve ark., 1985)

Baraj adı	Kaya tipi	E_{rc} (MPa)	E_{rf} (MPa)
Wilmot	Grovak-Kuvarsit	115	160
Cethana	Kuvarsit	145	310
Paloona	Çört	75	115
Serpentine	Kuvarsit	115	95
Mackintosh	Grovak	40	95
Tullabardine	Grovak	90	170
Murchison	Riyolit	225	650
Bastyan	Riyolit	160	300
Lower Pieman	Dolerit	160	-

4.3. Kaya Dolgu Barajların Deformasyon Analizi

Sowers ve ark. (1965) tarafından inşaatları bittikten sonra 10 yıl boyunca 14 adet barajın oturması araştırılmış ve oturmalar, baraj yüksekliğinin % 0,25'i ile % 1'i arasında bulunmuştur. Ayrıca, bu oranların yükseklikten ve kaya dolgu karakteristiklerinden bağımsız olduğuna işaret edilmiştir. Oturma eğrilerinin hemen hemen lineer olduğu ve logaritmik çizilen eğrilerin klasik zemin konsolidasyon eğrilerine benzediği belirtilmiştir. Oturmaların inşa metoduna bağlı olduğu ifade edilerek, örnek olarak inşa esnasında drenajın sağlanmasının oturmaların azaltılmasında önemli bir faktör olduğu gözlemlenmiştir [Dascal 1987, Sowers ve ark., 1965'ten sonra].

Lawton ve Lester (1964), 1925-1964 yılları arasında 11 adet barajı analiz etmişler ve bir barajın inşa sonrası maksimum oturmasını Eş. 5.1'deki gibi ifade etmişlerdir:

$$S = 0{,}001.H^{3/2} \tag{5.1}$$

S: Barajın toplam oturması (m)

H: Barajın yüksekliği (m)

Aynı çalışmada, geçirimsiz memba kaplamalı ve hızlı doldurulan barajların oturmasının % 85'e kadarlık kısmının ilk yılda tamamlandığı gözlemlenmiştir [Dascal 1987, Lawton ve Lester 1964'ten sonra].

Ayrıca, geçirimsiz çekirdeğe sahip ve göreceli olarak yavaş doldurulan barajlarda oturmanın % 50'sine kadar olan kısmına ilk yılda ulaşıldığı ifade edilmiştir [Dascal 1987, Lawton ve Lester 1964'ten sonra].

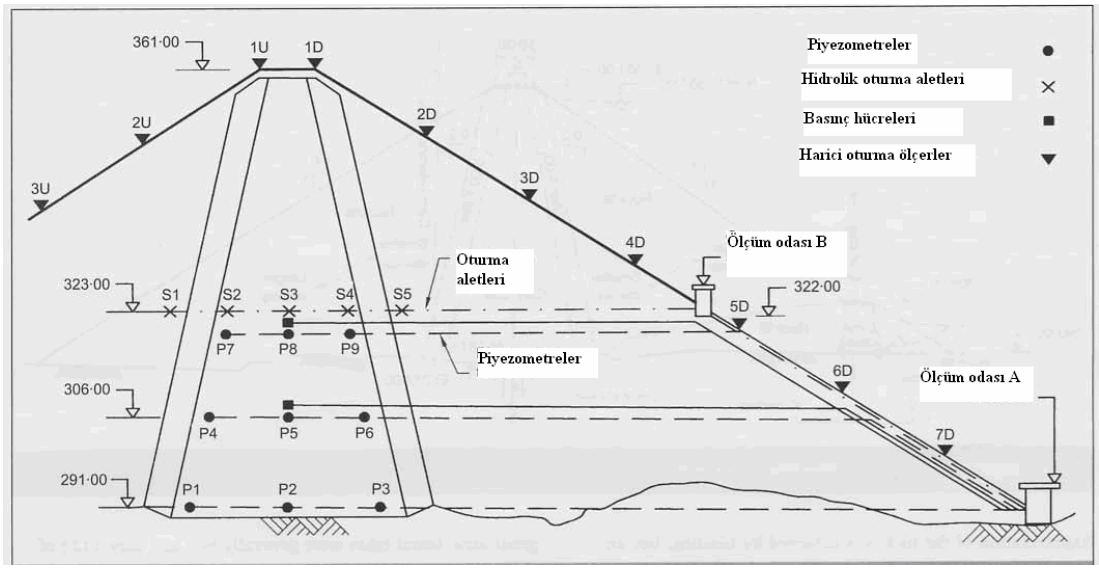
Clements (1984), 68 barajı incelemiş ve aynı karakteristiklere sahip barajların verilerinin baraj davranışının tahmininde kullanılabileceğini belirtmiştir [Dascal 1987, Clements 1984'ten sonra].

Dascal (1987), kaya üzerine oturan, yükseklikleri 10-168 m arasında değişen 15 bent ve barajın inşa sonrası kret oturmalarını incelemiş, oturma eğrilerinin logaritmik olarak çizilmesi sonucunda eğrilerin klasik zemin konsolidasyon eğrilerine benzediğini ifade etmiştir. Bu eğrilerin üç oturma aşaması meydana getirdiğini, birincisinde başlangıçta az miktarda oturmaların oluştuğunu, ikinci aşamada önemli miktarda oturmaların oluştuğunu, son aşamada ise oturmalarda sürekli bir azalmanın meydana geldiğini belirtmiştir.

Dascal (1987) çalışmasında, pratikte bir barajın yıllık oturma miktarı % 0,02 H'den az bir değer aldığında toplam oturmaya ulaşıldığı ve inşa faaliyeti bittikten 24-30 ay sonra oturmanın büyük ölçüde tamamlandığı sonucuna ulaşmıştır.

Charles (2009), Galler'de inşa edilmiş bir kil çekirdekli kaya dolgu barajı olan Brianne Barajı'nın inşaat safhası oturma davranışı incelenmiştir. Brianne Barajı 1971 yılında inşaatı tamamlanan, 90 m yüksekliğinde kil çekirdekli kaya dolgu bir barajdır. Memba şevi 1 D:2 Y, ortalama mansap şevi ise 1 D:1,75 Y'dır. Dolgu oturmaları, baraj gövdesinde kurulu bulunan ölçüm aletleriyle kayıt altına alınmıştır. Brianne Barajı'nın inşa aşamasındaki oturması 2,30 m olarak ölçülmüştür. Bu değer yüksekliğin % 2,55'ine karşılık gelmektedir.

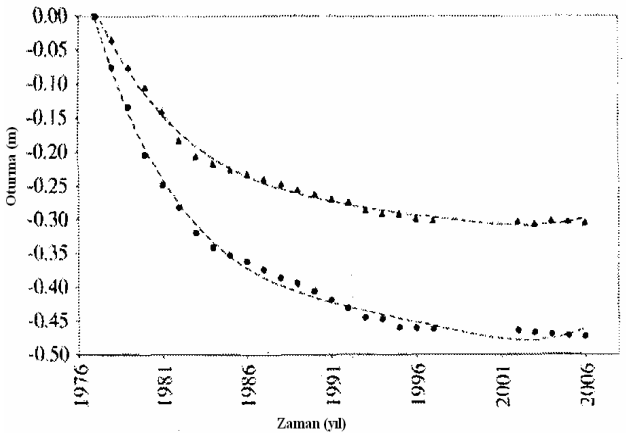
Kyrou ve ark. (2005), Güney Kıbrıs'ta inşa edilmiş Lefkara Barajı'nın 30 yıllık oturma davranışını incelemiştir. Lefkara Barajı 1971-1973 yılları arasında inşa edilmiş, 74 m yüksekliğinde, kret uzunluğu 233 m olan bir kil çekirdekli kaya dolgu barajdır. Memba şevi 1 D:1,5 Y, mansap şevi ise 1 D:1,6 Y'dır. Dolgu oturmaları, baraj gövdesinde kurulu bulunan ölçüm aletleriyle kayıt altına alınmıştır. Bu aletler Şekil 4.7'de görülmektedir. Oturma ölçen aletlerden 1973-1994 yılları arasında ölçümler alınmıştır. Toplam 720 mm oturma ölçülmüş, bunun 600 mm'si inşa esnasında, 120 mm'si ise inşa faaliyeti sona erdikten sonra oluşmuştur. Çekirdekte kurulu bulunan S2, S3 ve S4'ten alınan inşa sonrası ortalama oturma değeri 80 mm'dir. Kaya dolgudaki (S1 ve S5) ölçüm aletlerinden okunan oturma değerleri S2, S3 ve S4 ile karşılaştırılabilir büyüklüktedir. Bu da göstermektedir ki kaya ve kil tabakaları arasında deformasyonlar açısından yumuşak bir geçiş vardır. Maksimum inşa oturmalarının, baraj yüksekliğinin 1/3'ü ile 1/2'si arasındaki bir bölgede oluşması beklenir. Lefkara Barajı'nda oturmalar bu aralık arasında meydana gelmiştir. Oturma değerleri benzer barajlara göre farklılık gösterebilir. Bunun sebebi genel olarak, kaya dolgu malzemesinin kalitesi ve sıkışmanın iyi yapılıp yapılmaması olarak gösterilebilir.



Şekil 4.7. Lefkara Barajı gövdesindeki ölçüm aletleri

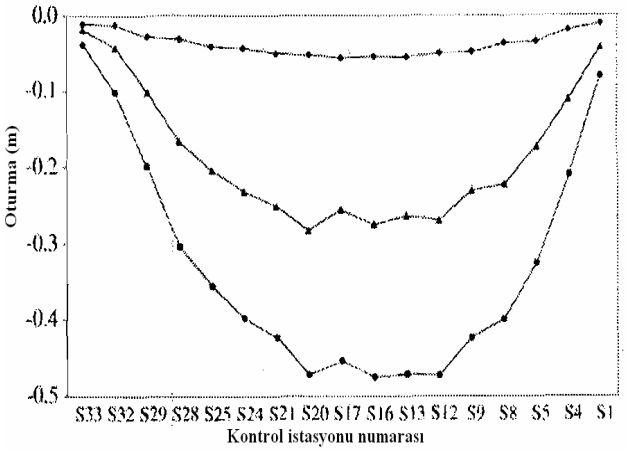
Gikas ve Sakellariou (2008), Yunanistan'da inşa edilmiş bir baraj olan Mornos Barajı'ndan elde edilen 30 yıllık düşey yer değiştirme verilerini sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Mornos Barajı 1973-1977 yılları arasında inşa edilmiş, su tutma işlemi 1979-1981 yılları arasında kademeli olarak gerçekleştirilmiş, 126 m yüksekliğinde, kret uzunluğu 815 m olan kil çekirdekli bir kaya dolgu barajdır. Memba şevi 1 D:2,4 Y, mansap şevi ise 1 D:2 Y'dır.

Deformasyonlar beklendiği gibi, inşa aşaması ve ilk su tutma aşamasında hızla artış göstermiş ve zamanla kademeli olarak azalmıştır. S20 kontrol istasyonu kretin ortasında, S28 ise kretin bitiminde memba tarafındadır. Şekil 4.8 incelendiğinde ilk olarak yer değiştirmelerin arttığı fakat yaklaşık 15 yıl içerisinde son değerlerine ulaştığı, ikinci olarak da baraj ortasındaki oturmaların kret ucundaki oturmalardan çok fazla olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.8'deki eğriler tipik konsolidasyon davranışını göstermektedir.



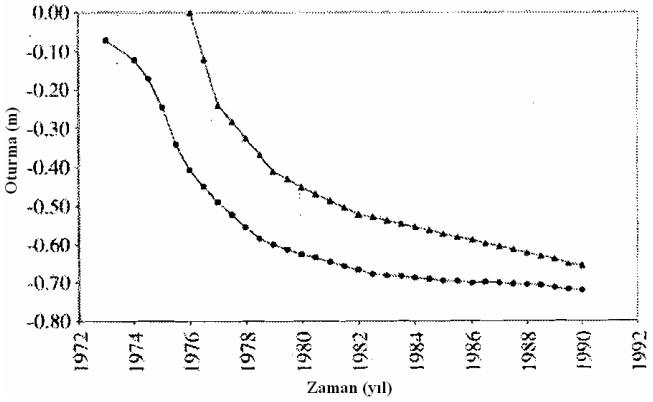
Şekil 4.8. S20 ve S28 kontrol istasyonlarının düşey yer değiştirme-zaman eğrisi (daireler S20 istasyonu, dörtgenler S28 istasyonu)

Şekil 4.9'da krette bulunan tüm istasyonlardan alınan değerler görülmektedir. Şekil 4.9 incelendiğinde maksimum oturmanın kret ortasında meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, toplam yer değiştirmenin %60'ı 1977-2006 arası (inşa+su tutma), kalan %40'ı ise barajın işletme aşamasında oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu durum barajın stabil hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.9. Krette bulunan bütün istasyonların düşey yer değiştirme-zaman eğrileri (dörtgenler inşa sonrasına, üçgenler ilk dolum sonrasına, daireler 2006 yılına karşılık gelmektedir)

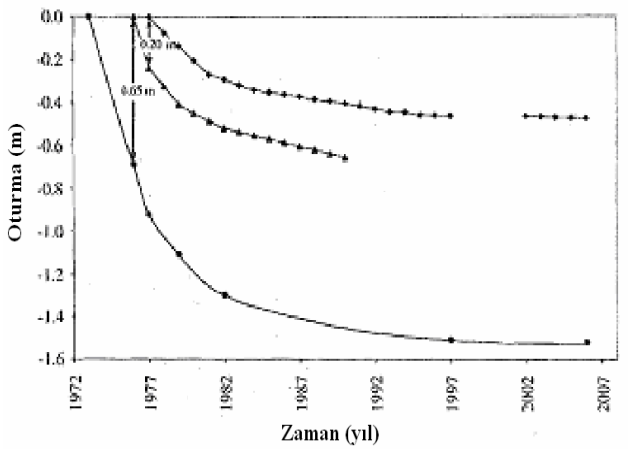
Kretin 3 m ve 95 m altındaki dahili oturma ölçerlerden alınan ve Şekil 4.10'da gösterilen verileri incelenirse, maksimum oturmanın inşa aşamasında meydana geldiği ve ölçme aletlerinin bozulduğu 1990 yılına kadar oturmalardaki değişim oranının düzgün olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.10. Kretin 3 m (üçgenler) ve 95 m (daireler) altındaki dahili oturma ölçerlerin düşey yer değiştirme-zaman eğrileri

Kretteki deformasyon ölçerden alınan değerler, kretin 3 m altındaki manyetik ekstensometreden ölçülen değerler ve sonlu elemanlar metodu (SEM) sonucu elde edilen değerler aynı eğride Şekil 4.11'de görülmektedir. Şekil 4.11 incelendiğinde, 1976 yılı için manyetik ekstensometre ve SEM sonuçları karşılaştırıldığında 0,65 m'lik büyük bir fark görülmektedir. Bu beklenen fark barajın inşası boyunca

(1973-1976) oturması sonucudur. Benzer şekilde ekstensometre ve kretteki deformasyon ölçer arasındaki 0,20 m'lik fark da aynı zaman diliminde meydana gelen oturmaya karşılık gelmektedir (1976 yılı ve 1977 yılının ilk yarısı).



Şekil 4.11. Kretteki deformasyon ölçerlerin (dörtgenler), kretin 3 m altındaki manyetik ekstensometrelerin (üçgenler) ve sonlu elemanlar metodu sonuçlarının (daireler) düşey yer değiştirme-zaman eğrileri

Şekil 4.11'den çıkarılacak en önemli sonuç, bu üç eğrinin ortalama olarak birbirine çok yakın eğim göstermesidir. Bu da bize sonlu elemanlar yönteminde kullanılan modelin doğruluğunu göstermektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, barajlarda gözlenen yatay deformasyonlar iki gruba ayrılabilirler. Birincisi barajın kendi ağırlığıyla oluşan enine-vadi yatay deformasyonlarıdır. Enine-vadi deformasyonları, barajla vadi birleşim yerlerinde membranda meydana gelen yatay gerilmeyle oluşur.

İkincisi ise, ilave yatay ve düşey deformasyonlar meydana getiren ilk rezervuar dolum sebebiyle oluşan memba-mansap doğrultusundaki yatay deformasyonlardır [Singh ve Varshney, 1995].

4.3.1. Sonlu elemanlar yönteminin kaya dolgu barajlara uygulanması

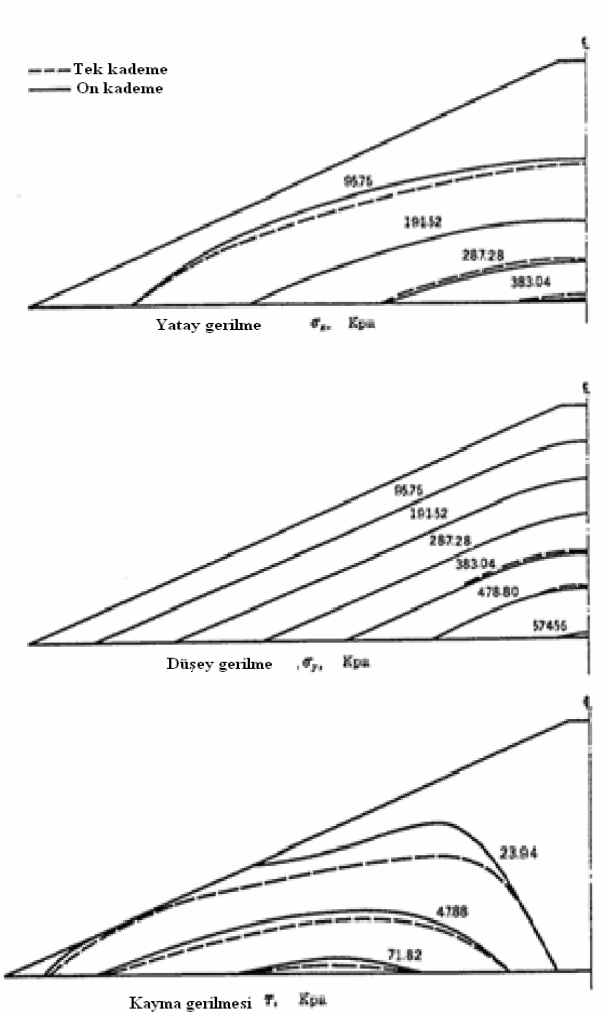
Sonlu elemanlar analizinde, düğüm noktalarıyla birbirlerine bağlı olan ayrık elemanlar, gerçek bütünlüğü idealize etmek için kullanılırlar. Bu yöntem, kaya dolgu barajlarda baraj ve temelindeki gerilme, deformasyonlar ve boşluk suyu basınçlarının belirlenmesi için özellikle 1970'li yılların başından beri sıkça kullanılmaktadır [Clough ve ark., 1967]. Genellikle sonlu eleman analizi boyunca, sistem üç boyutlu olmasına rağmen iki boyutlu düzlem-şekil değiştirme problemi olarak kabul edilir.Özellikle kil çekirdekli barajlar için göz önüne alınması gereken önemli bir nokta dolgunun artırımlı yöntemle inşa edildiğidir [Zomorodian ve ark., 2006]. Barajlar için, tipik bir sonlu elemanlar analiz prosedürü aşağıdaki gibidir:

a)İlk olarak en alt tabaka elemanlarının rijitlikleri ve ölü yükleri değerlendirilir,
b)Daha sonra bu tabakanın inşaata bağlı olarak oluşan gerilme ve yer değiştirmeleri hesaplanır.

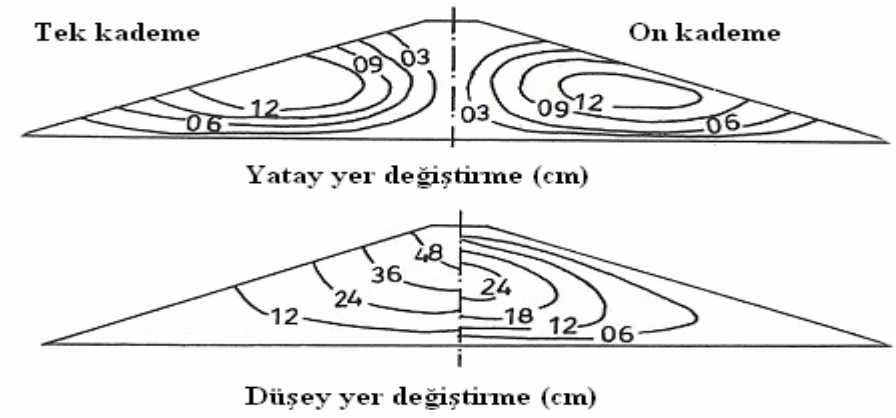
Aynı prosedür en son tabakanın inşasına kadar devam eder [Clough ve ark., 1967].

Lineer elastik "tek kademeli" ve "10 kademeli" analizin yatay, düşey ve kayma gerilmelerinin karşılaştırılması Şekil 4.12'de görülmektedir [Clough ve ark., 1967]. İki analiz arasındaki fark yatay yer değiştirmeler bakımından çok küçüktür.

Fakat, düşey yer değiştirmeler düşünüldüğünde oldukça farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.13). En büyük deformasyon "tek kademeli" analizde krette oluşmakta, "10 kademeli" analizde en büyük deformasyon yaklaşık baraj yüksekliğinin ortasında meydana gelmektedir.



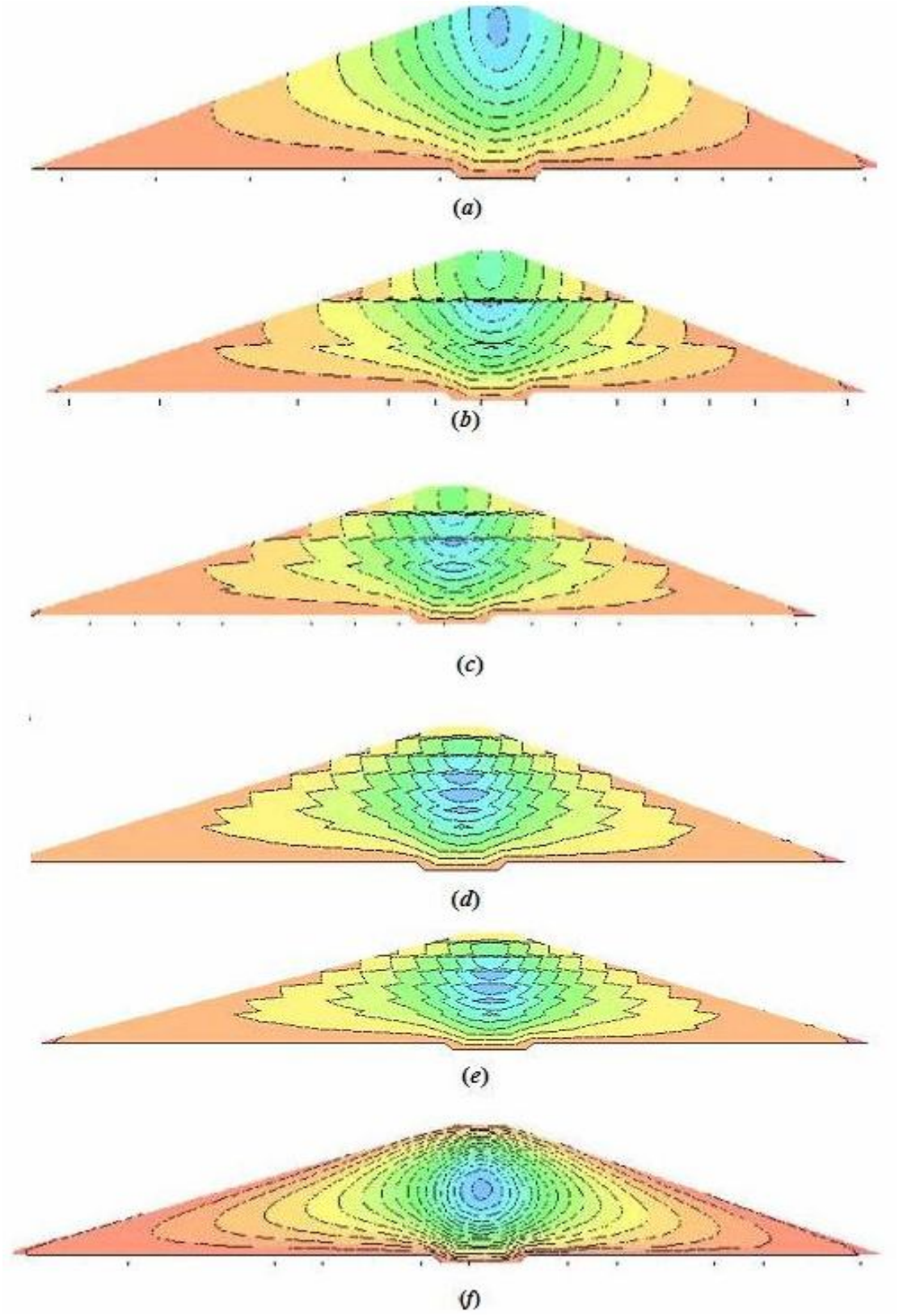
Şekil 4.12. Bir barajın "tek" ve "10 kademeli" analiz için gerilme dağılımı (Clough ve ark., 1967)



Şekil 4.13. "Tek" ve "10 kademeli" analiz için yer değiştirme konturleri (Clough ve ark., 1967)

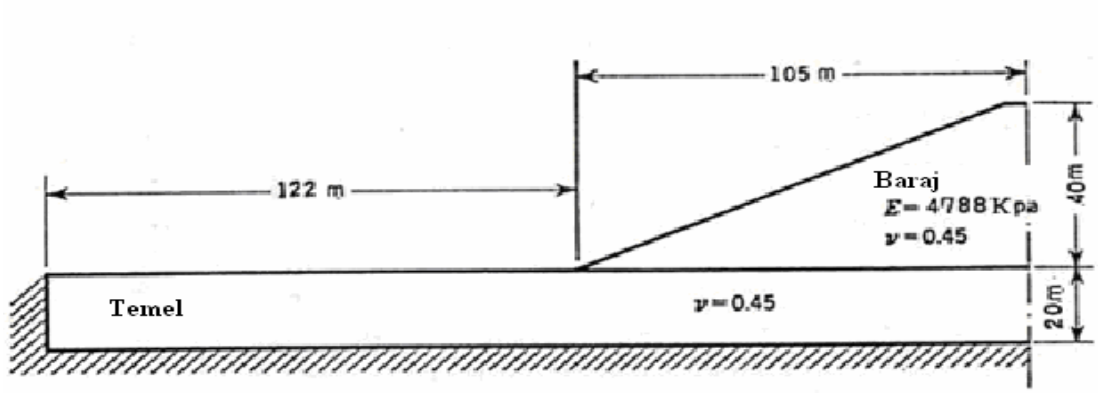
Kademeli analiz hakkında bir başka çalışma da Zomorodian ve ark., (2006) tarafından Sange Siah Barajı için yapılmıştır. Sange Siah Barajı İran'da bulunan, 33 m yüksekliğinde ve kret uzunluğu 351,6 m olan bir kil çekirdekli kaya dolgu barajıdır. Baraj, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15 ve 31 kademeli olacak şekilde modellenerek on ayrı analiz yapılmıştır. Farklı analiz sonuçları incelendiğinde:

a)Toplam, efektif ve kayma gerilmelerinde önemli bir değişim olmamıştır.
b)Kademe sayısı arttıkça oturmaların, -1 kademeli modelden 31 kademeli modele-fark yüzdesi azalmaktadır.
c)1, 3, 5, 8, 15, 31 kademeli modeller için oturmalar Şekil 4.14'te görülmektedir. Oturma kontürlerinden, analizlerde bir veya daha fazla kademeli modelin tanımlanmasının, oturma dağılımı hariç diğer bütün parametrelerin dağılımına çok fazla etkisinin olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.14. Farklı kademe sayısı için oturma dağılımı a)1, b)3, c)5, d)8, e)15, f)31 (Zomorodian ve ark., 2006)

Bu noktaya kadar, temelin esnekliği analizlere dahil edilmemiştir. Halbuki pratikte temel sonsuz rijitlikte değildir. Bu yüzden, temel deformasyonlarının etkisi de araştırılmalıdır. Baraj yüksekliğinin yarısı kadar bir derinlikte rijit olmayan temelli bir baraj Clough ve ark. (1967) tarafından tekrar incelenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Malzeme parametreleri ile birlikte bir barajın en kesiti (Clough ve ark., 1967)

Analizde temel için 4 farklı elastik modül tanımlanmıştır (4788, 9576, 23940 kPa ve rijit). Gerilmeler açısından temelin elastisite modülünün etkisi araştırıldığında düşey gerilmelerin elastisite modülünden etkilenmediği gözlemlenmiştir. Buna karşın, yatay gerilmeler ve kayma gerilmeleri çok büyük oranda etkilenmiştir.

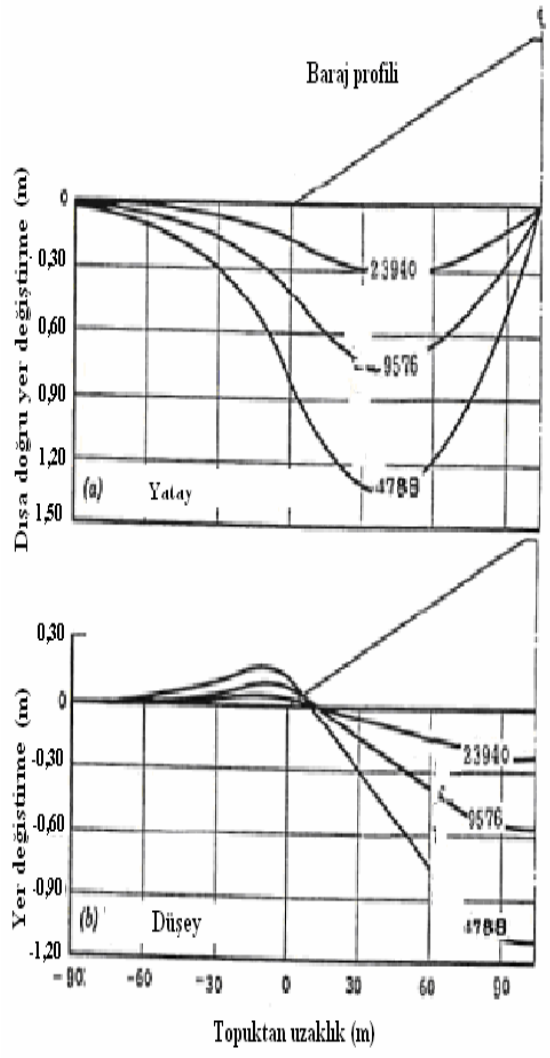
Temelin elastisite modülünün yatay ve düşey yer değiştirmeler üzerindeki etkisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

Şekil 4.16 incelendiğinde yatay yer değiştirmelerin seçilen elastik modül azaldıkça 300 mm'den 1300-1400 mm değerlerine çıktığı görülmektedir.

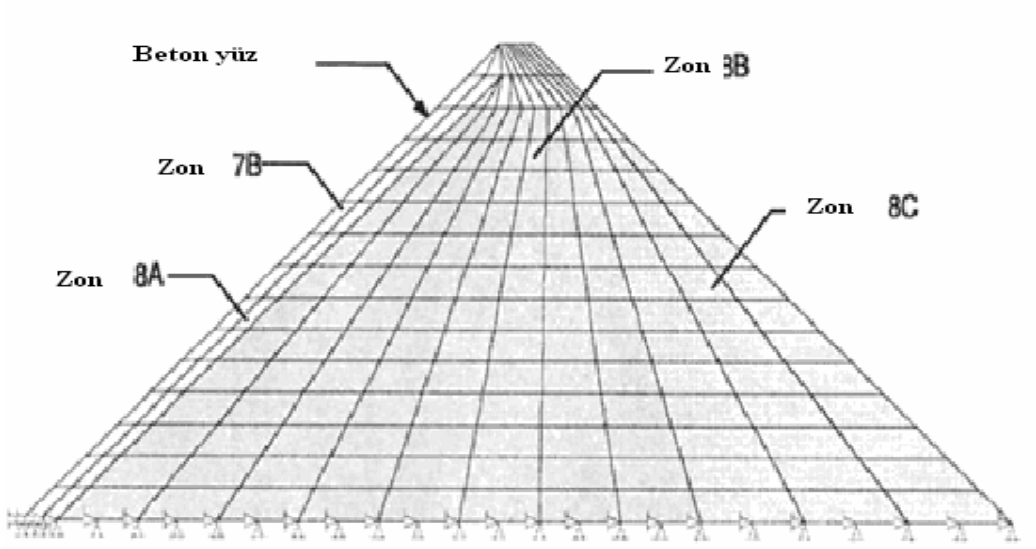
Düşey yer değiştirmeler açısından da aynı durum söz konusudur. Seçilen elastik modül azaldıkça baraj gövde ortasına doğru düşey yer değiştirmeler 200 mm'den 1100-1200 mm değerlerine yükselmektedir.

Şekil 4.16'ya göre, beklenildiği üzere, temelin rijitliği arttıkça yatay ve düşey yer değiştirmelerin azaldığı gözlemlenmektedir. Göreceli olarak rijit temel üzerine inşa edilen barajlarda yatay ve düşey deformasyonların, daha az rijit temel üzerine inşa edilen barajlara oranla az miktarda oluşacağı anlaşılmaktadır.

Temelin malzeme karakteristiklerinin analiz sonuçlarına etkisi üzerine bir başka çalışma da, Kuzey Quebec'te Toulnustouc Nehri üzerindeki Toulnustouc Barajı'nda Szostak-Chrzanowski ve Massiera (2006) tarafından yapılmıştır. Barajın yüksekliği 75 m, kret uzunluğu ise 575 m'dir. Barajın en kesiti Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



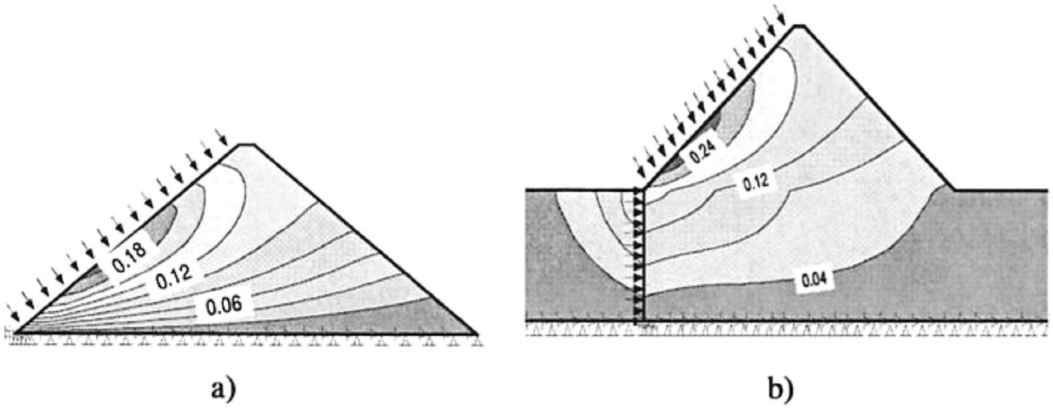
Şekil 4.16. Yatay ve düşey yer değiştirmelerin temel modülüne bağlı değişimi (Cloughve ark., 1967)



Şekil 4.17. Toulnustouc Barajı'nın en kesiti (Szostak-Chrzanowski ve Massiera, 2006)

Baraj modeli, değişik temel şartları için analiz edilmiştir. İlk model sıkı kayanın üzerinde, ki bu durum Toulnustouc Barajı'nın gerçek durumudur ve ikinci model de 60 m yüksekliğindeki sıkı moren temelin üzerindedir.

Her iki durum için rezervuar dolum sonrası yer değiştirmeler Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Moren üzerindeki beton yüzlü kaya dolgu baraj (CFRD), sıkı kaya üzerindeki CFRD'den beklenilebileceği gibi yaklaşık %30 daha fazla deformasyon yapmıştır.

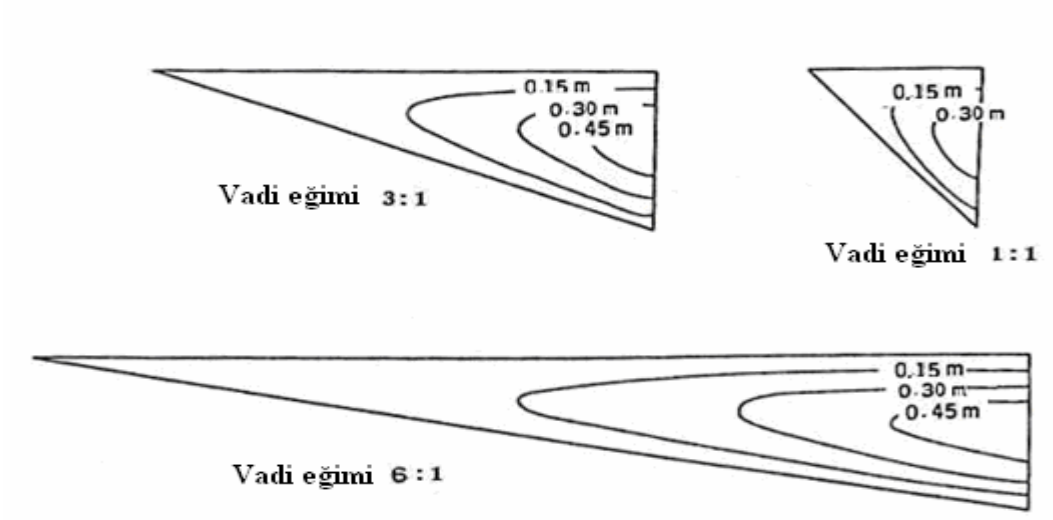


Şekil 4.18. Rezervuar dolum sonrası yer değiştirmeler a) kaya, b) moren üzerinde (Szostak-Chrzanowski ve Massiera, 2006)

4.3.2. İki boyutlu ve üç boyutlu sonlu eleman analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Lefebvre ve ark.(1973)'e göre iki boyutlu analiz göreceli basitliği ve pratik olması nedeniyle üç boyutlu analize göre tercih edilebilir. Halbuki, iki boyutlu analiz düzgün, az eğimli vadi profili bulunan dolgu barajlar için uygundur. Bunun sebebi enine-vadi kemer etkisinin düzlem-şekil değiştirme analizinde göz önüne alınamamasıdır.

Lefebvre ve ark.(1973) V-şeklinde, eğimleri 1 D:1 Y, 3 Y:1 D ve 6 Y:1 D olan üç farklı vadide kemerlenme etkisini çalışmıştır. Baraj eğimleri memba ve mansapta aynı (2,5 D:1 Y) ve tüm farklı vadilerde baraj yüksekliği 49 m'dir. Analizde doğrusal elastik malzeme özellikleri kullanılmıştır. Ayrıca barajın gerçek davranışını simule etmek için sekiz inşa safhası seçilmiştir. Vadi eğimlerinin dikliği arttıkça oturmaların büyüklüğünün azaldığı gözlemlenmiştir. Üç vadi tipinden elde edilen düşey yer değiştirme konturleri Şekil 4.19'daki gibidir.



Şekil 4.19. Düşey yer değiştirme konturleri (Lefebvre ve ark., 1973)

Her bir durum için baraj içerisindeki gerilme değişimleri benzer olsa da, kemerlenmeye bağlı olarak en dik vadideki maksimum değer diğerlerine göre küçüktür. Enine kesitler için düzlem-şekil değiştirme ve üç boyutlu analizin karşılaştırılması, ortalama ve varyasyon değerlerle Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelgeden çıkarılabilecek en önemli sonuç, vadi eğimi 3 D:1 Y veya daha az olan barajlarda iki boyutlu analiz kabul edilebilir sonuçlar vermektedir.

Çizelge 4.2. Düzlem-şekil değiştirme analizi ve üç boyutlu analizin karşılaştırılması (Lefebvre ve ark.,1973)

Vadi-duvar eğimi	Düzlem şekil değiştirme değerleri/üç boyutlu değerleri %100					
	1:1		3:1		6:1	
	Ort.	Var.	Ort.	Var.	Ort.	Var.
Maks. asal gerilme, σ_1	113	100-129	102	100-113	101	98-109
Min. asal gerilme, σ_3	98	79-125	96	81-111	97	88-100
Maks. kayma gerilmesi, τ_{maks}	138	108-225	112	100-150	108	100-150
Düşey yer değiştirme, u_v	136	91-156	106	85-114	100	85-105
Yatay yer değiştirme, u_h	268	75-435	120	80-149	105	85-120

Bu çalışmaların dışında, Hunter ve Fell (2003) de, baraj-vadi birleşim yeri eğimi 0, 26°, 45° ve 70° olan, nehir genişliği 20, 50 ve 100 m olan, 100 m yüksekliğinde bir barajın davranışına vadi şeklinin etkisini araştırmıştır. Model doğrusal elastik, baraj dolgu malzemesi için Young Modülü 100 MPa, Poisson oranı 0,27 ve temelin Young modülü 50 GPa'dır. Sonuçlar kemerlenme etkisini göz önüne almak için iki boyutlu analiz ile bulunan düşey gerilmelere "gerilme azaltma faktörü" uygulanması gerektiğini göstermiştir. Bu faktör Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

Ayrıca bu çalışmada nehir genişliğinin baraj dolgu yüksekliğine eşit olduğu durumlarda -baraj-vadi birleşim yeri eğimi dikkate alınmaksızın- enine-vadi kemer etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu gözlemlenmiştir [Hunter ve Fell, 2003].

Çizelge 4.3. Gerilme azaltma faktörleri (Hunter ve Fell, 2003)

W_r / H oranı nehir genişliği/yüksekliği	Ortalama kenar ayak eğimi açısı(derece)	Gerilme azaltma faktörü(dolgu yeri)			
		Temel(0-%20 arası)	Orta altı(%20-%40 arası	Orta(%40-%60 arası	Yukarı (%65-kret arası
0,2	10-20	0,93	0,95	0,97	1,0
	20-30	0,88	0,92	0,96	0,98
	30-40	0,82	0,88	0,94	0,97
	40-50	0,74	0,83	0,91	0,96
	50-60	0,66	0,76	0,86	0,94
	60-70	0,57	0,69	0,82	0,92
0,5	<25	1,00	1,0	1,0	1,0
	25-40	0,93	0,95	0,97	1,0
	40-50	0,91	0,92	0,95	0,05-1,0
	50-60	0,87	0,88	0,93	0,05-1,0
	60-70	0,83	0,85	0,90	0,05-1,0
1,0	Tüm eğimler	0,95-1,0	0,95-1,0	1,0	1,0

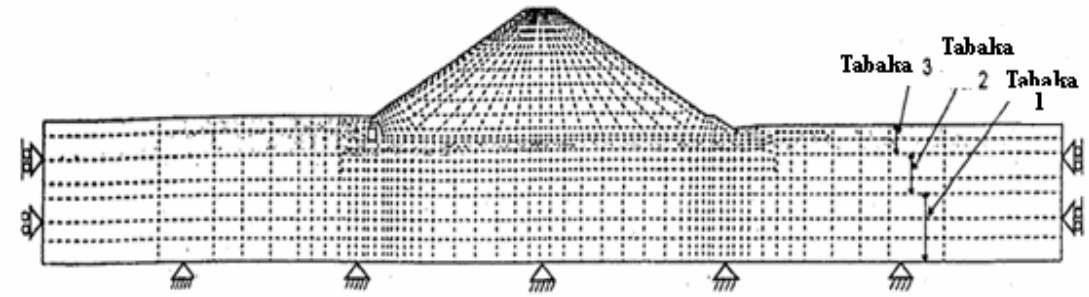
4.3.3. IFRD'lerin (Ön yüzü geçirimsiz kaya dolgu baraj) ölçülen ve hesaplanan oturmaların karşılaştırılması

Beklenmeyen davranışın belirlenmesinde gözlemlenen ve hesaplanan deformasyonların karşılaştırılması önemlidir. Geoteknik parametreler laboratuvar ve arazi deneyleriyle değerlendirilebilmelerine rağmen, dolgu malzemesi homojen olmayabilir ve parametreler bir bölgeden diğerine farklılık gösterebilir. Gözlemlenen ve hesaplanan verilerin karşılaştırılması seçilen geoteknik parametrelerin doğrulanmasına yardımcı olur.

Daha önce de belirtildiği gibi, doğrusal olmayan modeller gerçek zemin davranışını diğer modellere göre daha iyi yansıtırlar. Geçirimsiz bitüm membranlı kaya dolgu barajı olan Pappadai Barajı da doğrusal olmayan malzeme davranışı göz önüne alınarak modellenmiştir.

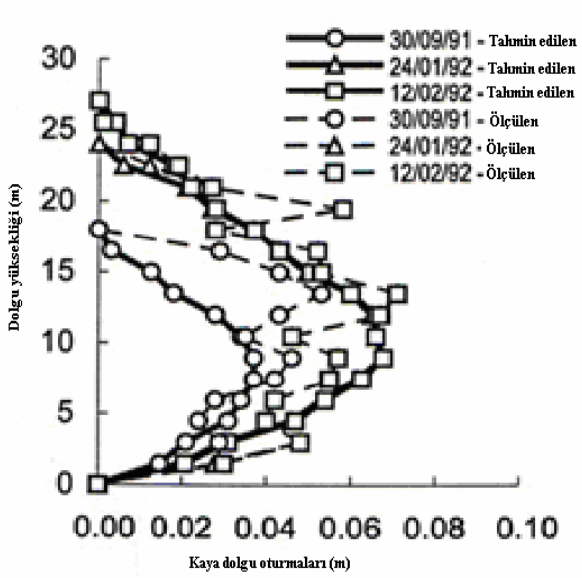
Baraj yüksekliği 27 m ve baraj gövdesinde kalkarenit kaya dolgu (homojen baraj) kullanılmıştır. Barajın mansap ve memba eğimleri 2 Y:1 D'dir. Barajın temeli sıkı kildir. Temelin düşey permeabilitesi 3-6.10^{-11} m/s aralığındadır. Yatay permeabilitesi düşey permeabilitenin 3-4 katı kadar fazladır [Lollino ve ark., 2005].

Baraj performansının incelenmesinde iki boyutlu düzlem-şekil değiştirme analizi kullanılmıştır. Baraj, analizde 10 kademe halinde inşa edilmiş ve barajın sonlu elemanlar ağı dörtgen elemanlardan oluşturulmuştur. Barajın enkesiti ve sonlu elemanlar ağı Şekil 4.20'de verilmiştir. Model parametrelerinin belirlenmesinde temelin deneysel verileri kullanılmıştır. Baraj gövdesinin geçirimsizliğini sağlamak üzere ince bir bitümlü membran memba yüzeyinde inşa edilmiştir. Membranda elastik model 10.10^{6} kPa Young Modülü ile birlikte kullanılmış ve Poisson oranı 0,15 alınmıştır [Lollino ve ark., 2005].



Şekil 4.20. Pappadai Barajı'nın sonlu elemanlar ağı (Lollino ve ark., 2005)

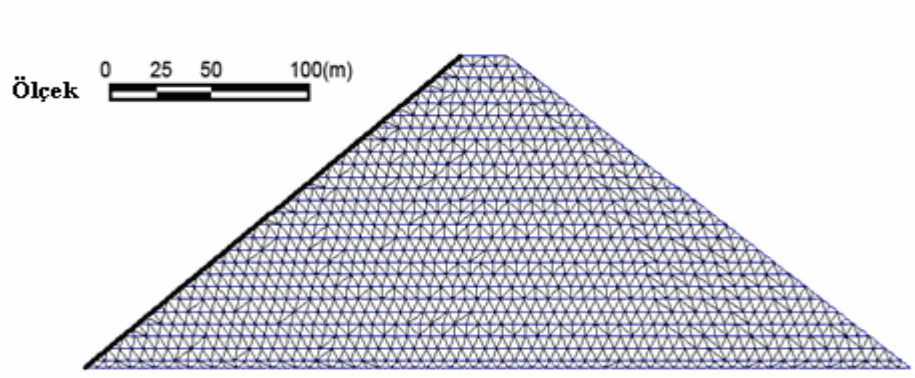
Tahmin edilen ve gözlemlenen davranış inşa ve su tutma safhaları için karşılaştırılmıştır, Şekil 4.21'de Pappadai Barajı'nın temel seviyesi üzerindeki oturmalarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Gözlemlenen ve tahmin edilen değerler birbirleriyle uyum halindedir. Maksimum oturma 68 mm, yaklaşık olarak barajın orta yüksekliğindedir.



Şekil 4.21. Pappadai Barajı'nın tahmin edilen ve ölçülen oturmalarının karşılaştırılması (Lollino ve ark., 2005)

Bir diğer çalışma, 133 m yüksekliğinde bir kaya dolgu baraj olan Kürtün Barajı için Özkuzukıran (2005) tarafından yapılmıştır. Baraj, dar bir vadiye granodiorit formasyon üzerine inşa edilmiştir. Düzlem-şekil değiştirme şartları kabul edilerek baraj davranışının belirlenmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Malzeme modeli sertleşen model seçilmiştir. Zemin parametrelerinin seçiminde laboratuvar verisi olmadığı için önceki çalışmalar temel alınmıştır. Barajın kaya temeli rijit kabul edilmiştir. Analizde kullanılan sonlu elemanlar ağı Şekil 4.22'de görülmektedir. Şekilden görüleceği gibi, sonlu elemanlar ağı üçgen elemanlardan oluşmaktadır. Kürtün Barajı inşa sonrası ve rezervuar dolum sonrası durumları için analiz edilmiştir, Rezervuar dolum durumu beton membrana su yükü uygulama yolu ile incelenmiştir.

Hidrolik oturma ölçer aletler 6 farklı eksene yerleştirilmiştir. İnşa sonrası durumu ve rezervuar dolu durumunun karşılaştırılması Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çizelgeden görüleceği gibi inşa sonrası durum için gözlemlenen ve hesaplanan oturmalar birbirine çok yakındır. Rezervuar dolu durumu için hesaplanan değerler ise gözlemlenen değerlerden fazladır. Bu durum boşaltma-yükleme etkisinden dolayı gerçekleşmiş olabilir [Özkuzukıran, 2005].



Şekil 4.22. Kürtün Barajı'nın sonlu elemanlar ağı (Özkuzukıran, 2005)

Çizelge 4.4. Gözlemlenen ve hesaplanan oturmaların inşa sonrası durum ve rezervuar dolu durumla karşılaştırılması (Özkuzukıran, 2005)

Eksen	Kot	İnşa sonrası		Rezervuar dolu	
		Hesap.(mm)	Gözl.(mm)	Hesap.(mm)	Gözl.(mm)
A-A	555,00	452	311	433	371
B-B	575,00	680	609	442	384
C-C	555,00	1323	1113	166	44
	575,00	1397	1417	246	173
	600,00	869	839	334	238
D-D	555,00	1553	1460	98	52
	575,00	1838	2019	137	83
	600,00	1592	1592	167	127
	625,00	771	621	170	146
E-E	555,00	1623	1607	65	28
	575,00	1971	2155	87	78
	600,00	1822	1861	103	73
	625,00	1099	717	108	143
F-F	555,00	1491	1313	35	12
	575,00	1712	1669	45	64
	600,00	1360	1462	53	52

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

5.1. Malzeme Modeli ve Parametrelerinin Seçimi

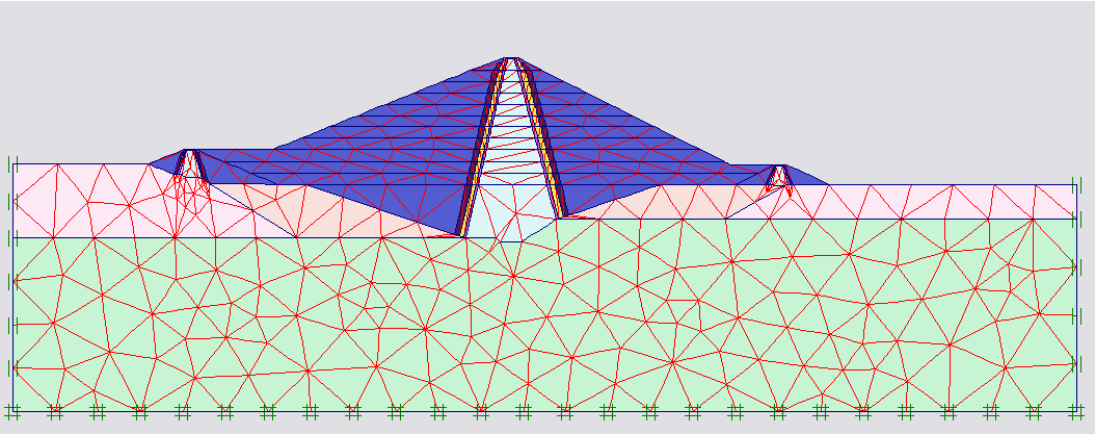
2. Bölüm'de anlatıldığı üzere, Akköprü Barajı'nda gövde dolgusu işlemleri 15.09.2000 tarihinde başlamış, 2007 yılının son çeyreğinde tamamlanmıştır. Gövde dolgusu içerisine kurulan deformasyon ölçerlerden alınan 2001 ve 2002 yıllarına ait okumalar bulunmakla birlikte, okumalar 2003 yılından itibaren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

Kaya dolgu malzemesinin gerilmeye bağımlı, elastik ve doğrusal olmayan davranışını yansıtmak amacıyla sonlu elemanlar metodu analizi Plaxis v8.2 yazılımı ile birlikte sertleşen zemin modeli kullanılarak yapılmıştır. Sertleşen zemin modeli hiperbolik modelin geliştirilmiş halidir [Schanz ve ark., 1999]. Sertleşen zemin modelinde kullanılan malzeme parametreleri üç eksenli basınç deney sonuçlarından elde edilebilir. Akköprü Barajı'nda sadece kil malzeme için üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Kaya dolgu malzemesinin üç eksenli basınç deneyleri yapılmadığından gerekli parametreler, DSİ Genel Müdürlüğü'nce inşa edilen diğer bazı barajlar üzerinde yapılan çalışmalar dikkate alınarak seçilmiştir.

Baraj ile birlikte temel zemininin de davranışını gerçekçi bir biçimde modelleyebilmek için barajın altındaki zemin formasyonları da sonlu eleman modeline dahil edilmiştir.

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

modellendiğinde maksimum oturma değerinin krette oluştuğu gözlemlenir [Clough ve ark., 1967]. Sonlu elemanlar ağı Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Akköprü Barajı'nın sonlu elemanlar ağı

Analiz inşaat sonrası durum için yapılmıştır. Barajın kendi ağırlığıyla oturması sonucu meydana gelen deformasyonlar, kil çekirdeğin konsolidasyonu dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca, yıl sonu gerçekleşen dolgu yüksekliğine bağlı olarak her yıl için ayrı ayrı olmak üzere oturma davranışı Plaxis'te incelenerek ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Yetkililerle yapılan görüşmeler sonucunda piyezometrelerin son kalibrasyolarının yapılmadığı öğrenilmiş ve barajda da henüz su tutulmadığı için piyezometre okuma değerleri dikkate alınmamıştır. Su tutulması durumu için ayrı bir analiz yapılarak baraj gövdesinde meydana geleceği tahmin edilen deformasyonlar da ayrıca belirlenmiştir.

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

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

Gövde dolgusunda yer alan malzemelerin sonlu elemanlar analizinde kullanılacak nihai parametreleri, her bir malzemenin gövde oturmalarını doğrudan etkileyebilecek parametrelerine değişik değerler verilerek yapılan parametrik çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Parametrik çalışmalar esnasında dolgudaki diğer malzemelerin model özellikleri Çizelge 5.12'deki değerler değiştirilmeden kullanılmıştır.

Kil malzemenin parametreleri, üç eksenli basınç deneylerinden alınmıştır. Kilin üç eksenli basınç deney sonuçları ile "m_v" ve "c_v" değerleri Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.1. Üç eksenli basınç deneyi sonuçları [6]

Numune No	Üç eksenli basınç deneyi	
	Kohezyon c,(kPa)	İçsel sürtünme açısı Ø,(°)
E2	118	9
E4	103	20
E5	69	6
E9	89	11
E10	98	17
E11	132	13
E12	147	20

Çizelge 5.2. "m_v" değerleri tablosu [6]

Numune No	"m_v" Değerleri Tablosu (x10^{-2} m²/kN)						
	Yükler (kPa/98,1)						
	0,00-0,25	0,25-1,00	1,00-2,00	2,00-4,00	4,00-10,00	10,00-2,00	2,00-0,25
E2	0,0324	0,0236	0,0112	0,0086	0,0074	0,0017	0,0100
E4	0,0301	0,0347	0,0198	0,0146	0,0099	0,0027	0,0174
E5	0,0364	0,0370	0,0199	0,0169	0,0112	0,0031	0,0191
E9	0,0235	0,0346	0,0205	0,0172	0,0106	0,0022	0,0130
E10	0,0213	0,0256	0,0158	0,0168	0,0105	0,0017	0,0106
E11	0,0297	0,0400	0,0261	0,0197	0,0107	0,0025	0,0147
E12	0,0131	0,0461	0,0372	0,0250	0,0112	0,0045	0,0293

Çizelge 5.3. "c_v" değerleri tablosu [6]

Numune No	"c_v" Değerleri Tablosu (x10^{-7} m²/s)			
	Yükler (kPa/98,1)			
	1,00	2,00	4,00	10,00
E2	2,67	-	2,39	1,42
E4	2,60	1,67	1,34	0,87
E5	0,89	0,55	0,47	0,35
E9	6,36	2,29	2,08	0,74
E10	3,38	1,89	2,52	1,42
E11	5,25	2,31	2,20	0,62
E12	0,64	0,60	0,23	0,15

Çizelge 5.1'de verilen üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre kilin ortalama kohezyonu 108 kPa'dır. Aynı çizelgeye göre kilin ortalama içsel sürtünme açısı 14°'dir. Analizde kilin kohezyon değeri 108 kPa, içsel sürtünme açısı 14° kullanılmıştır.

Kilin elastisite modülünün belirlenmesinde Çizelge 5.2 'deki sınırlar içerisinde(5-60 MPa) kalınarak ve sadece kilin elastisite modülü değiştirilerek yapılan parametrik analiz sonucunda Çizelge 5.4'teki sonuçlar bulunmuştur. Buradan kilin elastisite modülü 40 MPa olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.4. Kilin elastisite modülünün belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları

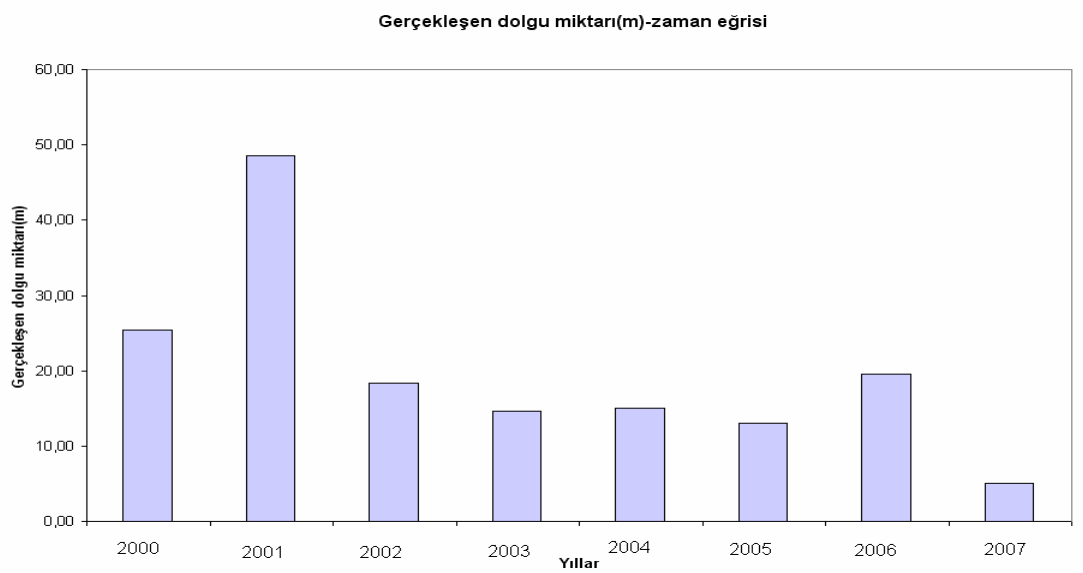
Elastisite Modülü(MPa)	Maksimum Deformasyon(m)
20	4,14
25	3,62
30	3,28
35	3,02
40	2,83
45	2,68
50	2,57
53	2,51
55	2,47
60	2,40

Kil için kullanılması seçilen nihai parametreler, yüksek kohezyon ve düşük içsel sürtünme açısı değerleri göz önüne alındığında, drenajsız davranışa yakın özelliklere sahip olarak görülmektedir. Bu seçim, Atatürk barajı'nın sonlu eleman modeli oluşturulurken (Pöyry 2007) çekirdek malzeme davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile temsili için parametre belirlenmesinde yapılan öneriler ile uyum içindedir. Ayrıca, laboratuvar deney sonuçları kullanılmayıp, kil için önceki çalışmalardan alınan drenajlı davranışa ait değerler kullanıldığında dahi deformasyon davranışında belirgin bir fark görülmemektedir. Literatürden alınan değerler ile gerçekleştirilen parametrik çalışma sonuçları Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

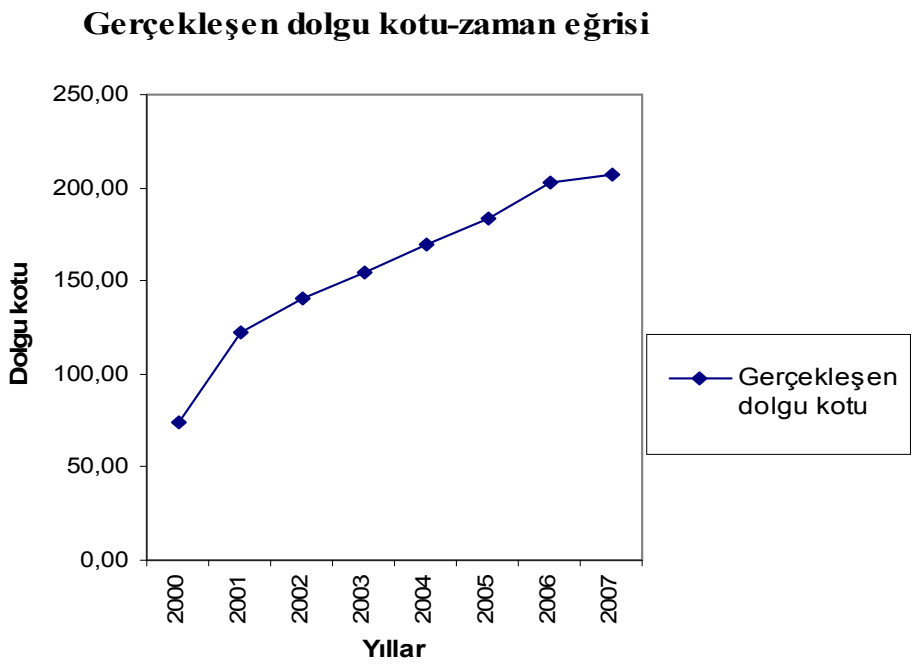
Çizelge 5.5. Kilin kohezyonunun ve içsel sürtünme açısının belirlenmesi için literatürden alınan değerlerle yapılan parametrik çalışma sonuçları

	c	Ø	Maksimum deformasyon(m)
Deneme 1	10	24	2,71
Deneme 2	15	28	2,68
Deneme 3	20	24	2,62
Deneme 4	15	24	2,71
Deneme 5	15	28	2,61
Deneme 6	20	28	2,60

Ayrıca kilin konsolidasyonu da sonlu elemanlar analizinde göz önünde bulundurulmuştur. Kilin permeabilitesi, Çizelge 5.3'teki sınırlar dahilinde, c_v değerleri de dikkate alınarak sonlu elemanlar analizinde hesaplara dahil edilmiştir. Dolgu başlangıcından bitimine kadar geçen süre dikkate alınarak, her yıl için gerçekleşen dolgu miktarı(metre cinsinden) ve gerçekleşen dolgu kotu tespit edilip gerçekleşen dolgu kotu-zaman ve gerçekleşen dolgu miktarı(m)-zaman eğrileri çizilerek kil malzemenin konsolidasyonu sonlu elemanlar analizinde hesaplara dahil edilmiştir. Söz konusu eğriler Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.2. Gerçekleşen dolgu miktarı(m)-zaman eğrisi



Şekil 5.3. Gerçekleşen dolgu kotu-zaman eğrisi

Bu çalışmada ana kaya durumundaki geçirimsiz peridotitler rijit kabul edilmemiş, önceki çalışmalardan (Gikas ve Sakellariou, 2008) faydalanılarak alınan değerler ve Mohr-Coulomb malzeme modeli seçimi ile parametrik analiz gerçekleştirilmiştir.

Parametrik çalışma sonuçları Çizelge 5.6'da görülmektedir. Buradan ana kayanın elastisite modülü 450 MPa olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.6. Ana kayanın elastisite modülünün belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları

Elastisite modülü(MPa)	Maksimum Deformasyon(m)
200	3,58
250	3,28
300	3,08
350	2,94
400	2,78
450	2,70
500	2,67
600	2,57
700	2,49
800	2,43

Ayrıca, ana kayanın malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb yerine doğrusal elastik model seçilip gerçekleştirilen parametrik analiz sonuçları Çizelge 5.7'de görülmektedir.

Çizelge 5.7. Ana kayada doğrusal-elastik modele göre yapılan parametrik çalışma sonuçları

Elastisite Modülü(MPa)	Maksimum Deformasyon(m)
200	3,44
250	3,15
300	2,96
350	2,82
450	2,64
500	2,58
600	2,48
700	2,41
800	2,36

Malzeme modeli olarak Mohr-Coulomb seçilerek yapılan analiz sonuçları (Çizelge 5.6) ile doğrusal-elastik modele göre yapılan analiz sonuçları (Çizelge 5.7) karşılaştırıldığında deformasyonlarda çok fazla fark görülmemektedir. Bu sebeple ana kayanın Plaxis'te kullanılacak malzeme modeli Mohr-Coulomb seçilmiştir.

Filtre kum, filtre çakıl ve kaya ufağı zonlarında kullanılan malzeme parametreleri önceki çalışmalardan alınarak (Gikas ve Sakellariou, 2008) yapılan parametrik çalışma sonrası belirlenmiştir. Da'ao Barajı (Xing ve ark., 2006) ve Oroville Barajı'nda (Kulhawy ve Duncan, 1972) yapılan incelemelere göre geçiş zonlarının malzeme parametreleri birbirlerine yakın alınabilirler. Parametrik çalışma sonuçları Çizelge 5.8'de görülmektedir. Buradan filtre kumun elastisite modülü 100 MPa, filtre çakılın elastisite modülü 150 MPa, kaya ufağının elastisite modülü 200 MPa olarak seçilmiştir. Parametrik çalışmalar sonucunda filtre zonlarının barajın oturma davranışına çok fazla etkisinin olmadığı görülmüştür.

Çizelge 5.8. Filtre zonlarının elastisite modülünün belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları

		Elastisite Modülü(MPa)	Maksimum deformasyon(m)
Deneme 1	Filtre kum	100	2,89
	Filtre çakıl	100	
	Kaya ufağı	100	
Deneme 2	Filtre kum	100	2,75
	Filtre çakıl	150	
	Kaya ufağı	150	
Deneme 3	Filtre kum	150	2,68
	Filtre çakıl	150	
	Kaya ufağı	200	
Deneme 4	Filtre kum	150	2,66
	Filtre çakıl	200	
	Kaya ufağı	200	
Deneme 5	Filtre kum	200	2,63
	Filtre çakıl	250	
	Kaya ufağı	200	
Deneme 6	Filtre kum	200	2,61
	Filtre çakıl	300	
	Kaya ufağı	300	

Teras, peridotit-serpantinit-kireçtaşı-çört kökenli çakıllardan karbonatın çimentolanması ile oluştuğundan (çakıl ağırlıklı) malzeme parametreleri filtre çakıl zonunda kullanılan malzeme ile aynı alınmıştır.

Talvegdeki alüvyon % 75,21 oranında kum ihtiva ettiğinden malzeme parametreleri filtre kum zonunda kullanılan malzeme ile aynı alınmıştır.

Daha önce de belirtildiği gibi, baraj ile birlikte temel zemininin de davranışını incelemek için barajın altındaki zemin formasyonları ve gerçekçi geometri oluşturmak için memba ve mansap batardoları da modele dahil edilmişti. Memba ve mansap batardolarının altındaki ve gövde dolgusu altındaki zemin formasyonları olan teras ve alüvyon da ilk geometride modellenmiştir. Talvegde bulunan alüvyon gövde dolgu inşaatı aşamasında cut-off kazısında yerinden alınarak gövde dolgusu ana kayaya oturtulmuştu. Analizde de başlangıçta alüvyon olarak modellenmiş, daha sonra kademeli inşaat safhalarında kazılarak alınmıştır.

5.2. Analizle İlgili Diğer Bilgiler

Analizde iki boyutlu düzlem şekil değiştirme prensibi ve sertleşen zemin modeli kullanılmıştır. Yüklemeler inşaat sonrası ve rezervuar dolum sonrası olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi henüz su tutulmadığından barajın rezervuar dolum sonrası davranışı karşılaştırılmalı olarak değerlendirilemeyecek, tahminlerde bulunulacaktır.

Analizler maksimum gövde enkesiti km: 0+370'de gerçekleştirilmiştir.

Kademeli inşaatın, gerilme dağılımında, yatay deformasyonlarda ve özellikle düşey deformasyonlarda çok önemli etkisi vardır [Clough ve ark., 1967]. Bu yüzden sonlu elemanlar analizi kademeler halinde yapılmıştır. Tabaka kalınlığının 5 m seçilerek tabaka sayısının arttırılması, analiz sonucunda deformasyonlarda önemli değişimlere sebep olmamış, bilgisayarın analizi gerçekleştirme süresini arttırmıştır. Analizde kullanılan tabaka kalınlığı 10 m seçilmiştir. Ayrıca, kilin konsolidasyonu da göz önüne alınmıştır. Kilin dolgu imalatının kademeli olarak devam ettiği süre boyunca konsolidasyonu sonlu elemanlar analizine dahil edilmiştir.

5.3. İlk Analiz

Kaya dolgu malzemesinin parametrelerinin belirlenmesinde, Saboya ve ark., (1993) tarafından sonlu elemanlar yöntemiyle deformasyon incelemesi yapılan 160 m yüksekliğindeki Foz de Areia Barajı'nın analiz sonuçlarından faydalanılmıştır. Saboya ve ark., (1993) tarafından yürütülen çalışmada kaya dolgu malzemesinin hiperbolik malzeme parametreleri, daha önce birçok baraj üzerinde yapılan yapılan çalışmaların laboratuvar test sonuçlarından elde edilmiştir. Saboya ve ark., (1993) tarafından ilk analizde kullanılan hiperbolik malzeme parametreleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Saboya ve ark., (1993) tarafından ilk analizde kullanılan hiperbolik malzeme parametreleri

Malzeme	C_u	K_E	n	R_f	K_B	m	ϕ	$\Delta\phi$
IB	6	250-400	0,25-0,50	0,60	100-200	0-0,30	45	5,5
IC	14	250-400	0,25-0,50	0,80	150-200	0-0,30	42	2,0
ID	-	300-350	0-0,25	0,65	100-200	0-0,30	38	2,0

Kaya dolgu malzemesinin modellenmesinde kullanılabilecek yeterli miktarda sertleşen zemin modeli çalışması bulunmadığından bu çalışmada Saboya ve ark., (1993) tarafından kullanılan benzer aralıktaki hiperbolik parametrelerden faydalanılmıştır. $E_{50}^{ref} \approx 50K_E$ kabulü kullanılmıştır. K_E, K_B ve "n" dane boyutunun zemin rijitliği üzerindeki etkisini ifade eden rijitlik parametreleridir. $\Delta\phi$, hücre basıncının on kat arttırılmasına karşılık gelen içsel sürtünme açısındaki azalma miktarıdır. E_{oed}^{ref} değeri, E_{50}^{ref}'e eşit alınmıştır. Sertleşen zemin parametrelerinden "E_{50}^{ref}" için yapılan parametrik çalışma sonucu Çizelge 5.10'da verilmiştir. Parametrik analiz neticesinde E_{50}^{ref} değerinin analiz sonucunu çok fazla etkilemediği anlaşılmıştır. "E_{50}^{ref}" değeri 125000 kPa alınmıştır.

Çizelge 5.10. "E_{50}^{ref}" değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları

E_{50}^{ref} (kPa)	Maksimum deformasyon(m)
80000	2,72
100000	2,71
125000	2,71
150000	2,70
200000	2,69

Sertleşen zemin parametrelerinden R_f değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları Çizelge 5.11'de verilmiştir. Deformasyonlarda çok fazla etkisi olmadığı yapılan parametrik analiz sonuçlarında görülmüştür. R_f değeri 0,75 alınmıştır.

Çizelge 5.11. "R_f" değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları

Seçilen R_f	Maksimum deformasyon(m)
0,80	2,70
0,85	2,70
0,90	2,71

"m" değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları Çizelge 5.12'de verilmiştir. "m" değeri arttıkça deformasyonların azaldığı, azaldıkça deformasyonların arttığı tespit edilmiştir. Parametrik analiz neticesinde "m" değerinin analiz sonucunu çok fazla etkilemediği anlaşılmıştır. "m" değeri 0,20 alınmıştır.

Çizelge 5.12. "m" değerinin belirlenmesi için yapılan parametrik çalışma sonuçları

Seçilen m	Maksimum deformasyon(m)
0,20	2,72
0,30	2,68
0,35	2,66
0,40	2,64
0,50	2,60

Parametrik çalışma sonrasında belirlenen kaya dolgu malzeme parametreleri Çizelge 5.13'te verilmiştir.

Çizelge 5.13. Kaya dolgu için malzeme parametreleri

	P_{ref} (kPa)	c_{ref} (kPa)	ϕ (°)	E_{50}^{ref} =50xK_E (kPa)	m	R_f
Kaya dolgu	100	1	40+5	125000	0,20	0,75

Analizde kullanılan nihai malzeme parametreleri Çizelge 5.14'te verilmiştir.

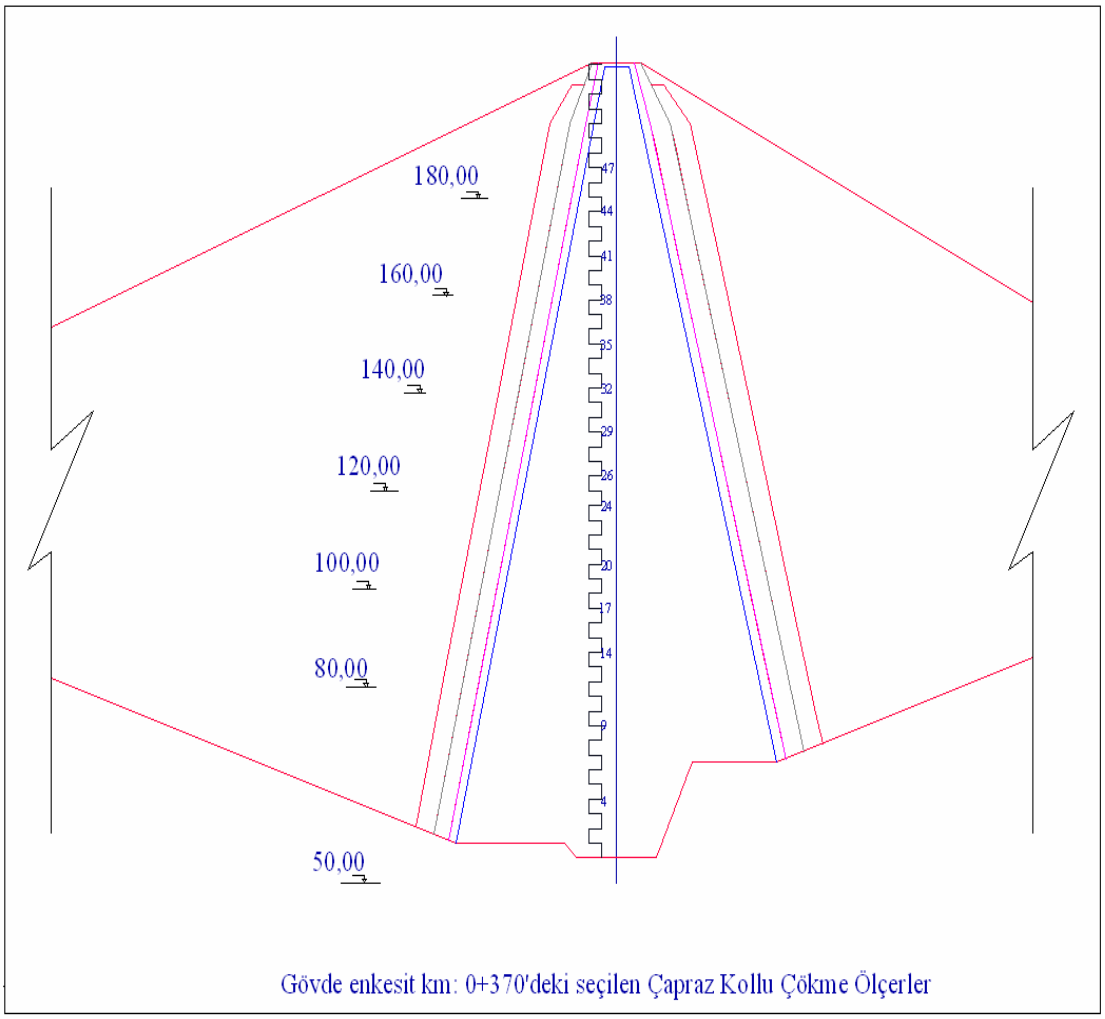
Çizelge 5.14. Analizde kullanılan nihai malzeme parametreleri

Malzeme	E (MPa)	c (kPa)	Ø (°)	k (m/s)	Kuru birim hacim ağ (kN/m³)	Suya doygun birim hacim ağ. (kN/m³)
Kil	40 MPa	108 kPa	14	10^{-8}	18,50	20
Ana kaya	450 MPa	-	50	10^{-1}	20	22
Filtre kum	100 MPa	-	37	10^{-1}	19	20
Filtre çakıl	150 MPa	-	40	10^{-1}	22	23
Alüvyon	100 MPa	-	37	10^{-1}	19	20
Teras	150 MPa	-	45	10^{-1}	22	23

5.4. İnşaat Sonrası Analiz

Gövde enkesit km: 0+370'te 54 adet çapraz kollu çökme ölçerin kurulu bulunduğu daha önce ifade edilmişti. Yük altındaki dolgu davranışını temsil edebilecek 14 adet çapraz kollu seçilerek okumaları incelenmiştir. Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin numaraları ve dolgu içerisindeki kotları Şekil 5.4'te verilmiştir. Ayrıca, seçilen

çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arası okumalarının değerlendirildiği eğriler EK-1'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Gövde enkesit km: 0+370'deki seçilen çapraz kollu çökme ölçerler

Analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde şu yöntem uygulanmıştır:

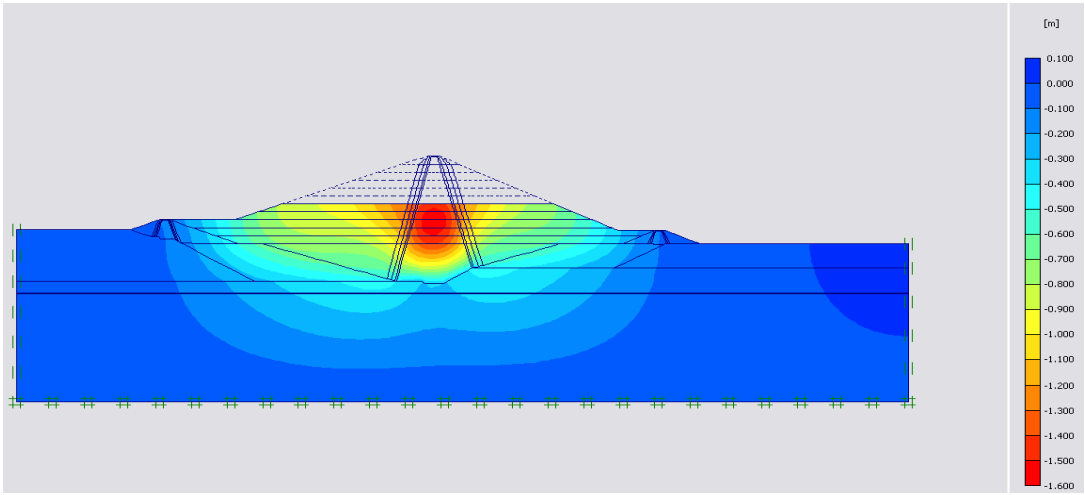
Her yıl sonu itibariyle dolgu imalatının gerçekleşme durumu, dolgu yüksekliği olarak değerlendirilmiştir. 2003, 2004, 2005, 2006 ve 2007 yılları sonunda ulaşılan dolgu yükseklikleri mevcuttur Dolgu imalatı 2007 yılının son çeyreğinde tamamlandığından 2007 yılı sonu inşaat sonuna karşılık gelmektedir. 2003 yılı son okuma tarihi 17.11.2003, 2004 yılı son okuma tarihi 04.11.2004, 2005 yılı son okuma tarihi 25.12.2005, 2006 yılı son okuma tarihi 15.11.2006 ve 2007 yılı son

okuma tarihi 19.09.2007'dir. Son okuma tarihindeki dolgu yüksekliğinden hareketle, analizde kademeli inşaat yöntemi kullanıldığından Plaxis'te hangi safhaya karşılık geldiği tespit edilerek yıl sonu okumaları ve Plaxis analiz sonuçları karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

Düşey yer değiştirmeler

a) 2003 yılı sonu itibariyle dolgu yüksekliği 107,07 m'dir.

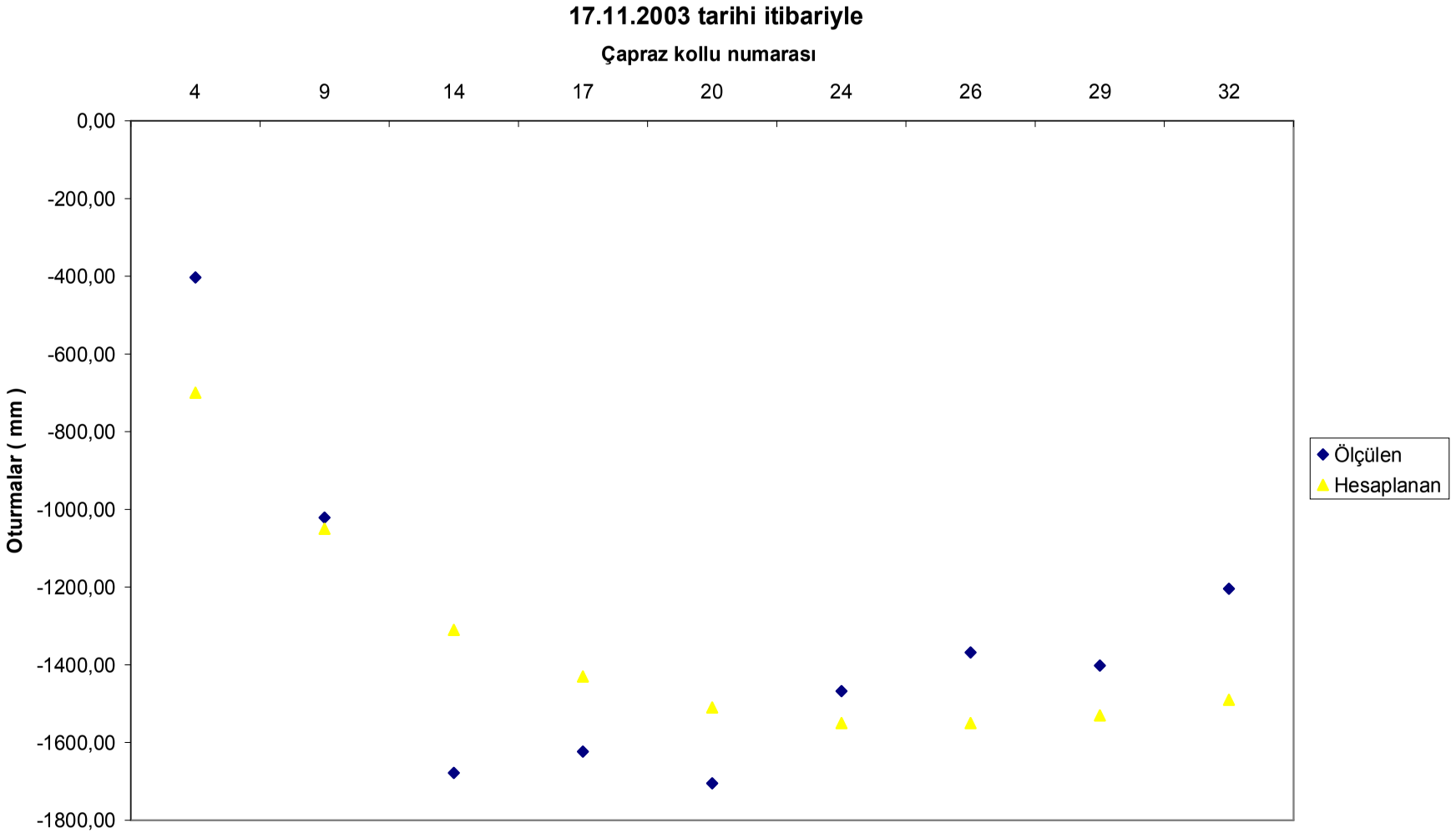
2003 yılının son okuma tarihi olan 17.11.2003 itibariyle ölçülen ve sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis'te hesaplanan düşey yer değiştirmeler, Şekil 5.6'da aynı eğride gösterilmektedir. Çizelge 5.15'te ise ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler çizelge olarak verilmiştir. (-) değerler oturmayı ifade etmektedir. Şekil 5.5'te 2003 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu görülmektedir.



Şekil 5.5. 2003 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu

Çizelge 5.15. 17.11.2003 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler

Çapraz Kollu numarası	Ölçülen yer değiştirmeler(mm)	Hesaplanan yer değiştirmeler(mm)	Fark(mm)
4	-403,00	-700,00	297,00
9	-1021,00	-1050,00	29,00
14	-1678,00	-1310,00	-368,00
17	-1623,00	-1430,00	-19,030
20	-1705,00	-1510,00	-195,00
24	-1468,00	-1550,00	82,00
26	-1368,00	-1550,00	182,00
29	-1402,00	-1530,00	128,00
32	-1204,00	-1490,00	286,00

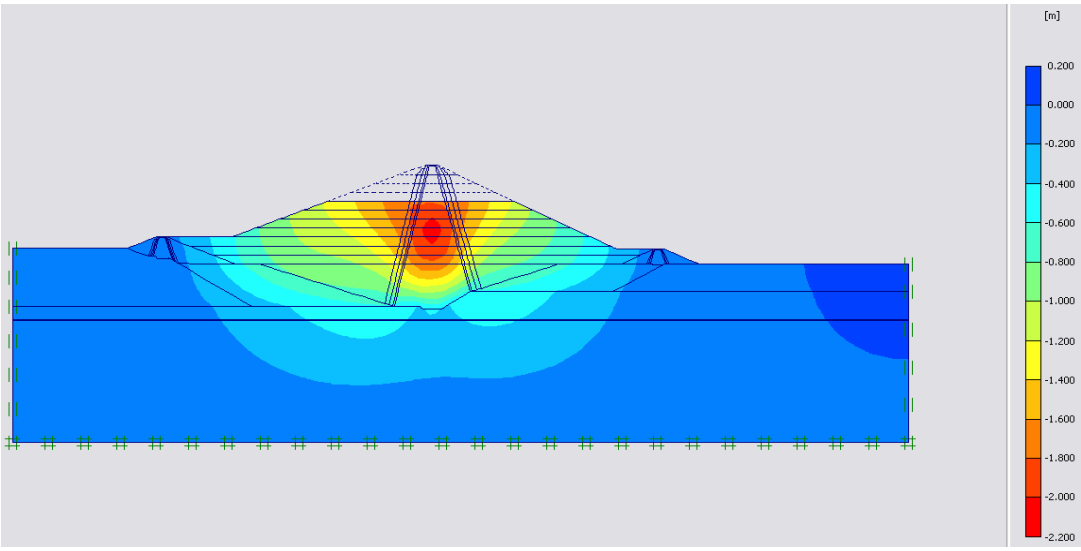


Şekil 5.6. 17.11.2003 tarihi itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi

17.11.2003 tarihi itibariyle dolgu yüksekliği 107,07 m'dir. Yapılan analiz sonucunda hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme -1580,00 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme -1742,00 mm'dir. Düşey yer değiştirmelerin, baraj temelinden krete doğru çıkıldıkça arttığı, baraj yüksekliğinin yaklaşık yarısında maksimuma ulaştığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir.

b) 2004 yılı sonu itibariyle dolgu yüksekliği 122,07 m'dir.

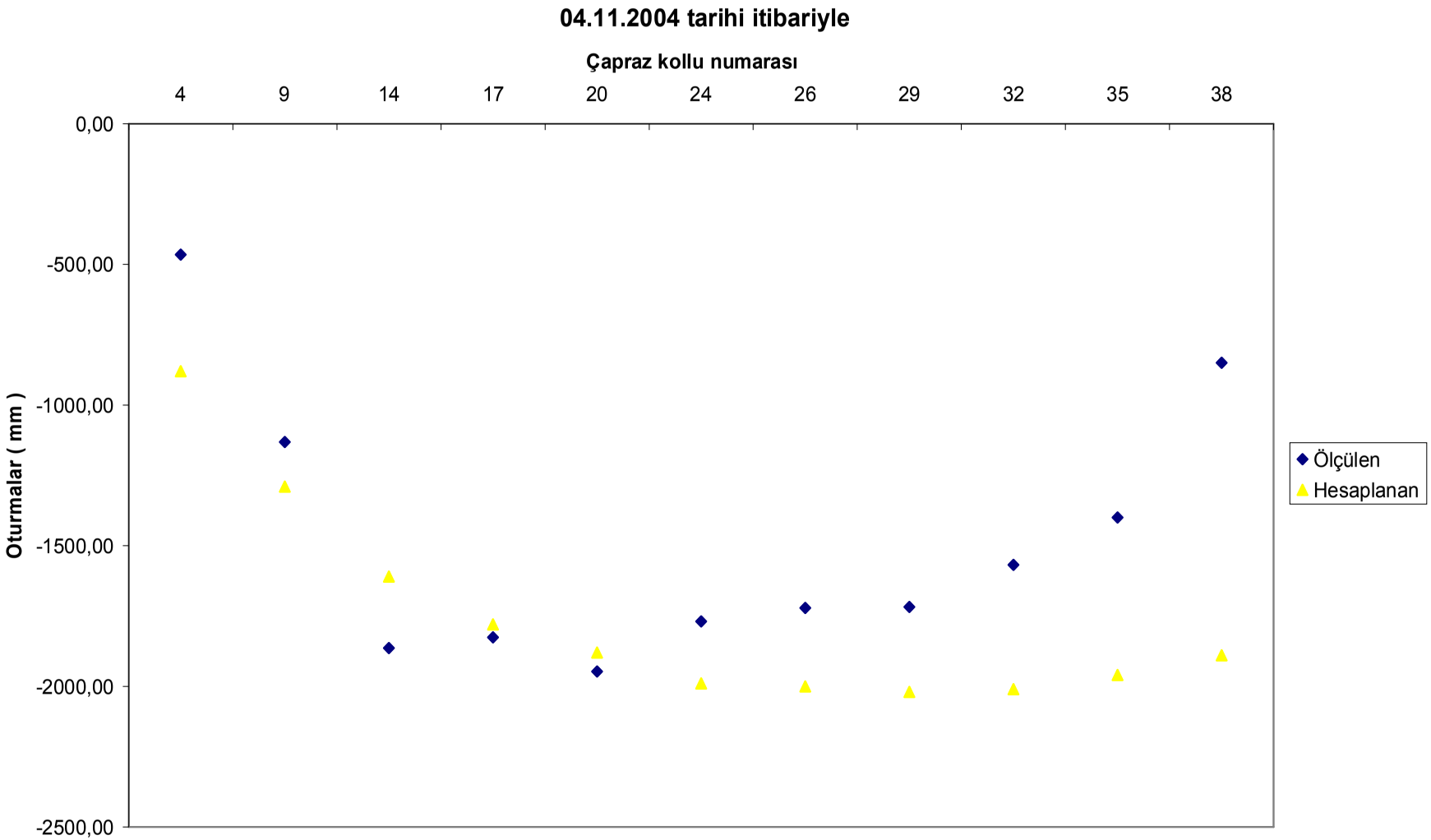
2004 yılının son okuma tarihi olan 04.11.2004 itibariyle ölçülen ve sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis'te hesaplanan düşey yer değiştirmeler, Şekil 5.8'de aynı eğride gösterilmektedir. Çizelge 5.16'da ise ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler çizelge olarak verilmiştir. Şekil 5.7'de 2004 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu görülmektedir.



Şekil 5.7. 2004 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu

Çizelge 5.16. 04.11.2004 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler

Çapraz Kollu numarası	Ölçülen yer değiştirmeler(mm)	Hesaplanan yer değiştirmeler(mm)	Fark(mm)
4	-465,00	-880,00	415,00
9	-1131,00	-1290,00	159,00
14	-1864,00	-1610,00	-254,00
17	-1826,00	-1780,00	-46,00
20	-1947,00	-1880,00	-67,00
24	-1769,00	-1990,00	221,00
26	-1721,00	-2000,00	279,00
29	-1718,00	-2020,00	302,00
32	-1568,00	-2010,00	442,00
35	-1400,00	-1960,00	560,00
38	-850,00	-1890,00	1040,00

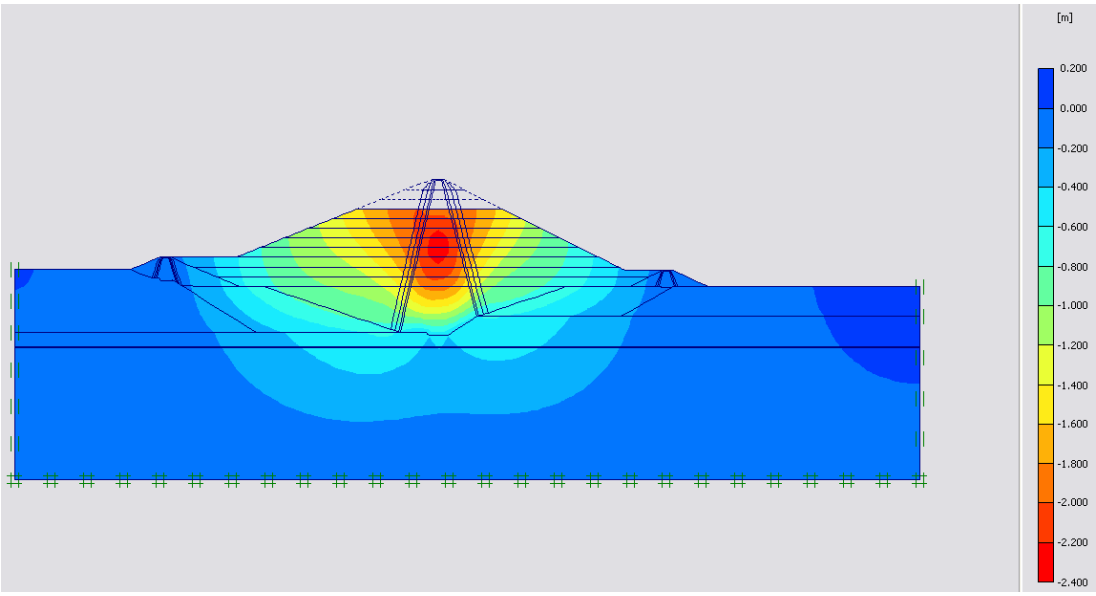


Şekil 5.8. 04.11.2004 tarihi itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi

04.11.2004 tarihi itibariyle dolgu yüksekliği 122,07 m'dir. Yapılan analiz sonucunda hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme -2060,00 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme -1938,00 mm'dir. Düşey yer değiştirmelerin, baraj temelinden krete doğru çıkıldıkça arttığı, baraj yüksekliğinin yaklaşık yarısında maksimuma ulaştığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir.

c) 2005 yılı sonu itibariyle dolgu yüksekliği 135,07 m'dir.

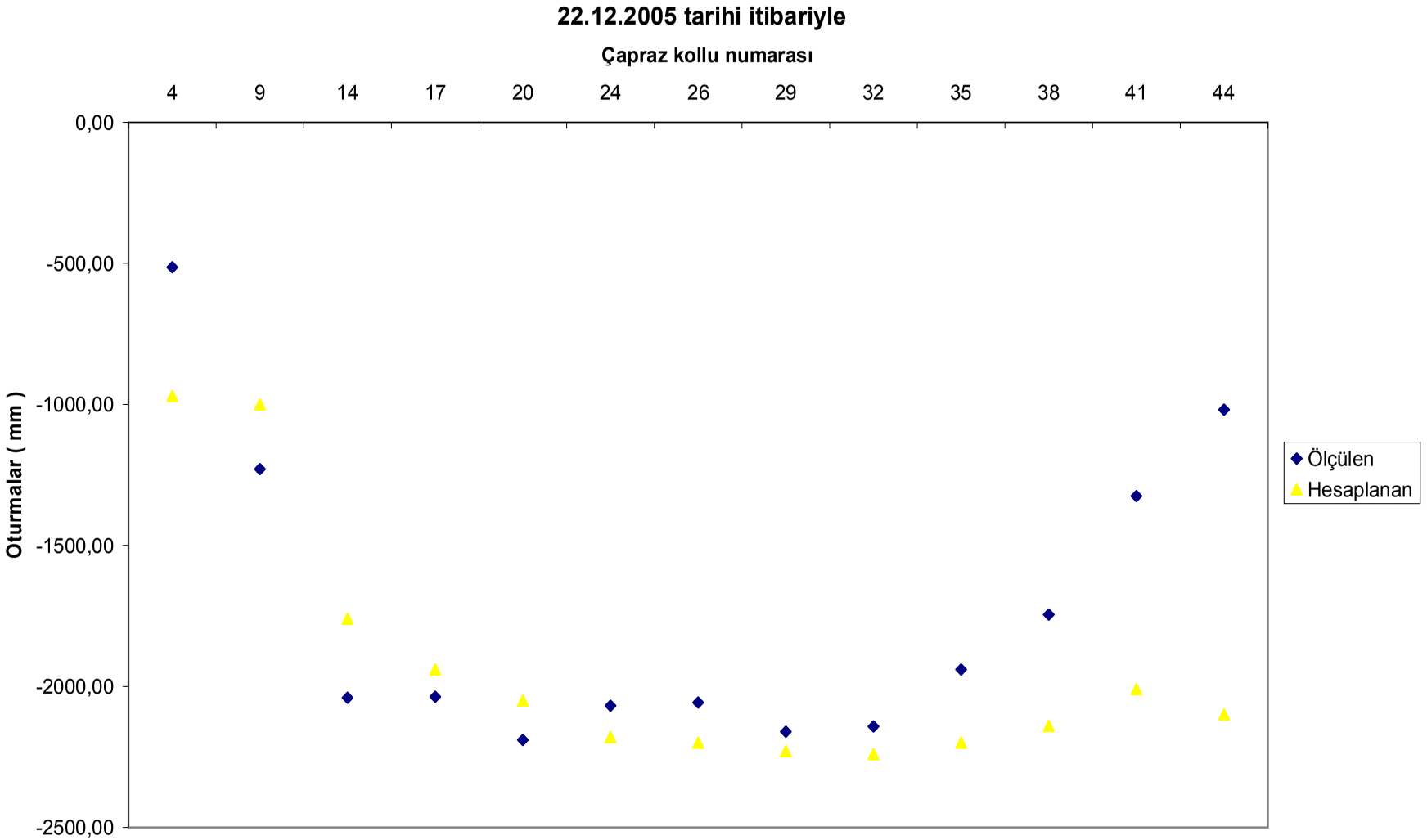
2005 yılının son okuma tarihi olan 22.12.2005 itibariyle ölçülen ve sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis'te hesaplanan düşey yer değiştirmeler, Şekil 5.10'da aynı eğride gösterilmektedir. Çizelge 5.17'de ise ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler çizelge olarak verilmiştir. Şekil 5.9'da 2005 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu görülmektedir.



Şekil 5.9. 2005 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu

Çizelge 5.17. 22.12.2005 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler

Çapraz Kollu numarası	Ölçülen yer değiştirme(mm)	Hesaplanan yer değiştirme(mm)	Fark(mm)
4	-514,00	-970,00	456,00
9	-1230,00	-1000,00	-230,00
14	-2040,00	-1760,00	-280,00
17	-2037,00	-1940,00	-97,00
20	-2190,00	-2050,00	-140,00
24	-2069,00	-2180,00	111,00
26	-2057,00	-2200,00	143,00
29	-2161,00	-2230,00	69,00
32	-2142,00	-2240,00	98,00
35	-1940,00	-2200,00	260,00
38	-1745,00	-2140,00	395,00
41	-1325,00	-2010,00	685,00
44	-1019,00	-2100,00	1081,00

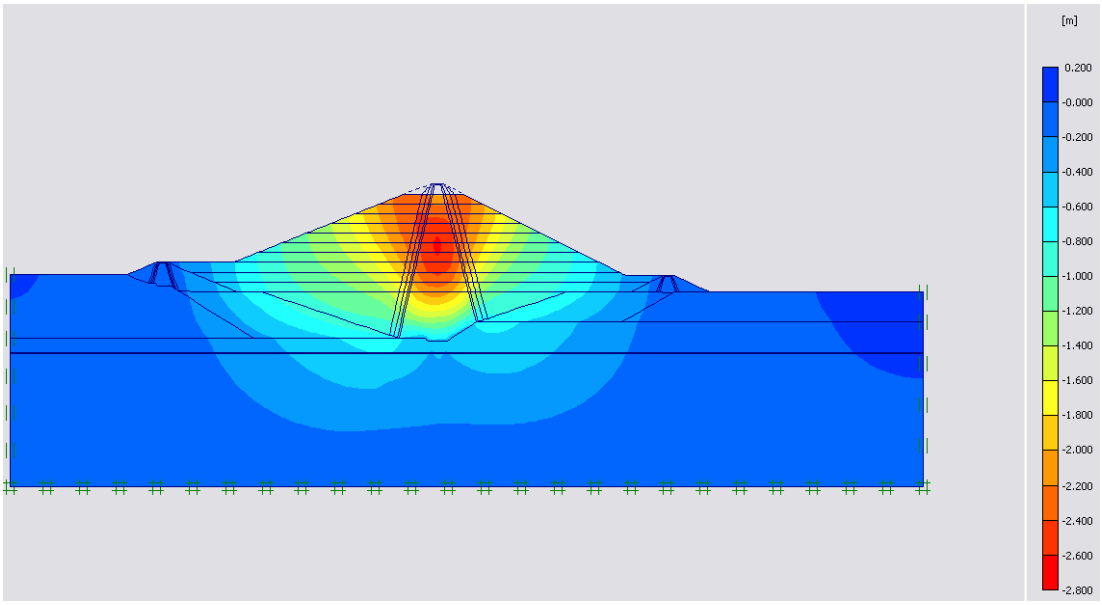


Şekil 5.10. 22.12.2005 tarihi itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi

22.12.2005 tarihi itibariyle dolgu yüksekliği 135,07 m'dir. Yapılan analiz sonucunda hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme -2280,00 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme -2190,00 mm'dir. Düşey yer değiştirmelerin, baraj temelinden krete doğru çıkıldıkça arttığı, baraj yüksekliğinin yaklaşık yarısında maksimuma ulaştığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir.

d) 2006 yılı sonu itibariyle dolgu yüksekliği 154,57 m'dir.

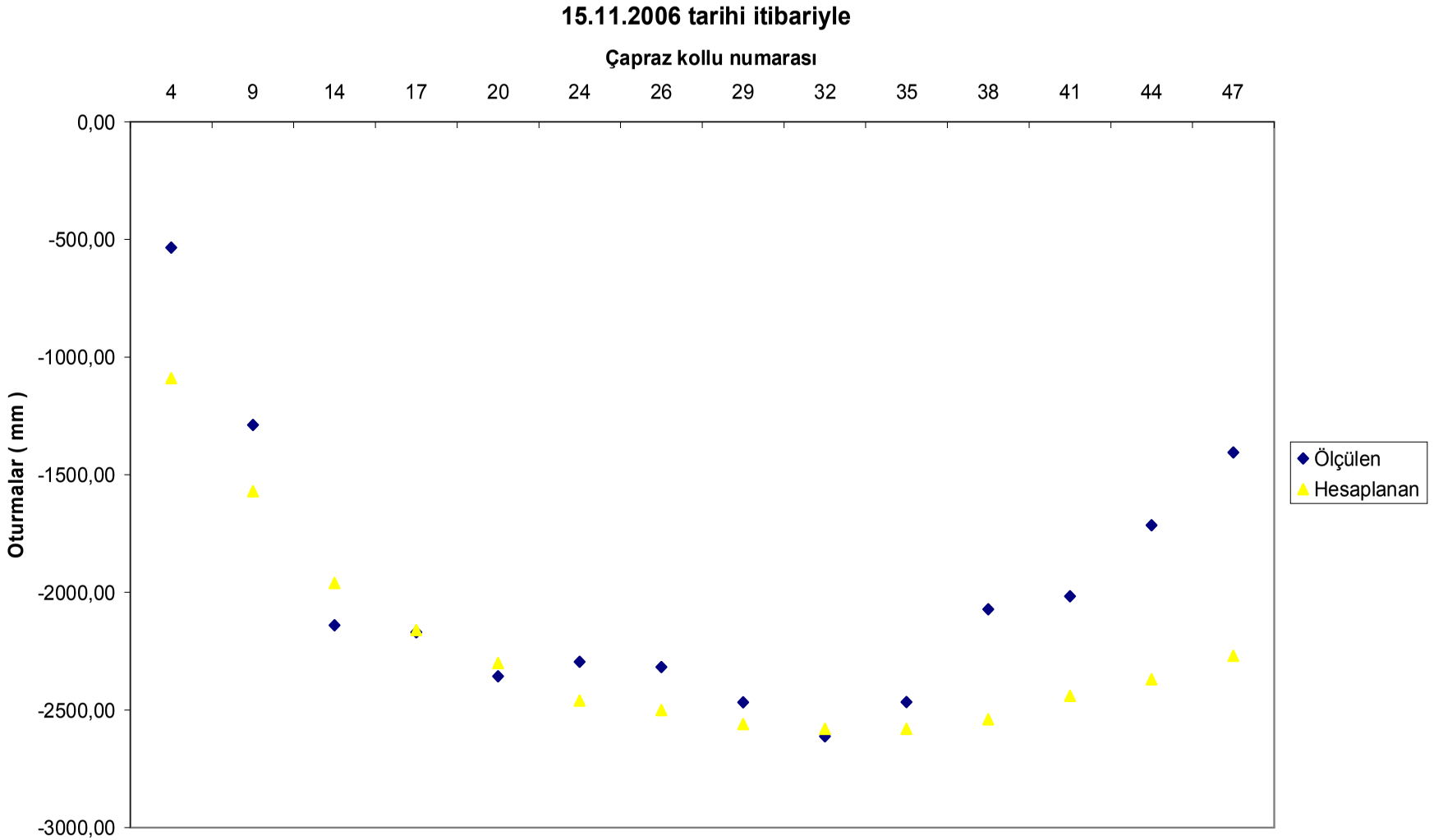
2006 yılının son okuma tarihi olan 15.11.2006 itibariyle ölçülen ve sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis'te hesaplanan düşey yer değiştirmeler, Şekil 5.12'de aynı eğride gösterilmektedir. Çizelge 5.18'de ise ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler çizelge olarak verilmiştir. Şekil 5.11'de 2006 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu görülmektedir.



Şekil 5.11. 2006 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu

Çizelge 5.18. 15.11.2006 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler

Çapraz Kollu numarası	Ölçülen yer değiştirmeler(mm)	Hesaplanan yer değiştirmeler(mm)	Fark(mm)
4	-535,00	-1090,00	555,00
9	-1288,00	-1570,00	282,00
14	-2140,00	-1960,00	-180,00
17	-2170,00	-2160,00	-10,00
20	-2357,00	-2300,00	-57,00
24	-2295,00	-2460,00	165,00
26	-2318,00	-2500,00	182,00
29	-2467,00	-2560,00	93,00
32	-2612,00	-2580,00	-32,00
35	-2466,00	-2580,00	114,00
38	-2072,00	-2540,00	468,00
41	-2017,00	-2440,00	423,00
44	-1715,00	-2370,00	655,00
47	-1405,00	-2270,00	865,00

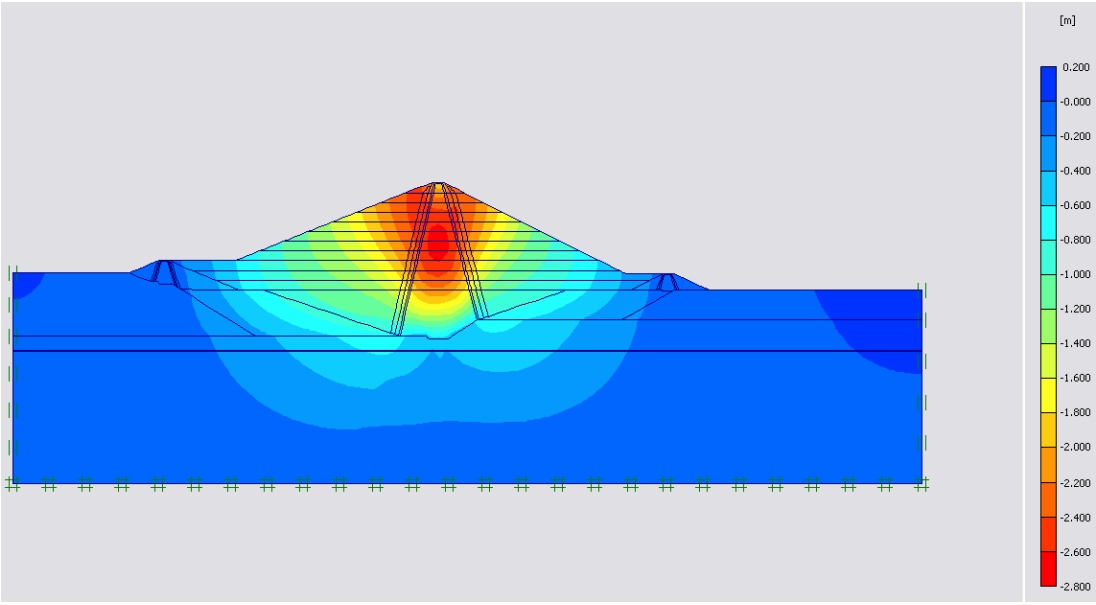


Şekil 5.12. 15.11.2006 tarihi itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi

15.11.2006 tarihi itibariyle dolgu yüksekliği 154,57 m'dir. Yapılan analiz sonucunda hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme -2630,00 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme -2612,00 mm'dir. Düşey yer değiştirmelerin, baraj temelinden krete doğru çıkıldıkça arttığı, baraj yüksekliğinin yaklaşık yarısında maksimuma ulaştığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir.

e) 2007 yılı sonu itibariyle dolgu yüksekliği 162,50 m.

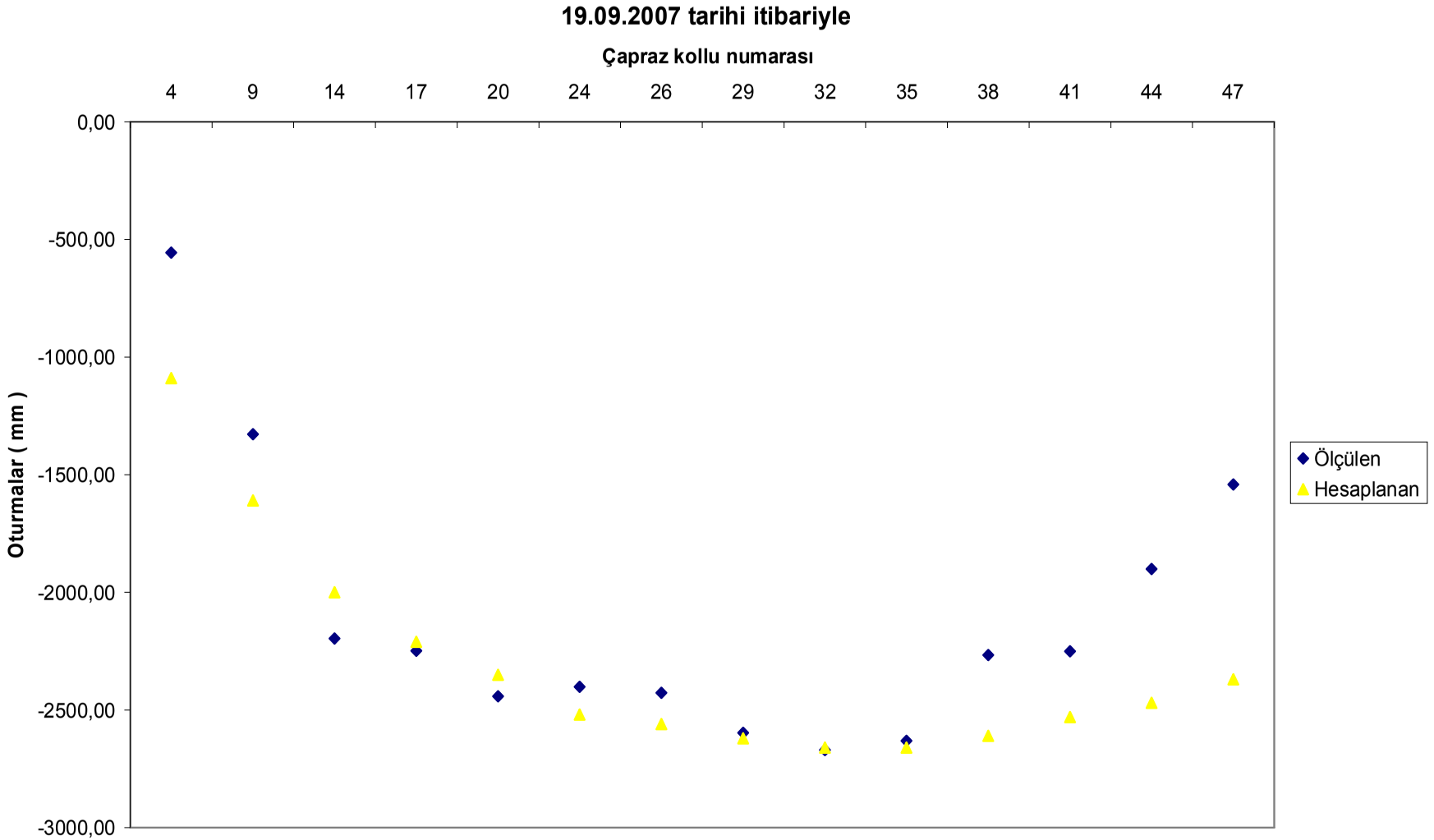
2007 yılının son okuma tarihi olan 19.09.2007 itibariyle ölçülen ve sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis'te hesaplanan düşey yer değiştirmeler, Şekil 5.14'te aynı eğride gösterilmektedir. Çizelge 5.19'da ise ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler çizelge olarak verilmiştir. Şekil 5.13'te 2007 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu görülmektedir.



Şekil 5.13. 2007 yılı sonu itibariyle dolgu gerçekleşme durumu

Çizelge 5.19. 19.09.2007 tarihi itibariyle ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler

Çapraz Kollu numarası	Ölçülen yer değiştirmeler(mm)	Hesaplanan yer değiştirmeler(mm)	Fark(mm)
4	-556,00	-1090,00	534,00
9	-1328,00	-1610,00	282,00
14	-2196,00	-2000,00	-196,00
17	-2248,00	-2210,00	-38,00
20	-2442,00	-2350,00	-92,00
24	-2402,00	-2520,00	118,00
26	-2427,00	-2560,00	133,00
29	-2597,00	-2620,00	23,00
32	-2670,00	-2660,00	-10,00
35	-2631,00	-2660,00	29,00
38	-2267,00	-2610,00	343,00
41	-2250,00	-2530,00	280,00
44	-1901,00	-2470,00	569,00
47	-1541,00	-2370,00	829,00



Şekil 5.14. 19.09.2007 tarihi itibariyle oturma-çapraz kollu numarası eğrisi

İnşaat sonu durumu olarak değerlendirilebilecek tarih olan 19.09.2007 tarihi itibariyle dolgu yüksekliği 162,50 m'dir. Yapılan analiz sonucunda hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme -2700,00 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme -2670,00 mm'dir. Düşey yer değiştirmelerin, baraj temelinden krete doğru çıkıldıkça arttığı, baraj yüksekliğinin yaklaşık yarısında maksimuma ulaştığı ve daha sonra azaldığı görülmektedir.

Yukarıdaki grafiklerden de görüleceği gibi baraj, dolgu imalatının başından itibaren oturma davranışı göstermektedir. Baraj dolgusu, çekirdekte bulunan kil malzemenin zamana bağlı olarak konsolidasyonu neticesinde grafiklerden de anlaşılacağı gibi 2007 yılının sonunda –dolgu bitim tarihi de denebilir- önceki yıllara göre en büyük oturma değerine ulaşmıştır. Bu maksimum değer baraj yüksekliğinin yaklaşık ortasında gözlemlenmiştir. Araziden alınan okumalar ve model karşılaştırıldığında baraj dolgusu, düşey yer değiştirmeler bakımından benzer davranış sergilemektedir. Hesaplanan ve ölçülen düşey yer değiştirme değerleri arasında barajın tepe noktasına yaklaşıldıkça önemli farklar görülmektedir. Bu farklılığın, barajın üst kısmında baraj dolgusunun sıkıştırılması için harcanan enerjinin dolgu kesiti küçüldükçe dolgunun diğer kısımlarına harcanan enerjiye oranla fazla olması nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir. Ayrıca, önceki bölümlerde bahsedilen Ünsever (2007) tarafından incelenen Muratlı Barajı, Özkuzukıran (2005) tarafından incelenen Kürtün Barajı ve Kyrou ve ark., (2005) tarafından incelenen Lefkara Barajlarıyla kıyaslandığında maksimum oturmanın gerçekleştiği yer açısından benzerlik göstermektedir.

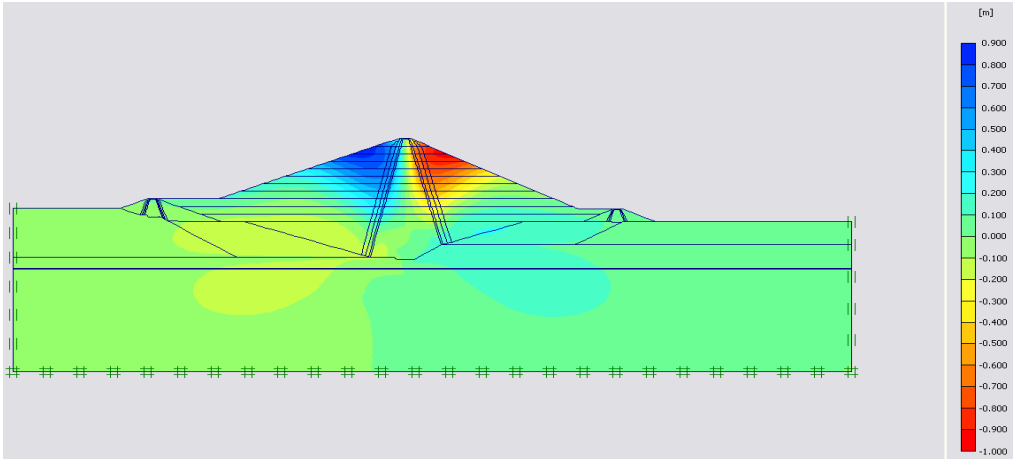
Yatay yer değiştirmeler

Akköprü Barajı'nda yatay yer değiştirmeleri ölçmekte kullanılan herhangi bir ölçüm aleti bulunmamaktadır. Plaxis'te yapılan analiz sonrasında yıl sonu gerçekleşme ve inşaat sonu durumları incelendiğinde maksimum yatay yer değiştirmelerin baraj eksenine göre mansap tarafında ve barajın üst kısmında gerçekleştiği görülmektedir. Yıl sonu gerçekleşme durumları tek tek değerlendirildiğinde hepsinde de barajın üst kısmında, memba tarafında mansaba doğru yatay hareket, mansap tarafında da membaya doğru yatay hareketler görülmektedir. İnşaat sonrası durum için de aynı

sonuçlar gözlemlenmektedir. İnşaat sonrası durum için yatay yer değiştirmeler Şekil 5.15'te görülmektedir. Hesaplanan maksimum yatay yer değiştirmeler Çizelge 5.20'de verilmiştir. (-) değerler mansaptan membaya hareketi ifade etmektedir.

Çizelge 5.20. Hesaplanan maksimum yatay yer değiştirmeler

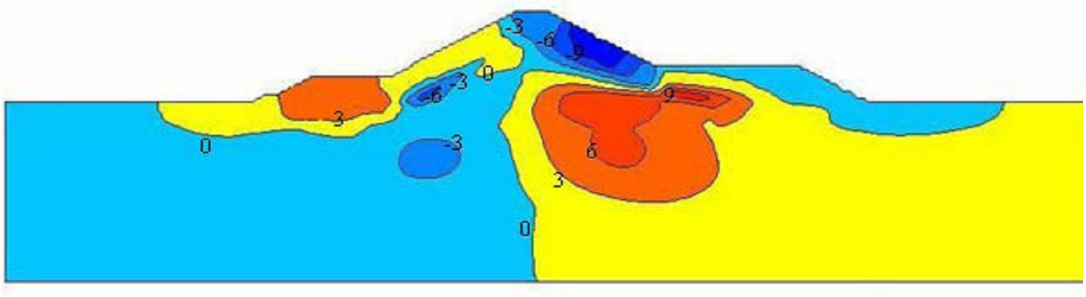
Ölçüm tarihi	Hesaplanan maksimum yatay yer değiştirmeler(mm)
17.11.2003	-505,350
04.11.2004	-706,850
22.12.2005	-820,600
15.11.2006	-973,780
19.09.2007	-973,290



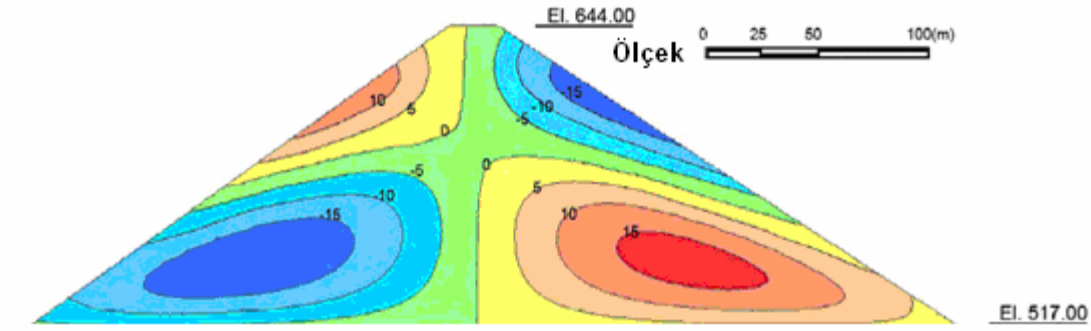
Şekil 5.15. İnşa sonrası için yatay yer değiştirmeler

Analiz sonrası meydana gelen yatay yer değiştirmeler, barajın memba üst kısmında mansaba doğru, memba alt kısmında ise membaya doğru gözlemlenmiştir. Barajın mansap üst kısmında ise membaya doğru, mansap alt kısmında ise mansaba doğru hareket gözlemlenmiştir.

Yatay yer değiştirmelerin doğrultuları ve yönleri, Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında her iki barajdaki inşaat sonu analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik göstermektedir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın inşa sonrası yatay yer değiştirme konturleri Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de görülmektedir.



Şekil 5.16. Muratlı Barajı'nın inşa sonrası yatay yer değiştirme konturleri



Şekil 5.17. Kürtün Barajı'nın inşa sonrası yatay yer değiştirme konturleri

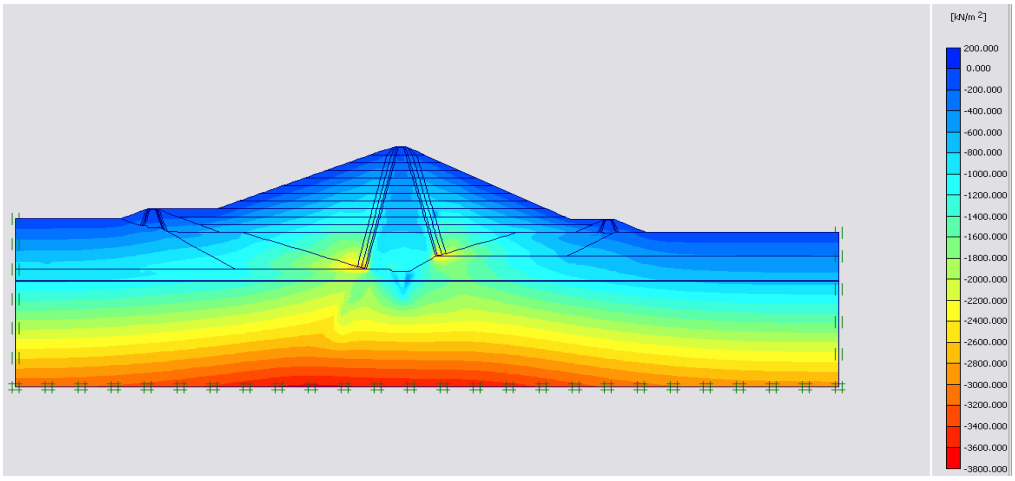
Toplam gerilmeler

Akköprü Barajı'nda gerilme ölçmekte kullanılan herhangi bir ölçüm aleti bulunmamaktadır. İnşa sonrası için toplam gerilme konturleri Şekil 5.18'de görülmektedir. Plaxis'te yapılan analiz sonucunda baraj ekseninde bazı noktaların toplam gerilmeleri Çizelge 5.21'de verilmiştir.

Çizelge 5.21. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam gerilmeleri

Kotu	Toplam gerilme değeri (kPa)
48,12	-1280,001
66,51	-1125,210
75,87	-1035,872
98,62	-858,364
108,62	-767,200
118,62	-735,818
129,62	-698,810
139,62	-648,429
149,62	-595,201
159,62	-533,142
169,62	-469,308
179,62	-393,138
189,62	-300,330
199,62	-189,733
209,62	-25,621
210,62	-1,981

Çizelgeden de görüleceği gibi inşa sonrası durum için baraj temelindeki maksimum toplam gerilme -1280,001 kPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.18'e göre toplam gerilmeler baraj gövdesinden ana kayaya doğru gittikçe beklendiği gibi artmaktadır.



Şekil 5.18. İnşa sonrası için toplam gerilmeler

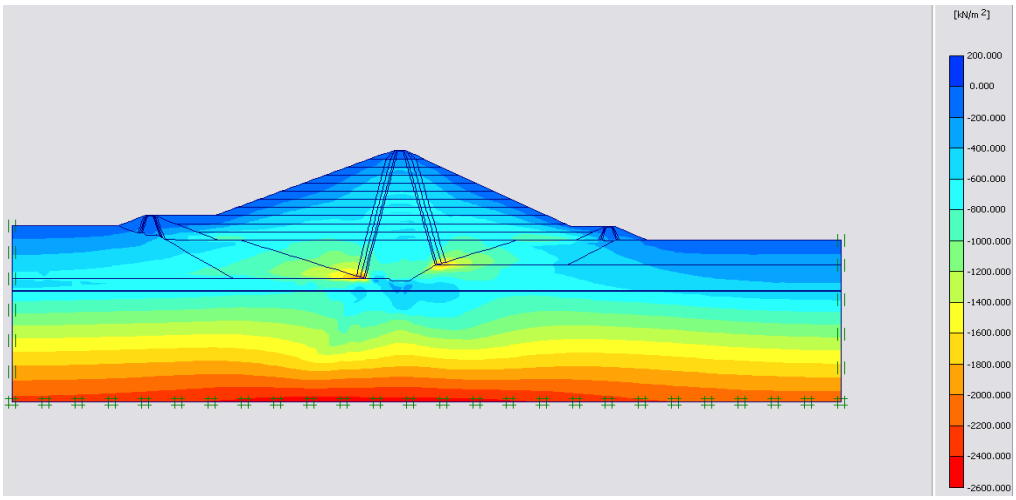
Toplam yatay gerilmeler

Plaxis'te yapılan analiz sonucunda baraj ekseninde bazı noktaların toplam yatay gerilmeleri Çizelge 5.22'de verilmiştir. İnşa sonrası için toplam yatay gerilmeler Şekil 5.19'da görülmektedir.

Çizelge 5.22. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam yatay gerilmeleri

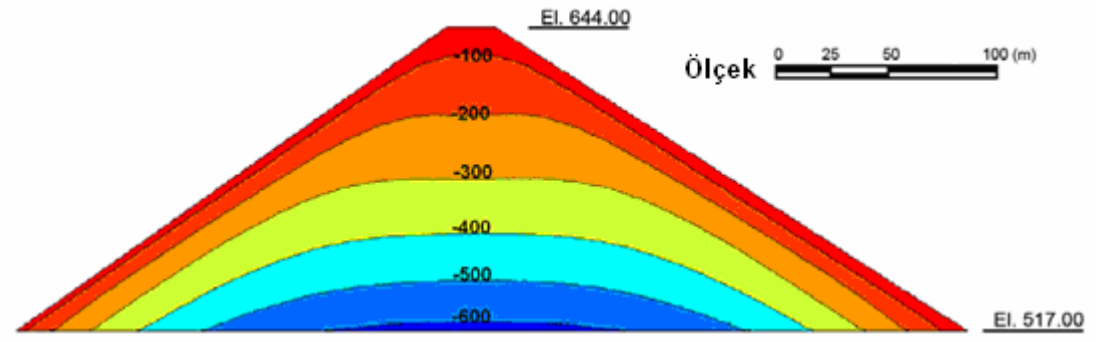
Kotu	Toplam gerilme değeri(kPa)
48,12	-1003,358
65,26	-877,663
76,43	-761,585
98,62	-762,317
108,62	-674,409
118,62	-704,164
129,62	-733,023
139,62	-722,081
149,62	-704,605
159,62	-667,829
169,62	-626,286
179,62	-557,344
189,62	-452,130
199,62	-308,026
209,62	-171,719
210,62	-4,432

Çizelgeden de görüleceği gibi inşa sonrası durum için baraj temelindeki maksimum toplam gerilme -1003,358 kPa olarak hesaplanmıştır.

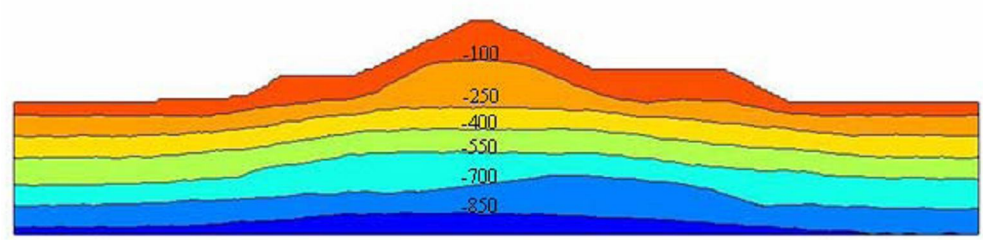


Şekil 5.19. İnşa sonrası için toplam yatay gerilmeler

Toplam yatay gerilmeler Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında her iki barajdaki inşaat sonu analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik göstermektedir. Krette sıfıra yakın bir değer alan toplam yatay gerilmeler ana kayaya doğru inildikçe artmaktadır. Ayrıca baraj eksenine göre gerilmeler simetriktir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın inşa sonrası için toplam yatay gerilme konturleri Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de görülmektedir.



Şekil 5.20. Kürtün Barajı'nın inşa sonrası yatay gerilme konturleri



Şekil 5.21. Muratlı Barajı'nın inşa sonrası yatay gerilme konturleri

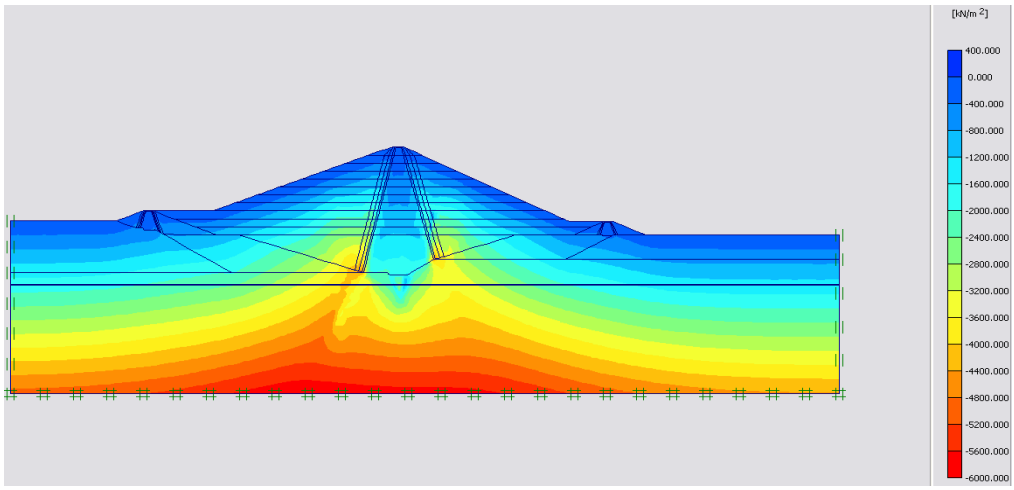
Toplam düşey gerilmeler

Plaxis'te yapılan analiz sonucunda baraj ekseninde bazı noktaların toplam düşey gerilmeleri Çizelge 5.23'te verilmiştir. İnşa sonrası için toplam düşey gerilmeler Şekil 5.22'de görülmektedir.

Çizelge 5.23. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam düşey gerilmeleri

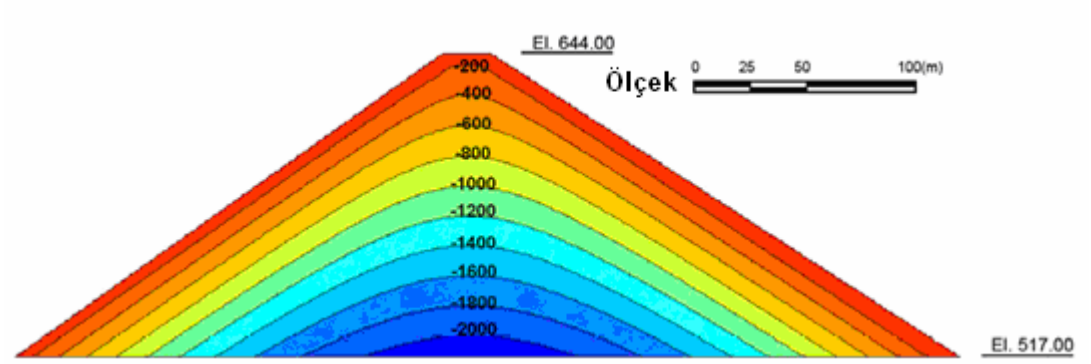
Kotu	Toplam gerilme değeri(kPa)
48,12	-1889,827
65,31	-1676,767
76,41	-1535,144
98,62	-1236,057
108,62	-1096,392
118,62	-994,153
129,62	-879,642
139,62	-774,091
149,62	-668,482
159,62	-562,090
169,62	-456,874
179,62	-350,277
189,62	-240,593
199,62	-129,958
209,62	-20,637
210,62	-0,028

Çizelgeden de görüleceği gibi inşa sonrası durum için baraj temelindeki maksimum toplam gerilme –1889,827 kPa olarak hesaplanmıştır.

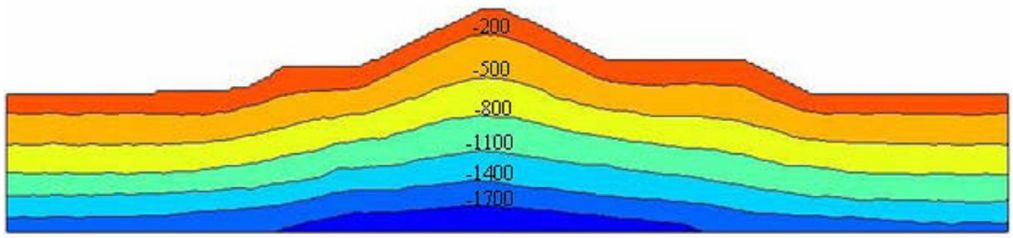


Şekil 5.22. İnşa sonrası için toplam düşey gerilmeler

Toplam düşey gerilmeler, Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında her iki barajdaki inşaat sonu analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik göstermektedir. Krette sıfıra yakın bir değer alan toplam düşey gerilmeler, ana kayaya doğru inildikçe artmaktadır. Ayrıca baraj eksenine göre gerilmeler simetriktir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın inşa sonrası için toplam yatay gerilme konturleri Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te görülmektedir.



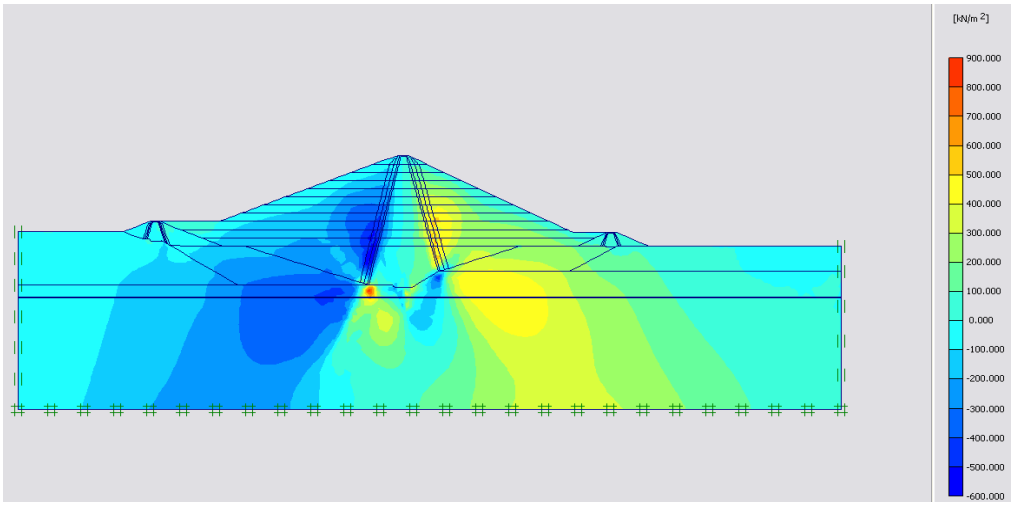
Şekil 5.23. Kürtün Barajı'nın inşa sonrası düşey gerilme konturleri



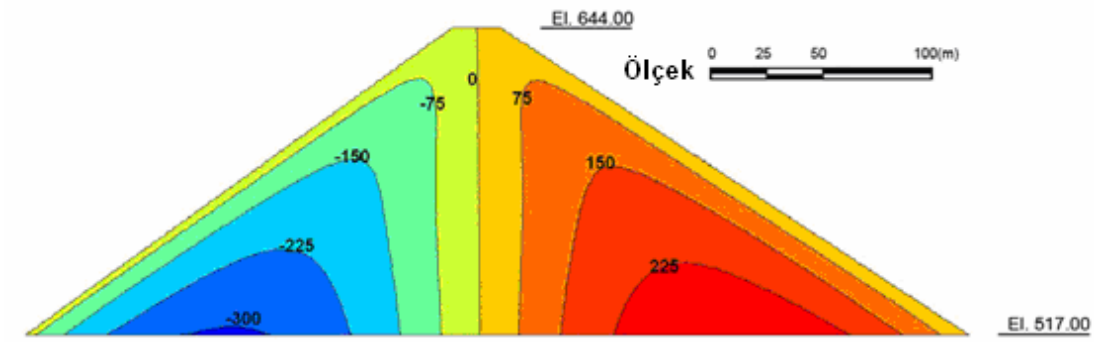
Şekil 5.24. Muratlı Barajı'nın inşa sonrası düşey gerilme konturleri

Kayma gerilmeleri

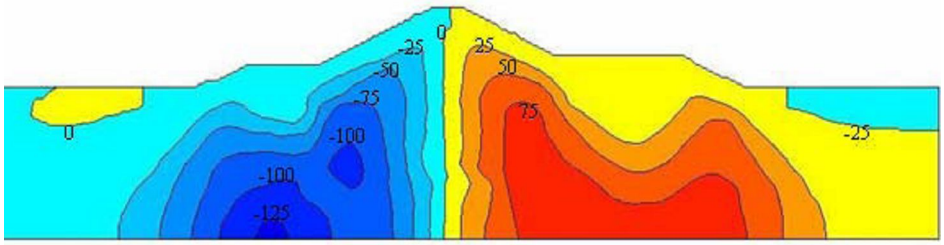
Plaxis'te yapılan analiz sonucunda maksimum kayma gerilmesi 886,95 kPa hesaplanmıştır Baraj ekseninde ise kayma gerilmeleri sıfıra yakın olarak belirlenmiştir. İnşa sonrası için kayma gerilmeleri Şekil 5.25'te görülmektedir. Kayma gerilmelerinin doğrultuları ve yönleri, Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında her iki barajdaki inşaat sonu analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik göstermektedir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın inşa sonrası için kayma gerilmesi konturleri Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de görülmektedir.



Şekil 5.25. İnşa sonrası için kayma gerilmeleri



Şekil 5.26. Kürtün Barajı'nın inşa sonrası kayma gerilme konturleri



Şekil 5.27. Muratlı Barajı'nın inşa sonrası kayma gerilmesi konturleri

5.5. Rezervuar Dolum Sonrası Analiz

Dolgu imalatı bittikten sonra su tutma aşamasına geçilir. Deformasyonları kontrol altında tutmak için su tutma işlemi yavaş yapılır. Su seviyesi yükseldikçe artan yatay ve düşey yer değiştirmeler baraj davranışını önemli derecede etkilemektedir.

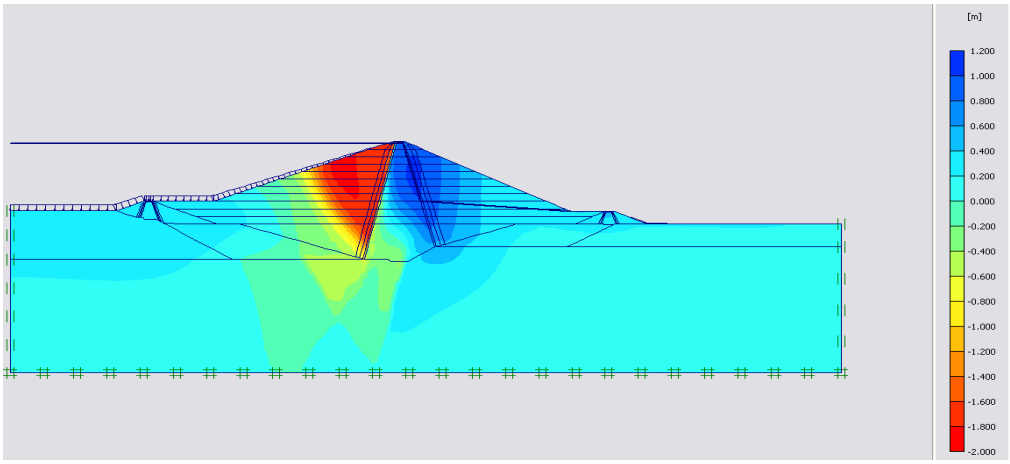
Önceden de belirtildiği gibi, Akköprü Barajı'nda henüz su tutulmaya başlanmamıştır. Baraj gövdesinde boşluk suyu basınçlarını ölçmekte kullanılan piyezometreler bulunmasına rağmen, su tutulması sonrasına ait piyezometre okumaları mevcut değildir.

Modele su yükü de dahil edilerek su tutulması sonrasına dair oturma ve gerilme tahminleri yapılacaktır. Analizde, inşaat sonrası oluşan deformasyonlar dikkate alınmayacak sadece su tutulması sonrasında meydana gelecek deformasyonlar incelenecektir.

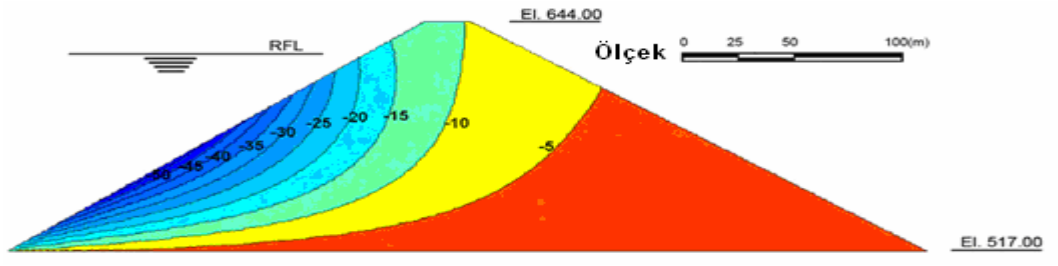
Düşey yer değiştirmeler

Plaxis'te yapılan analiz sonrasında, rezervuar dolum sonrası durum incelendiğinde, önemli düşey yer değiştirmelerin barajın memba tarafında, üst yüzey kısmında gerçekleştiği görülmektedir. Rezervuar dolum sonrası hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme -1860,00 mm'dir. Rezevuar dolum sonrası için düşey yer değiştirmeler Şekil 5.28'de görülmektedir.

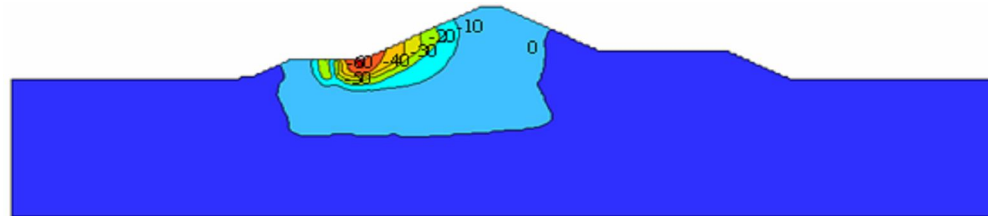
Düşey yer değiştirmelerin doğrultuları ve yönleri, Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında her iki barajdaki rezervuar dolum sonrası analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik gösterdiği görülebilir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için düşey yer değiştirme konturleri Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da görülmektedir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı kil çekirdekli kaya dolgu barajlar olmadıklarından, Akköprü Barajı ile karşılaştırıldığında, düşey yer değiştirme davranışları farklılık göstermektedir.



Şekil 5.28. Rezevuar dolum sonrası için düşey yer değiştirmeler



Şekil 5.29. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için düşey yer değiştirme konturleri

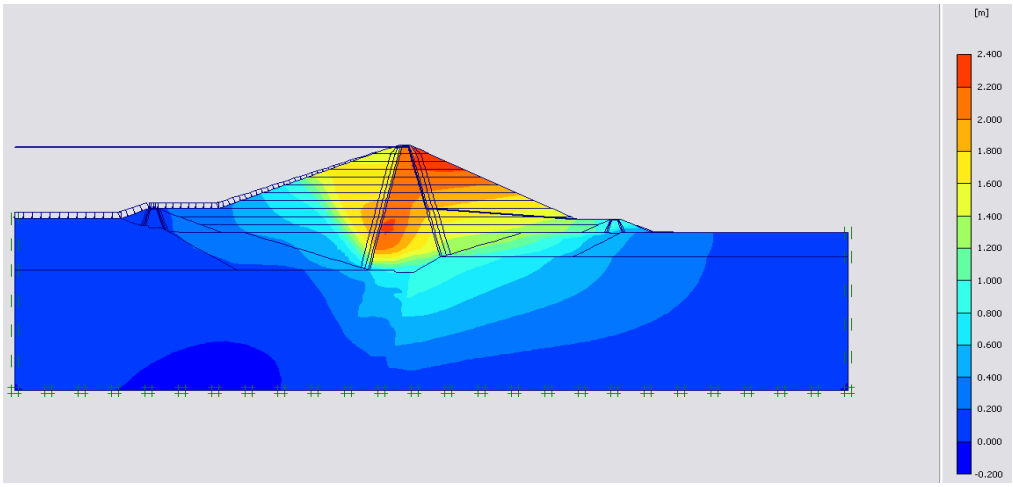


Şekil 5.30. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için düşey yer değiştirme konturleri

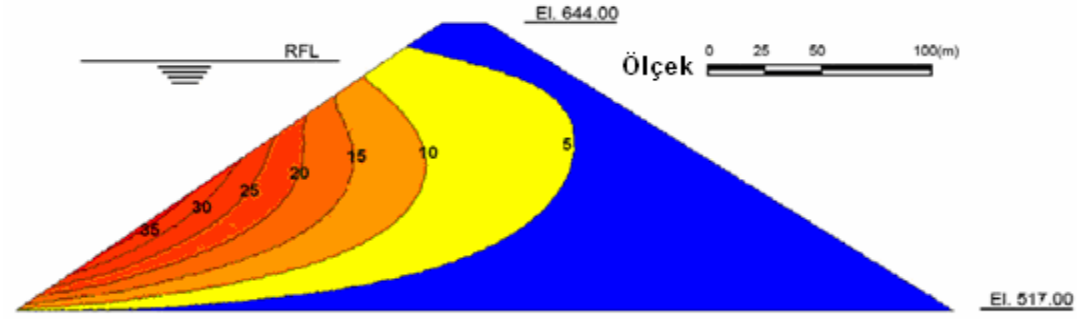
Yatay yer değiştirmeler

Plaxis'te yapılan analiz sonrasında rezervuar dolum sonrası durum incelendiğinde önemli yatay yer değiştirmelerin barajın üst kısmında memba ve mansap tarafında gerçekleştiği görülmektedir. Su yükünün etkimesiyle, dolgunun tüm kısımlarında mansaba doğru yatay hareket görülmektedir. Rezervuar dolum sonrası hesaplanan maksimum yatay yer değiştirme baraj üst kısmında mansaba doğru, 2380,00 mm'dir. Rezevuar dolum sonrası için düşey yer değiştirmeler Şekil 5.31'de görülmektedir.

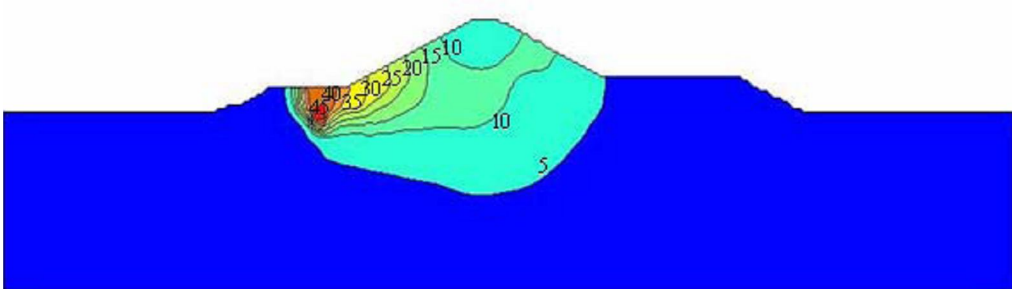
Yatay yer değiştirmelerin doğrultuları ve yönleri, Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında her iki barajdaki rezervuar dolum sonrası analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik gösterdiği görülebilir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için yatay yer değiştirme konturleri Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'te görülmektedir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı kil çekirdekli kaya dolgu barajlar olmadıklarından Akköprü Barajı ile karşılaştırıldığında, yatay yer değiştirme davranışları bakımından farklılık göstermektedir.



Şekil 5.31. Rezevuar dolum sonrası için yatay yer değiştirmeler



Şekil 5.32. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için yatay yer değiştirme konturleri



Şekil 5.33. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için yatay yer değiştirme konturleri

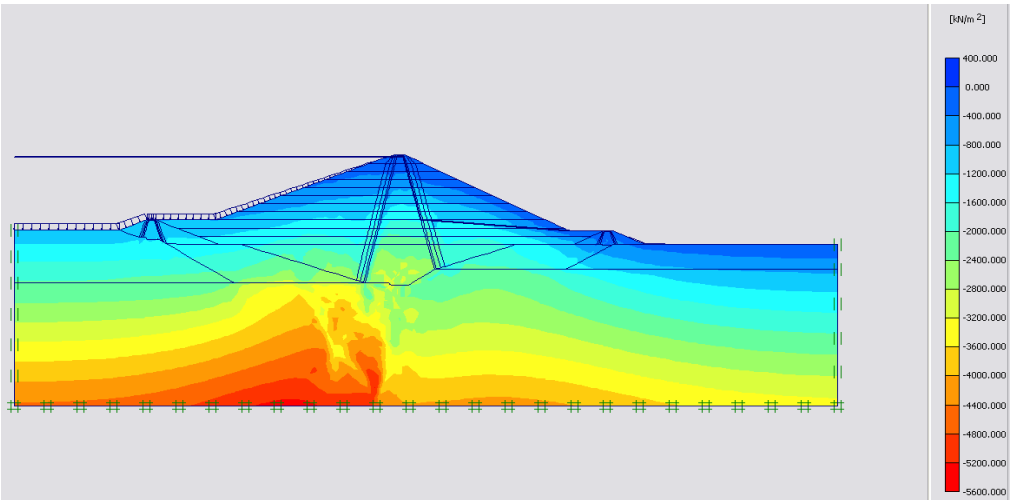
Toplam gerilmeler

Plaxis'te yapılan analiz sonucunda rezervuar dolum sonrası, baraj ekseninde bazı noktaların toplam gerilmeleri Çizelge 5.24'te verilmiştir.

Çizelge 5.24. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam gerilmeleri

Kotu	Toplam gerilme değeri(kPa)
48,12	-2633,398
66,98	-2673,757
76,66	-2472,864
98,62	-2164,353
108,62	-2023,794
118,62	-1816,307
129,62	-1581,109
139,62	-1364,976
149,62	-1142,990
159,62	-944,026
169,62	-754,771
179,62	-566,368
189,62	-393,710
199,62	-236,953
209,62	-25,892
210,62	-7,356

Çizelgeden de görüleceği gibi rezervuar dolum sonrası durum için maksimum toplam gerilme -2673,757 kPa olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.34'e göre toplam gerilmeler baraj gövdesinden ana kayaya doğru, beklendiği şekilde artmaktadır.



Şekil 5.34. Rezevuar dolum sonrası için toplam gerilmeler

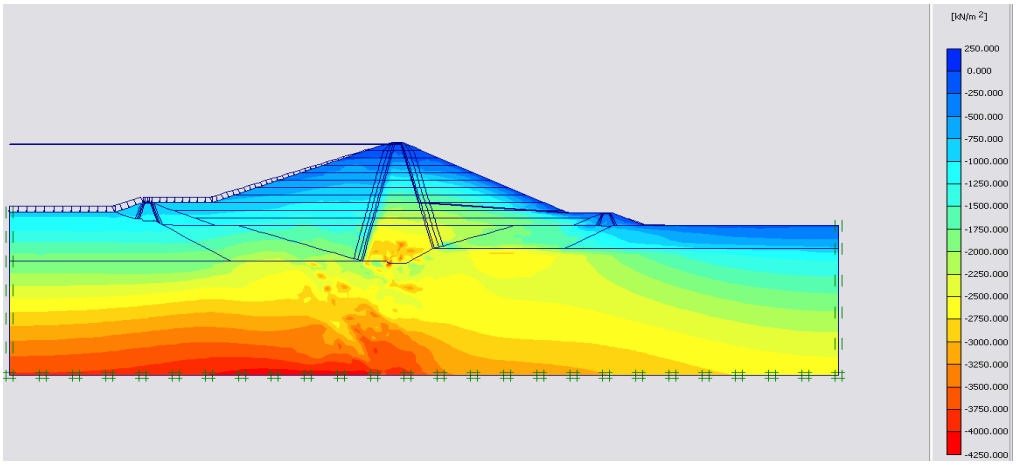
Toplam yatay gerilmeler

Plaxis'te yapılan analiz sonucunda baraj ekseninde bazı noktaların toplam yatay gerilmeleri Çizelge 5.25'te verilmiştir.

Çizelge 5.25. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam yatay gerilmeleri

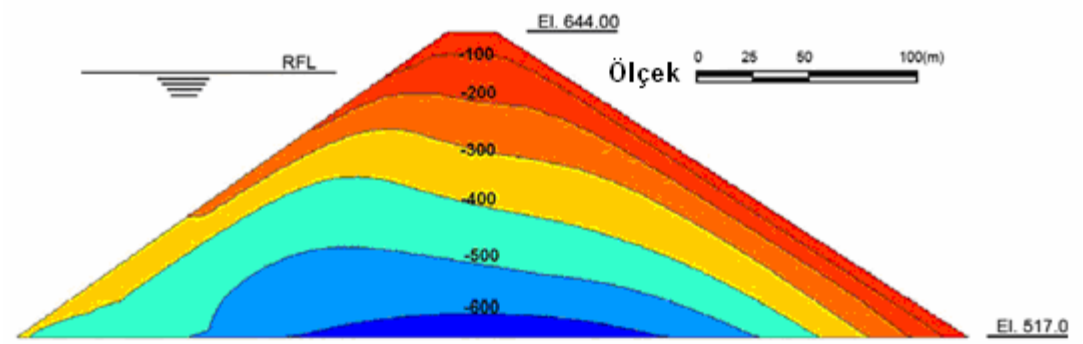
Kotu	Toplam gerilme değeri(kPa)
48,12	-2623,979
67,56	-2910,455
76,30	-2665,611
98,62	-2486,211
108,62	-2276,451
118,62	-2084,509
129,62	-1836,902
139,62	-1594,085
149,62	-1318,499
159,62	-1069,857
169,62	-853,500
179,62	-641,677
189,62	-452,965
199,62	-269,551
209,62	-71,780
210,62	-15,152

Çizelgeden de görüleceği gibi rezervuar dolum sonrası durum için maksimum toplam gerilme -2910,455 kPa olarak hesaplanmıştır. İnşa sonrası için toplam yatay gerilmeler Şekil 5.35'te görülmektedir.

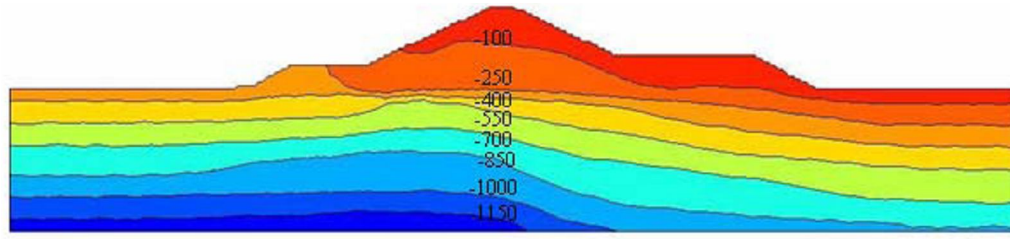


Şekil 5.35. Rezevuar dolum sonrası için toplam yatay gerilmeler

Toplam yatay gerilmeler Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında her iki barajdaki inşaat sonu analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik göstermektedir. Krette sıfıra yakın bir değer alan toplam yatay gerilmeler ana kayaya doğru inildikçe artmaktadır. Ayrıca baraj eksenine göre gerilmeler simetriktir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için toplam yatay gerilme konturleri Şekil 5.36 ve Şekil 5.37'de görülmektedir.



Şekil 5.36. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası yatay gerilme konturleri



Şekil 5.37. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası yatay gerilme konturleri

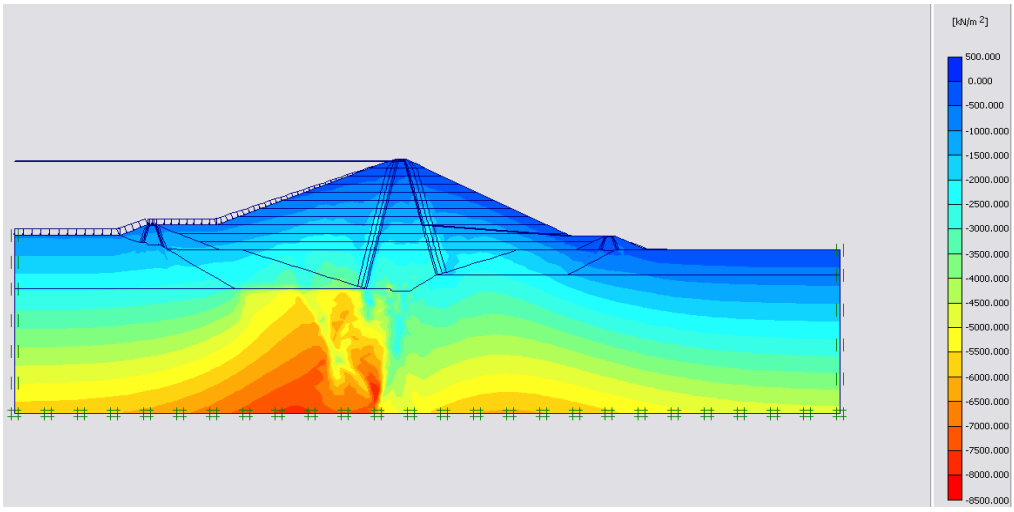
Toplam düşey gerilmeler

Plaxis'te yapılan analiz sonucunda baraj ekseninde bazı noktaların toplam düşey gerilmeleri Çizelge 5.26'da verilmiştir. Rezervuar dolum sonrası için toplam düşey gerilmeler Şekil 5.38'de görülmektedir.

Çizelge 5.26. Baraj ekseninde bazı noktaların toplam düşey gerilmeleri

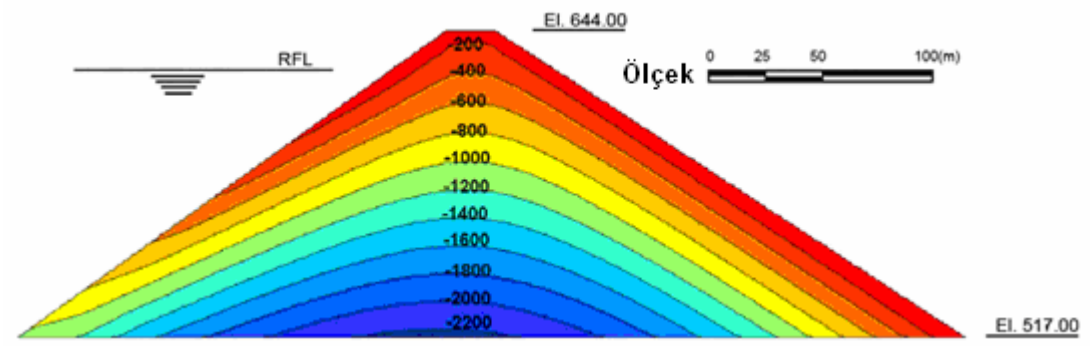
Kotu	Toplam gerilme değeri(kPa)
48,12	-3086,950
64,53	-2912,002
76,77	-2534,105
98,62	-2069,346
108,62	-1982,865
118,62	-1757,877
129,62	-1528,359
139,62	-1332,759
149,62	-1151,452
159,62	-966,840
169,62	-784,135
179,62	-608,931
189,62	-426,417
199,62	-260,057
209,62	-11,012
210,62	-3,767

Çizelgeden de görüleceği gibi rezervuar dolum sonrası durum için baraj temelindeki maksimum toplam gerilme –3086,950 kPa olarak hesaplanmıştır.

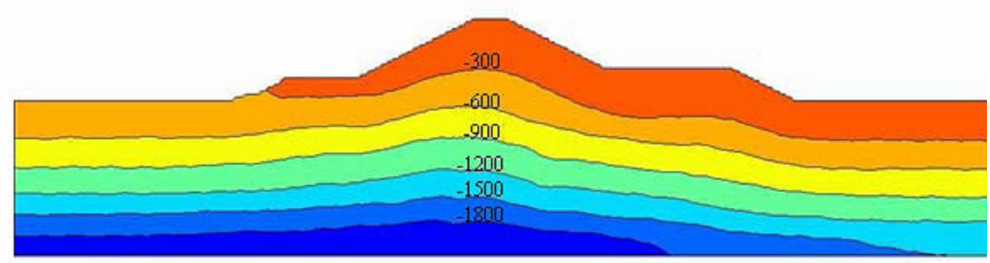


Şekil 5.38. Rezevuar dolum sonrası için toplam düşey gerilmeler

Toplam düşey gerilmeler Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında her iki barajdaki inşaat sonu analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik göstermektedir. Krette sıfıra yakın bir değer alan toplam düşey gerilmeler ana kayaya doğru inildikçe artmaktadır. Ayrıca baraj eksenine göre gerilmeler simetriktir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için toplam düşey gerilme konturleri Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'ta görülmektedir.



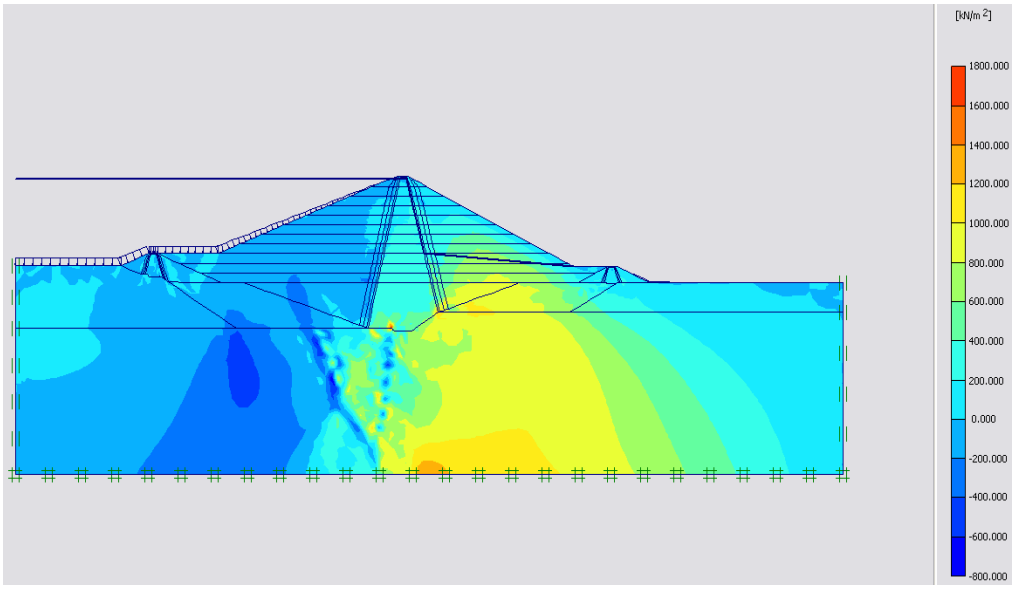
Şekil 5.39. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası düşey gerilme konturleri



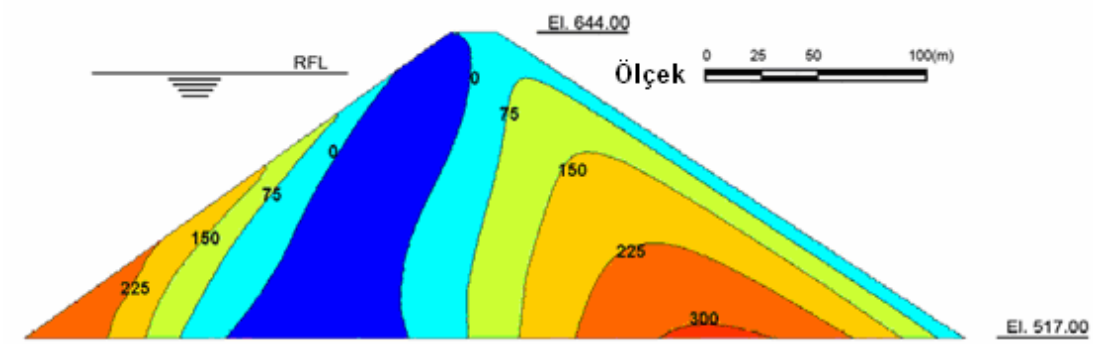
Şekil 5.40. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası düşey gerilme konturleri

Kayma gerilmeleri

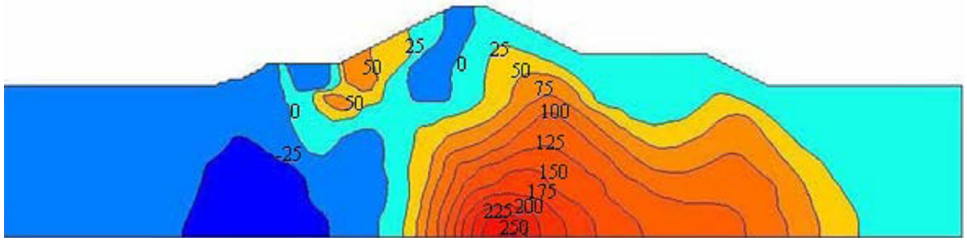
Plaxis'te yapılan analiz sonucunda maksimum kayma gerilmesi 1790 kPa hesaplanmıştır, baraj ekseninde ise kayma gerilmeleri sıfıra yakın hesaplanmıştır. Rezervuar dolum sonrası için kayma gerilmeleri Şekil 5.41'de görülmektedir. Kayma gerilmelerinin doğrultuları ve yönleri, Kürtün Barajı (Özkuzukıran, 2005) ve Muratlı Barajı (Ünsever, 2007) üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, her iki barajdaki rezervuar dolum sonrası analizinde ortaya çıkan davranışlarla benzerlik gösterdiği görülebilir. Muratlı Barajı ve Kürtün Barajı'nın inşa sonrası için kayma gerilmesi konturleri Şekil 5.42 ve Şekil 5.43'te görülmektedir.



Şekil 5.41. Rezevuar dolum sonrası için kayma gerilmeleri



Şekil 5.42. Kürtün Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için kayma gerilme konturleri



Şekil 5.43. Muratlı Barajı'nın rezervuar dolum sonrası için kayma gerilme konturleri

İnşa sonrası safha için membadaki gerilme ve yer değiştirmelerin mansapla simetrik olması beklenir [Khalid ve ark., 1990]. Düşey yer değiştirme konturleri ile yatay, düşey ve kayma gerilmelerine ait konturlerde membadaki değerlerin mansaptaki değerlerle simetrik olduğu görülmektedir. Yatay yer değiştirme konturleri için böyle bir durum söz konusu değildir.

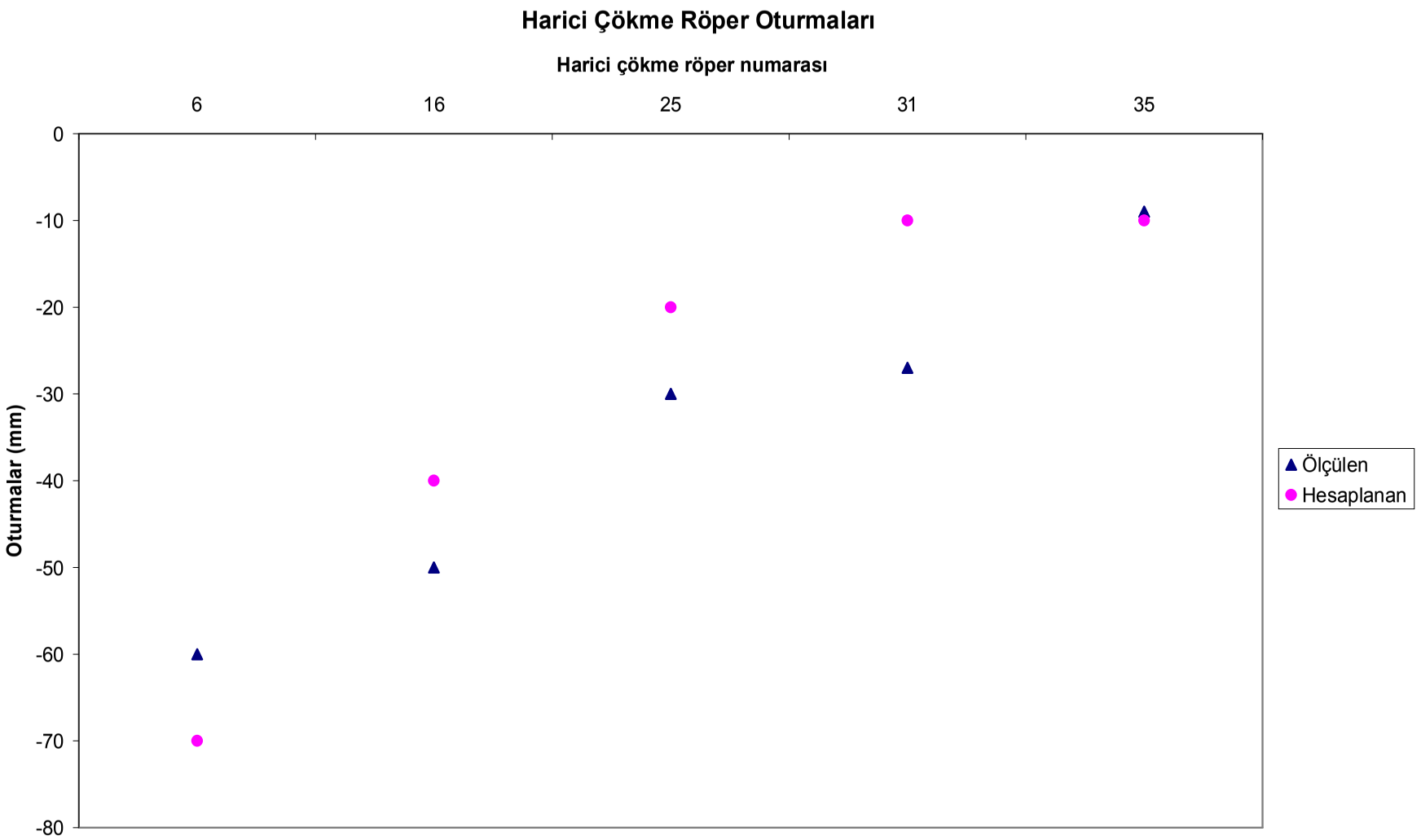
5.6. Harici Çökme Röper Okumalarının Değerlendirilmesi

Akköprü Barajı gövde en kesiti km:0+370'te 6 adet harici çökme röperi bulunmaktadır. Gövde en kesiti km:0+370'teki harici çökme röperleri Şekil 3.3'te görülmektedir. Gövde en kesiti km:0+370'teki harici çökme röper okumalarına ait eğriler EK-2'de verilmiştir. Harici çökme röperleri gövde dolgusu bittikten sonra projedeki yerlerine yerleştirilmiştir. Harici çökme röperlerine ait ilk okumalar 06.05.2008 tarihinde alınmıştır.

Bu bölümde araziden alınan harici çökme röperlerine ait okumalar Plaxis'te sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan değerlerle karşılaştırılacaktır. 2007 yılının son çeyreğinde bitirilen gövde dolgusu imalatı ile son okumanın alındığı tarih arasındaki yaklaşık iki yıl, Plaxis programında simüle edilerek elde edilen sonuçlar araziden alınan değerlerle karşılaştırılacaktır.

Dolgu imalatı bitiminden yaklaşık iki yıl sonraki ölçülen ve sonlu elemanlar yöntemiyle Plaxis'te hesaplanan düşey yer değiştirmeler, Şekil 5.44'te aynı eğride gösterilmektedir.

Yapılan analiz sonucunda hesaplanan maksimum düşey yer değiştirme -70,00 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme -60,00 mm'dir. Şekil 5.44 incelendiğinde, ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmelerin doğrultu, yön ve büyüklük olarak uyum sergilediği, ayrıca kretten mansap şevi boyunca aşağıya doğru inildikçe azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.44. Harici çökme röperlerine ait oturma-harici çökme röper numarası eğrisi

6. SONUÇ

Bu çalışmada Akköprü Barajı'nın deformasyon davranışı iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Yer değiştirmelerin ve gerilmelerin hesaplanmasında bir sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis v8.2 programı kullanılmıştır. İnşa sonrası durum için bulunan analiz sonuçları baraj gövdesinde kurulu bulunan çapraz kollu çökme ölçerlerden alınan okumalarla karşılaştırılmış, rezervuar dolum sonrası baraj davranışı, barajda henüz su tutulmadığı için karşılaştırılmalı olarak değerlendirilememiş, tahminde bulunulmuştur. Bu çalışmadan çıkarılan en önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Dolgudaki düşey yer değiştirmeler, çapraz kollu çökme ölçerlerden alınan okumalarla kayıt altına alınmaktadır. Hesaplanan ve ölçülen düşey yer değiştirmeler bir bütün olarak ele alındığında genel olarak uyumluluk söz konusudur. Hesaplanan ve ölçülen yer değiştirme değerleri arasındaki önemli farklar barajın tepe noktasına yaklaşıldıkça karşımıza çıkmaktadır. Bu farklılığın, barajın üst kısmında baraj dolgusunun sıkıştırılması için harcanan enerjinin dolgu kesiti küçüldükçe dolgunun diğer kısımlarına harcanan enerjiye oranla fazla olması nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir.

- İnşa sonrası analizde, maksimum hesaplanan düşey yer değiştirme 2700,00 mm'dir. Ölçülen maksimum düşey yer değiştirme ise 2670,00 mm'dir. Ölçülen ve hesaplanan düşey yer değiştirmeler doğrultu, yön ve büyüklük olarak uyum sergilemektedir. Ayrıca baraj gövdesindeki konumları itibariyle de uyumludurlar. Baraj dolgusu, çekirdekte bulunan kil malzemenin zamana bağlı olarak konsolidasyonu neticesinde 2007 yılının sonunda –dolgu bitim tarihi de denebilir- önceki yıllara göre en büyük oturma değerine ulaşmıştır. Bu maksimum değer baraj yüksekliğinin yaklaşık ortasında gözlemlenmiştir.

- Akköprü Barajı'nda yatay yer değiştirmeleri ölçen herhangi bir sistem kurulu değildir. İnşa sonrası analizde, maksimum yatay yer değiştirme 970,00 mm olarak hesaplanmıştır. Yatay yer değiştirmenin işareti (-)'dir yani membaya doğru hareketi temsil etmektedir. Baraj gövdesindeki konumu ise üst mansap tarafına karşılık gelmektedir.

- Barajın memba üst kısmında ise (+) işaretli yatay yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Yönleri mansaba doğru olacak şekildedir. Yatay yer değiştirmelerin bu tür davranışları benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında çalışma yapılan barajlardaki inşaat sonrası analizde ortaya çıkan davranışlarla uyum göstermektedir.

- Akköprü Barajı'nda gerilmeleri ölçmek amacıyla herhangi bir ölçüm sistemi kurulmamıştır. Dolayısıyla hesaplanan gerilmeleri gerçek değerleri ile karşılaştırma imkanımız yoktur. İnşa sonrası meydana gelen toplam, yatay ve düşey gerilmeler kretten ana kayaya inildikçe beklenildiği şekilde artmaktadır. Aynı zamanda baraj ekseni referans alınırsa eksenin memba ve mansap tarafı gerilme dağılımı açısından simetriktir. Bahsedilen gerilme davranışı benzer çalışmaların sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

- İnşa sonrası analizde kayma gerilmeleri incelendiğinde, baraj ekseninde sıfıra yakın değerler hesaplanmıştır. Ayrıca memba ve mansap tarafına gidildikçe hesaplanan değerler artmaktadır.

- Akköprü Barajı'nda henüz su tutulmamıştır. Bu çalışmada baraja su yükü uygulanarak rezervuar dolum sonrası durum için önceki çalışmalarla karşılaştırma yapılmış ve davranış hakkında tahminlerde bulunulmuştur.

- Rezervuar dolum sonrası meydana gelen maksimum düşey yer değiştirme 1860,00 mm'dir. Hesap edilen bu değere inşa sonrası düşey yer değiştirmeler dahil değildir. Maksimum düşey yer değiştirmenin meydana geldiği yer suyun temas ettiği barajın memba üst kısmıdır. Barajın mansap alt kısmının su yüklemesinden çok fazla

etkilenmeyeceği analiz sonucundan anlaşılmaktadır. Barajın bu davranışı önceki çalışmalarla benzerlik göstermektedir.

- Rezervuar dolum sonrası durum için hesaplanan toplam, düşey ve yatay gerilmeler, inşa sonrası sonrası durumdaki gibi kretten ana kayaya inildikçe artmaktadır. Rezervuar dolum sonrası durum için hesaplanan gerilmeler inşa sonrası durumla karşılaştırıldığında belirgin fark gözlemlenmektedir. Gerilmeler memba tarafında çok belirgin bir şekilde artmakta, mansap tarafında ise çok önemli bir artış gözlemlenmemektedir.

- Rezervuar dolum sonrası durumda kayma gerilmeleri incelendiğinde, su yükünden dolayı baraj, mansaba doğru öteleneceğinden memba tarafındaki negatif kayma gerilmelerinde azalma, mansap tarafında ise pozitif kayma gerilmelerinde artma beklenmektedir. Barajın bu davranışı benzer çalışmaların sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

- Araziden alınan harici çökme röperlerine ait okumalar Plaxis'te sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığında düşey yer değiştirmeler açısından doğrultu, yön ve büyüklük olarak benzerlik göstermektedir. Harici çökme röperlerine ait düşey yer değiştirmeler, kretten mansap şevi boyunca aşağıya doğru inildikçe azalmaktadır.

İki boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle inşa sonrası durum için yapılan analizin ardından elde edilen sonuçlar ile ölçümlerin ortaya koyduğu davranış arasındaki benzerlikler su tutma gibi diğer koşullarda da sonlu eleman yönteminin meydana gelecek yer değiştirme ve gerilmelerin tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, analiz sonuçları, barajın ölçüm aleti yerleştirilmemiş bölgelerindeki deformasyon ve gerilmelerin tayininde yol gösterici olabilmektedirler.

KAYNAKLAR

1. Ağıralioğlu, N., "Baraj Planlama ve Tasarımı Cilt I", ***Su Vakfı Yayınları***, İstanbul, 1-20 (2004).

2. Charles, J.A., "The Engineering Behaviour of Fill Materials and Its Influence On The Performance Of Embankment Dams", ***Dams and Reservoirs,*** 19(1): 21-33 (2009).

3. Clements, R.P., "Postconstruction Deformation of Rockfill Dams", ***J. of Geotech . Eng.***, 110(7): 821-840 (1984).

4. Clough, R.W.,Woodward, R.J., "Analysis of Embankment Stresses and Deformations", ***J. of Soil Mech. and Foud. Div.*** 93(SM4): 529-549 (1967).

5. Dascal, O., "Postconstruction Deformations of Rockfill Dams", ***Journal of Geotechnical Engineering***, 113(1): 46-59 (1987).

6. DSİ Genel Müdürlüğü, "Muğla Dalaman Projesi Akköprü Barajı Dolgu Malzemesi Zemin Deneyleri", ***DSİ,*** Ankara, 1-37 (1997).

7. DSİ Genel Müdürlüğü, "Aşağı Dalaman Projesi Akköprü Barajı Kesin Proje Aşaması Mühendislik Jeolojisi Raporu", ***DSİ,*** Aydın, 1-124 (1988).

8. Duncan, J.M., Chang, C.Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil", ***J. of Soil Mech. and Found. Div.***, 96(SM5): 1629-1653 (1970).

9. Durgunoğlu, A.T., Durgunoğlu, H.T., Erguvanlı, A., "Boşluk suyu basıncı ve ölçülmesi", ***Türkiye İnşaat Mühendisliği 6. Teknik Kongresi***, 1-18 (1972).

10. Fitzpatrick, M.D., Cole, B.A., Kinstler, F.L., Knop, B.P., "Design of Concrete-Faced Rockfill Dams", ***Proc. of the Symp. "Concrete Face Rockfill Dams: Design, Construction and Performance***, 410-434 (1985).

11. Gikas, V., Sakellariou, M., "Settlement Analysis of the Mornos Earth Dam(Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring", ***Engineering Structures***, 30: 3074-3081 (2008).

12. Gikas, V., Sakellariou, M., "Horizontal Deflection Analysis of a Large Earthen Dam by Means of Geodetic and Geotechnical Methods", ***4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering,*** Lisbon, 1-9 (2008).

13. Hunter, G., Fell, R., "Rockfill Modulus and Settlement of Concrete Face Rockfill Dams", ***J. of Geotech. Geoenv. Eng.***, 129(10): 909-917 (2003).

14. Janbu, N., "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests", ***Proc. of the European Conf. on Soil Mech. and Fond. Eng.***, Almanya, (1): 19-25 (1963).

15. Karacaoğlu, B., "Toprak ve Kaya Dolgu Baraj Ölçüm Tesisleri Rehberi, Çapraz Kollu Çökme Göstergeleri", ***DSİ Genel Müdürlüğü,*** 1-100 (1982).

16. Karacaoğlu, B., "Toprak ve Kil Çekirdekli Kaya Dolgu Baraj Ölçüm Tesisleri El Kitabı", ***DSİ Genel Müdürlüğü***, Ankara, 1-102 (1999).

17. Khalid, S., Singh, B., Nayak, G.C., Jain, O.P., "Nonlinear Analysis of Concrete Face Rockfill Dam", ***J. Geotech. Eng.***, 116(5): 822-837 (1990).

18. Kondner, R.L., "Hyperbolic Stress-Strain Response. Cohesive Soils", ***J. of Soil Mech. and Found. Div.***, 89(SM1): 115-143 (1963).

19. Kulhawy, F.H., Duncan, J.M., "Stresses and Movements in Oroville Dam", ***J. of Soil Mech. and Found. Div.***, 98(SM7): 653-665 (1972).

20. Kyrou, K., Penman, A., Artemis, C., "The first 30 years of Lefkara Dam", ***Geotechnical Engineering,*** 158(GE2): 113-122 (2005).

21. Lefebvre, G., Duncan, J.M., Wilson, E.L., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Dams", ***J. of Soil Mech. and Found. Div.***, 99(SM7): 495-507 (1973).

22. Lollina, P., Cottechia, F., Zdravkovic, L., "Numerical Analysis and Monitoring of Pappadai Dam", ***Can. Geotech. J.,*** 42: 1631-1643 (2005).

23. Nobari, E.S., Duncan, J.M., "Movements in Dams due to Reservoir Filling", ***Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth Supported Structures***, 797-815 (1972).

24. Özkuzukıran, S., "Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Oturma Davranışı: Bir Örnek Çalışma", Yüksek Lisans Tezi, ***Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-150 (2005).

25. Özkuzukıran, S., Özkan, M.Y., Özyazıcıoğlu, M., Yıldız, G.S., "Settlement Behaviour of a Concrete Faced Rockfill Dam", ***Geotech. and Geolo. Eng. J.***, 24(6): 1665-1678 (2006).

26. "Plaxis v8.2 Material Models Manual", 1-114 (2002).

27. "Atatürk Dam and Hydroelectric Power Plant Analysis of Dam Displacements-Complementary Study", Pöyry**,** ***Report***, 1-60 (2007).

28. Saboya, F.Jr., Byrne, P.M., "Parameters for Stress and Deformation Analysis of Rockfill Dams", ***Can. Geotech. J.***, 30: 690-701 (1993).

29. Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., "The Hardening Soil Model: Formulation and Verification", ***Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 Years of Plaxis***, Balkema, Rotterdam, 5-17 (1999).

30. Singh, B., Varshney, R.S., "Engineering for Embankment Dams", ***A. A. Balkema Publishers***, Brookfield, 1-55 (1995).

31. Solakoğlu, Ö., "Dolgu Barajlarda Ölçüm Sistemleri Kılavuzu", ***DSİ Genel Müdürlüğü***, Ankara, 1-49 (1983).

32. Szostak-Chrzanowski, A., Massiera, M., "Relation Between Monitoring and Design Aspects of Large Earth Dams", ***Proc. of 12th. Int. FIG Symp. On Deformation Measurements and Analysis***, Baden, 1-15 (2006).

33. Şekercioğlu, E., "Muğla Dalaman Çayı Aşağı Havzası Akköprü Barajı ve Çevresinin Jeoteknik İncelenmesi", Doktora Tezi, ***Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara, 16-28 (1989).

34. Ülgen, D., "Akköprü Barajı'nın Deprem Tepkileri ve Kalıcı Deformasyon Analizi", Yüksek Lisans Tezi, ***Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-115 (2004).

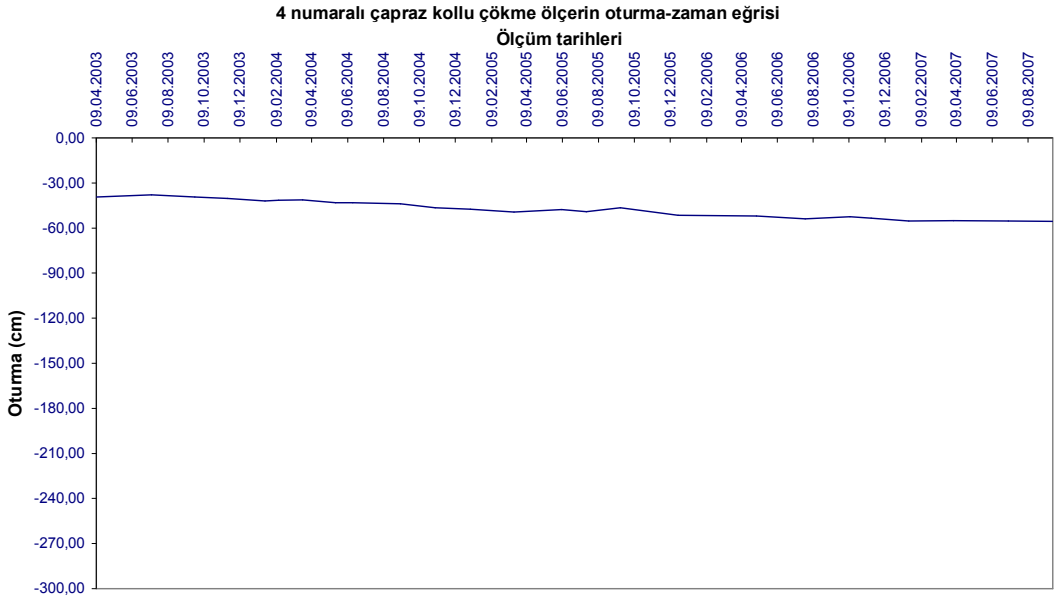
35. Ünsever, Y.S., "Ön Yüzü Asfalt Kaplı Muratlı Kaya Dolgu Barajı'nın Deformasyon Davranışı Analizi", Yüksek Lisans Tezi, ***Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-96 (2007).

36. Xing, H., Gong, X., Zhou, X., Fu, H., "Construction of Concrete-Faced Rockfill Dams with weak Rocks", ***J. of Geotech. Geoenv. Eng.***, 132(6): 778-785 (2006).

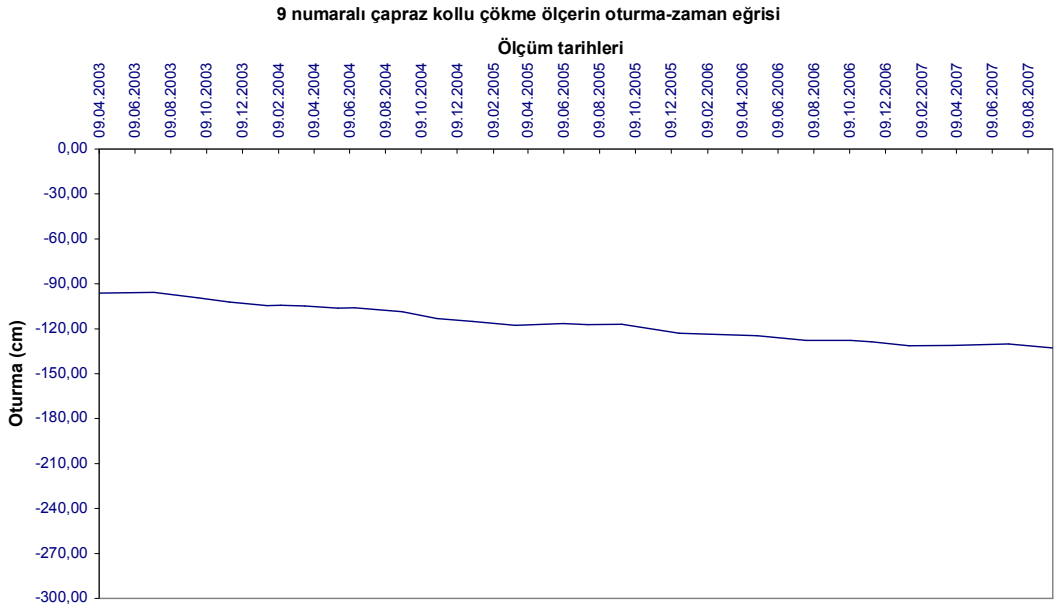
37. Zomorodian, A., Sahebzadeh, K., Ooria, A., "Effect of Number of Layers on Incremental Construction Analysis of Earth and Rockfill Dams", Technical Note, ***University of Shiraz,*** İran, 1-7 (2006).

EKLER

EK-1 Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arasındaki oturma-zaman eğrileri

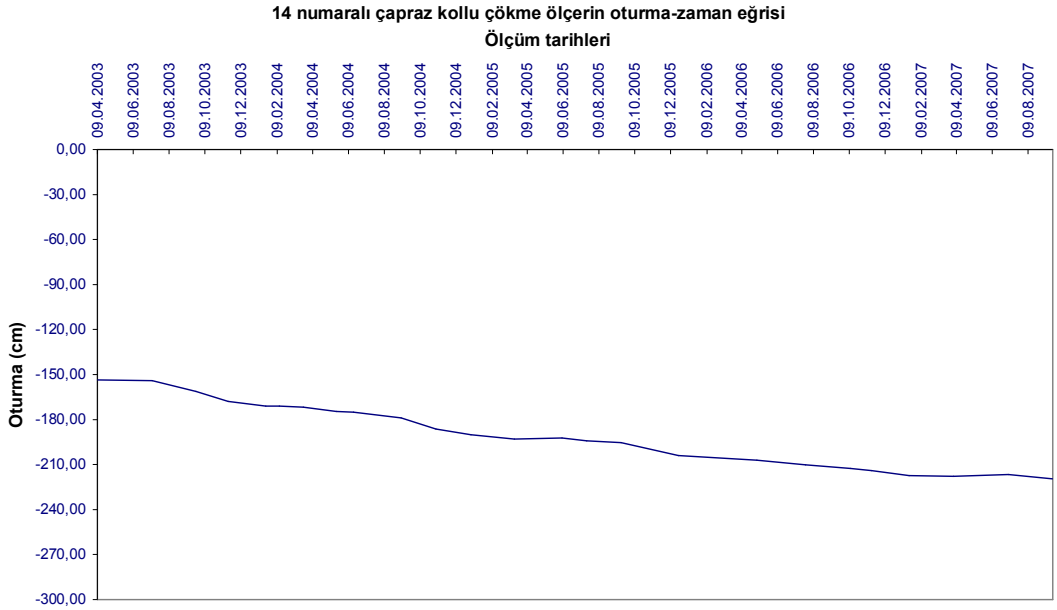


Şekil 1.1. 4 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

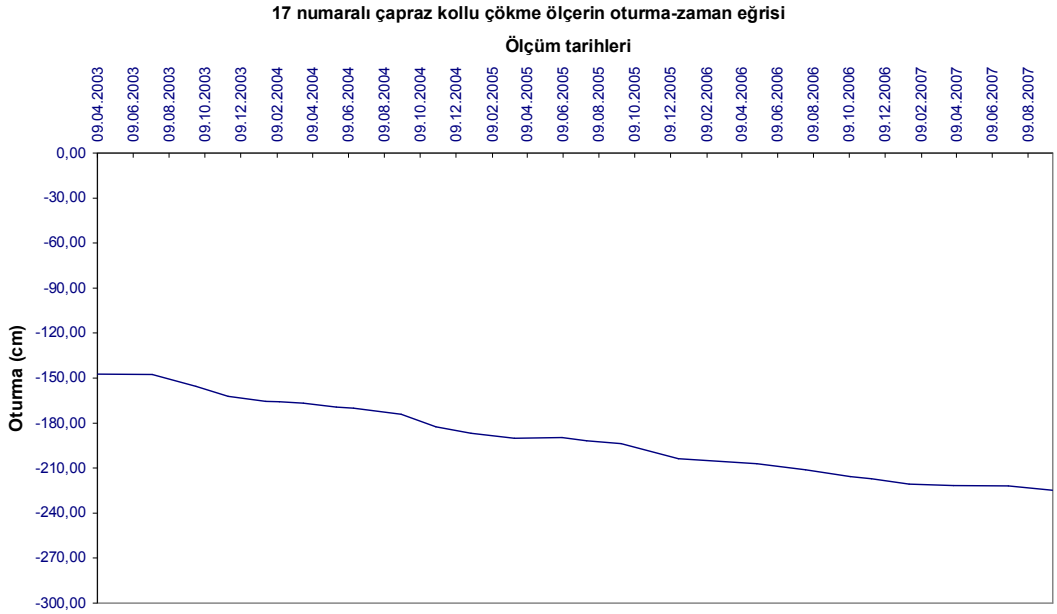


Şekil 1.2. 9 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

EK-1 (Devam) Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arasındaki oturma-zaman eğrileri

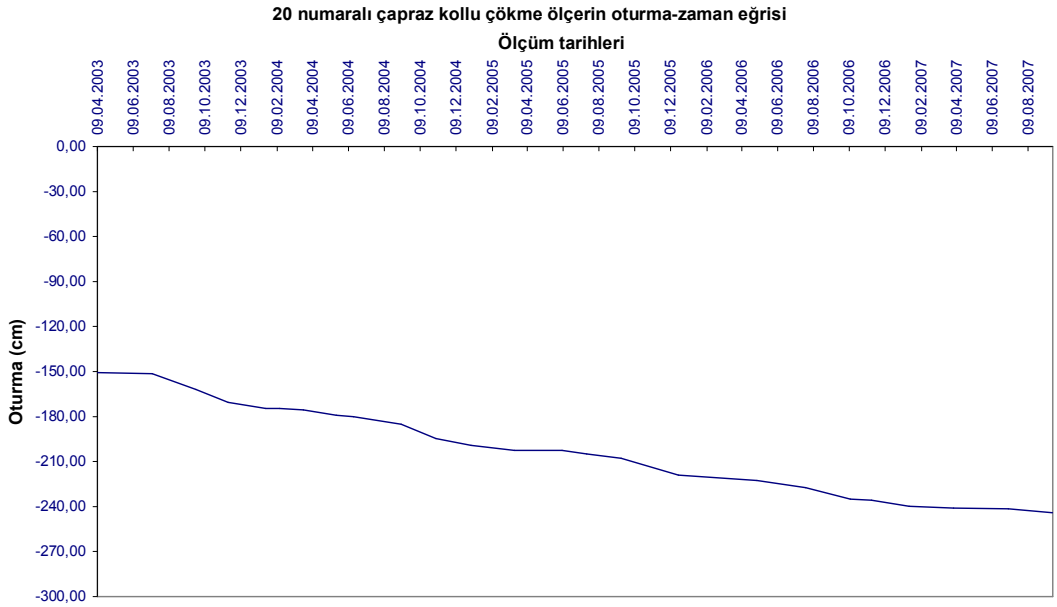


Şekil 1.3. 14 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

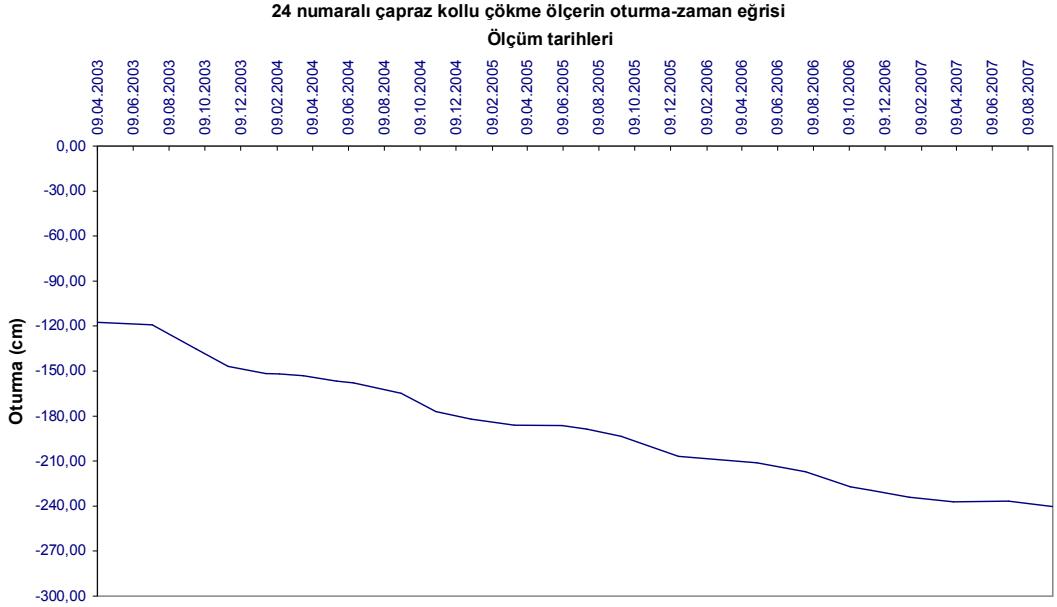


Şekil 1.4. 17 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

EK-1 (Devam) Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arasındaki oturma-zaman eğrileri

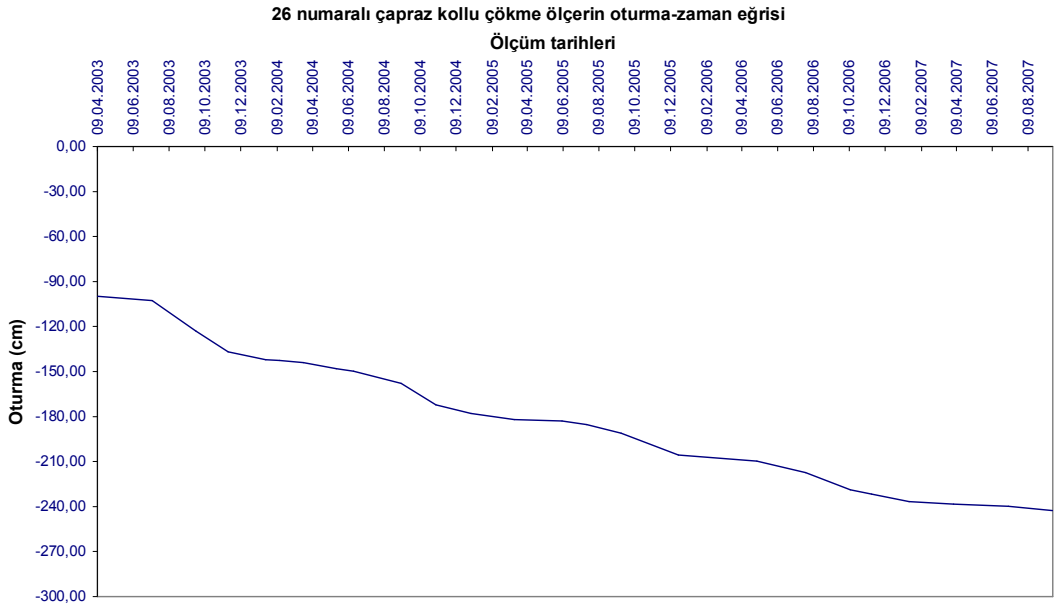


Şekil 1.5. 20 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

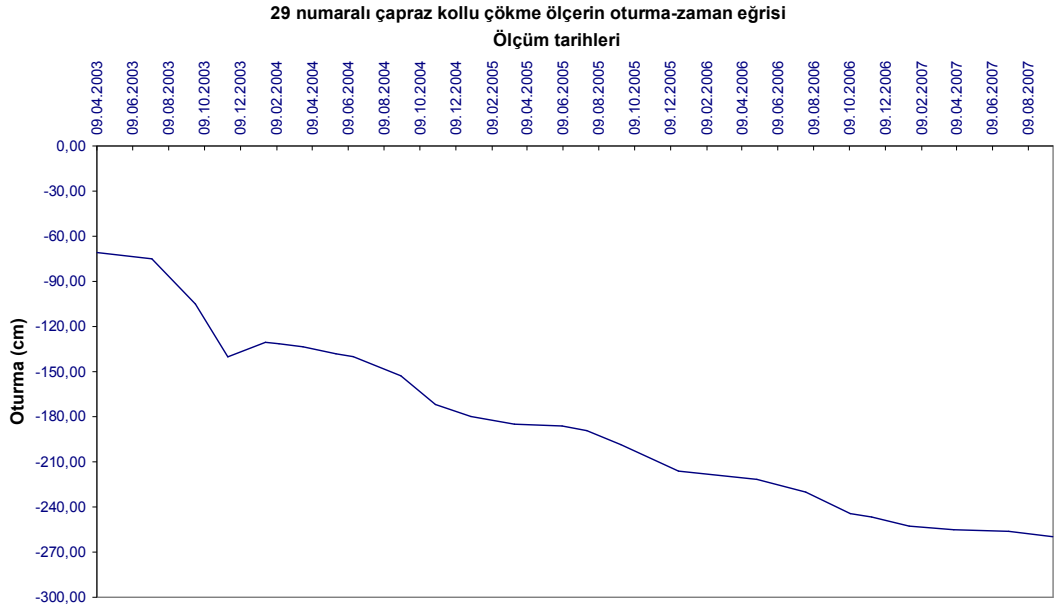


Şekil 1.6. 24 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

EK-1 (Devam) Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arasındaki oturma-zaman eğrileri

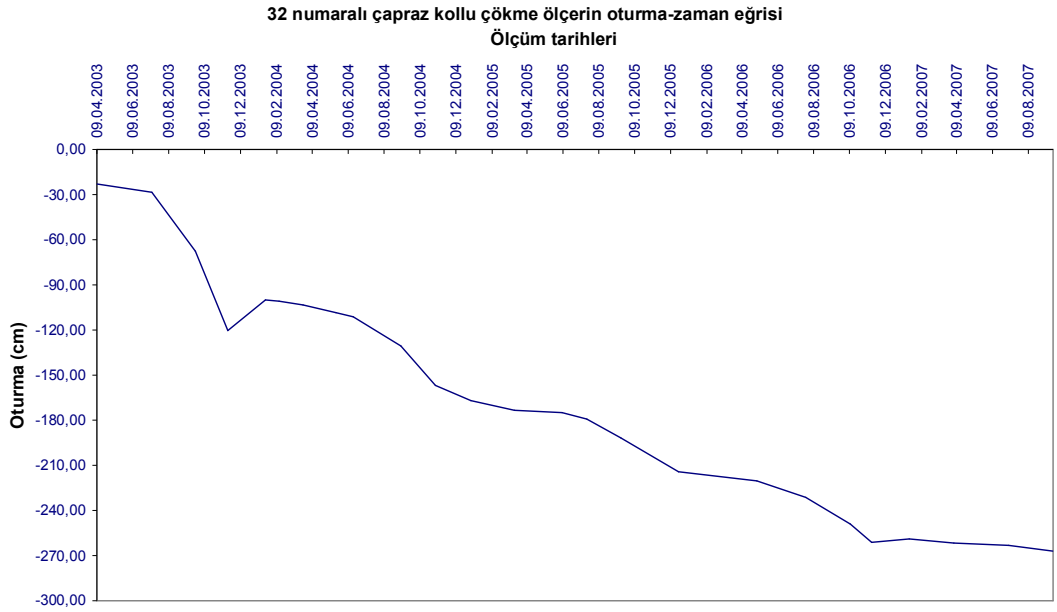


Şekil 1.7. 26 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

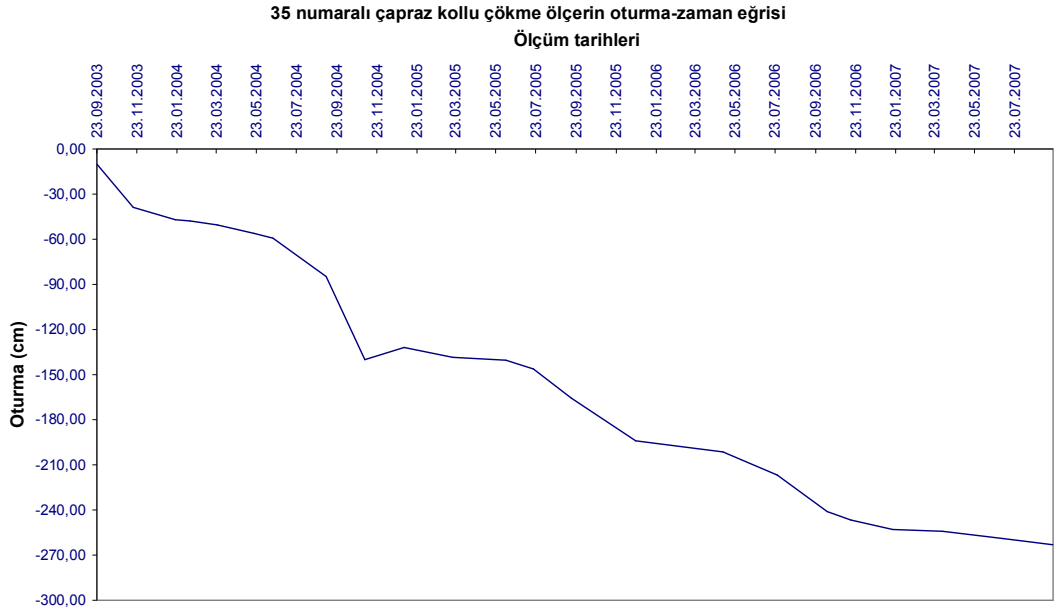


Şekil 1.8. 29 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

EK-1 (Devam) Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arasındaki oturma-zaman eğrileri

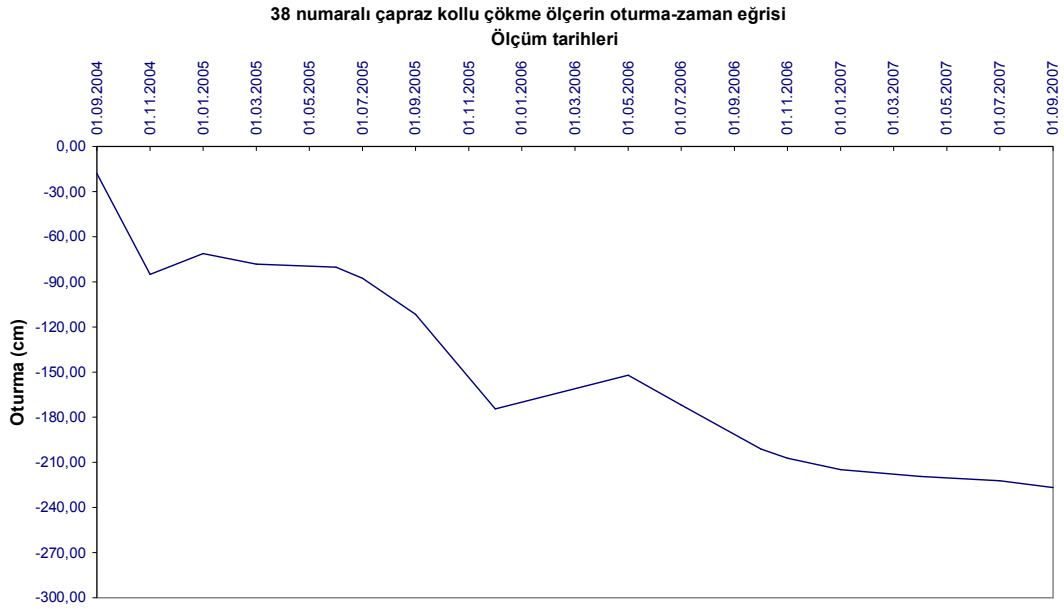


Şekil 1.9. 32 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

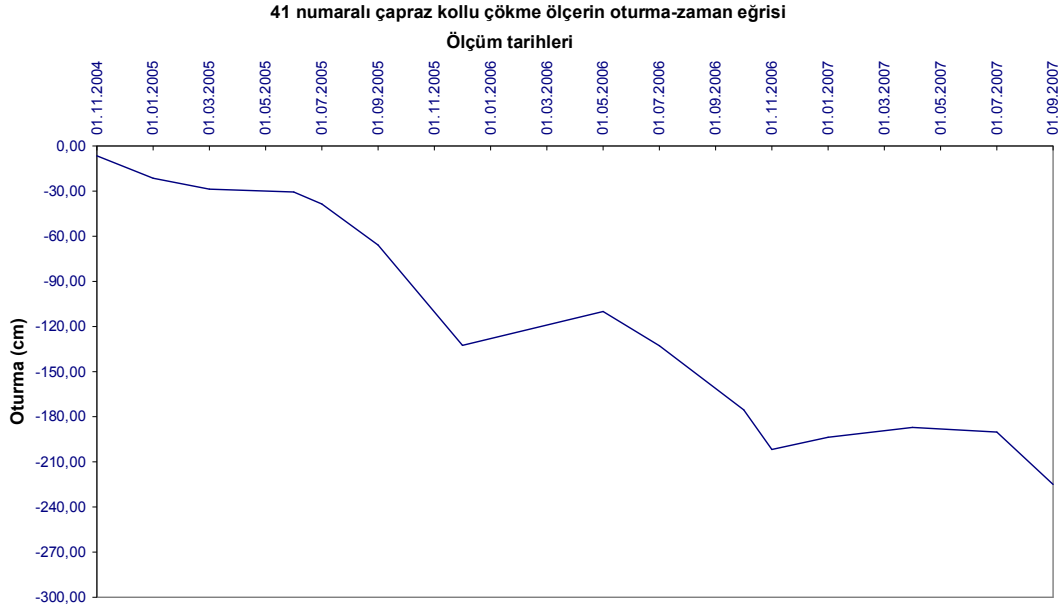


Şekil 1.10. 35 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2003-2007 arası oturma-zaman eğrisi

EK-1 (Devam) Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arasındaki oturma-zaman eğrileri

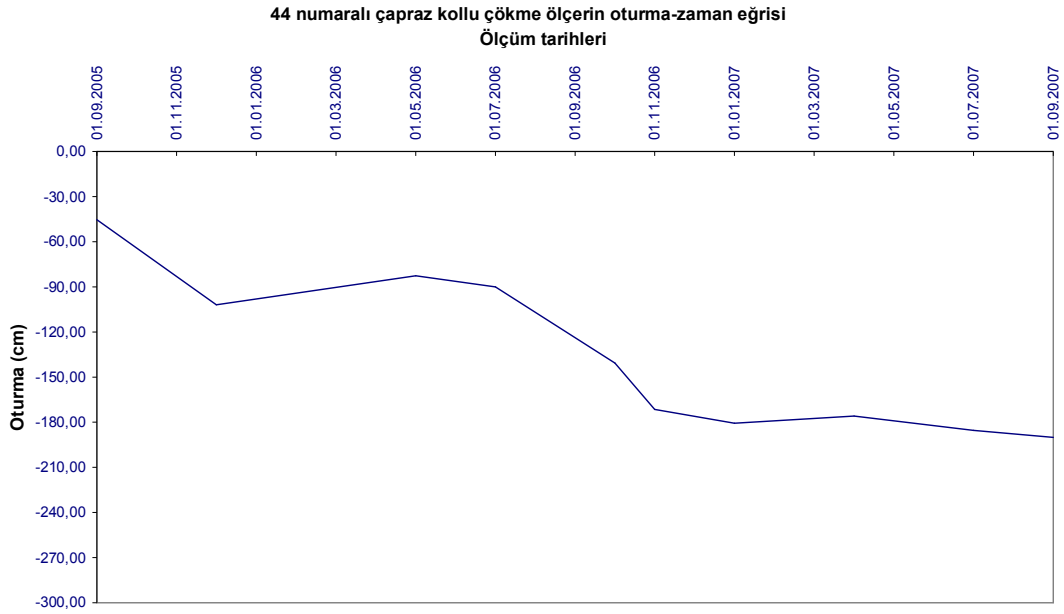


Şekil 1.11. 38 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2004-2007 arası oturma-zaman eğrisi

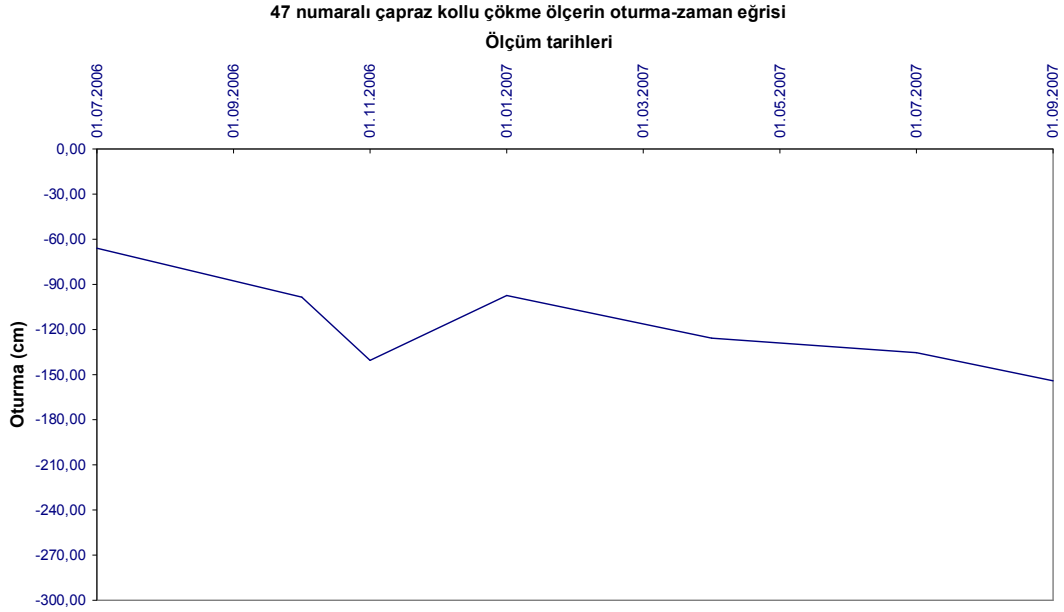


Şekil 1.12. 41 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2004-2007 arası oturma-zaman eğrisi

EK-1 (Devam) Seçilen çapraz kollu çökme ölçerlerin 2003-2007 yılları arasındaki oturma-zaman eğrileri

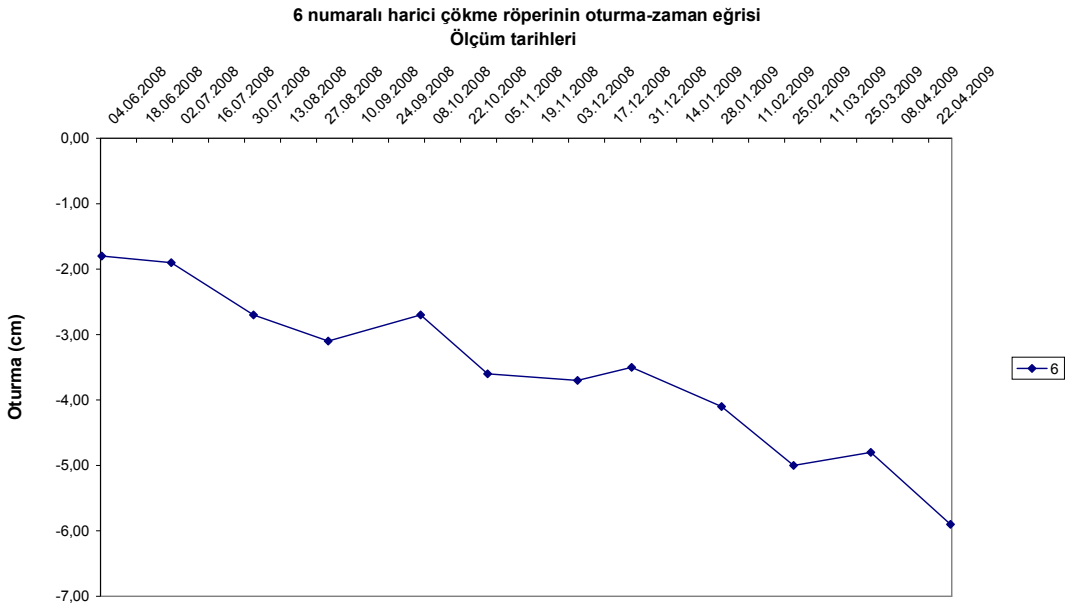


Şekil 1.13. 44 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2005-2007 arası oturma-zaman eğrisi

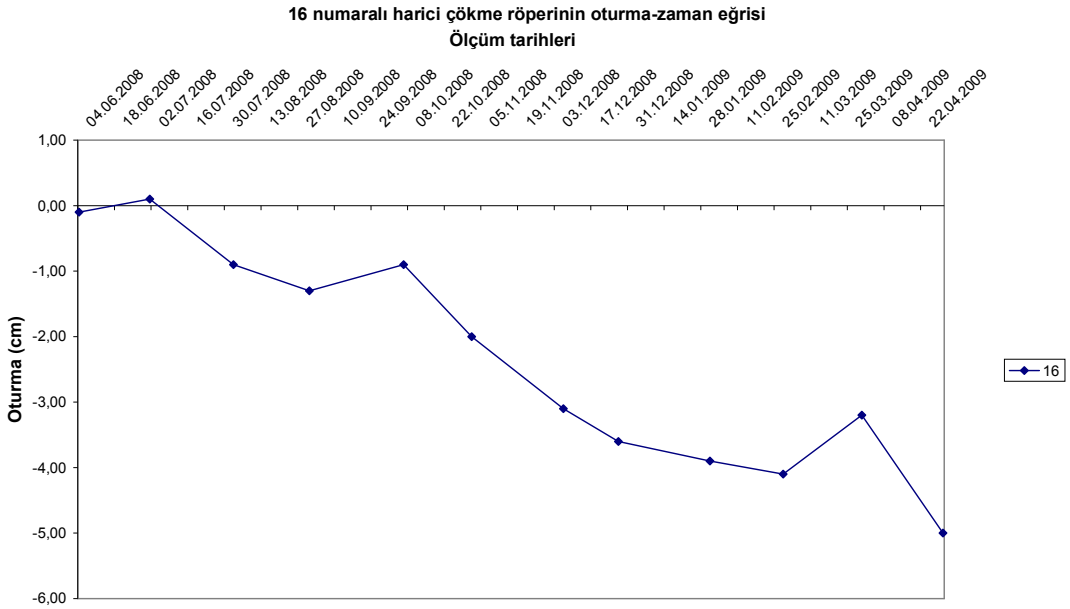


Şekil 1.14. 47 numaralı çapraz kollu çökme ölçerin 2006-2007 arası oturma-zaman eğrisi

EK-2 Akköprü Barajı gövde en kesiti km:0+370'teki harici çökme röperlerinin oturma-zaman eğrileri

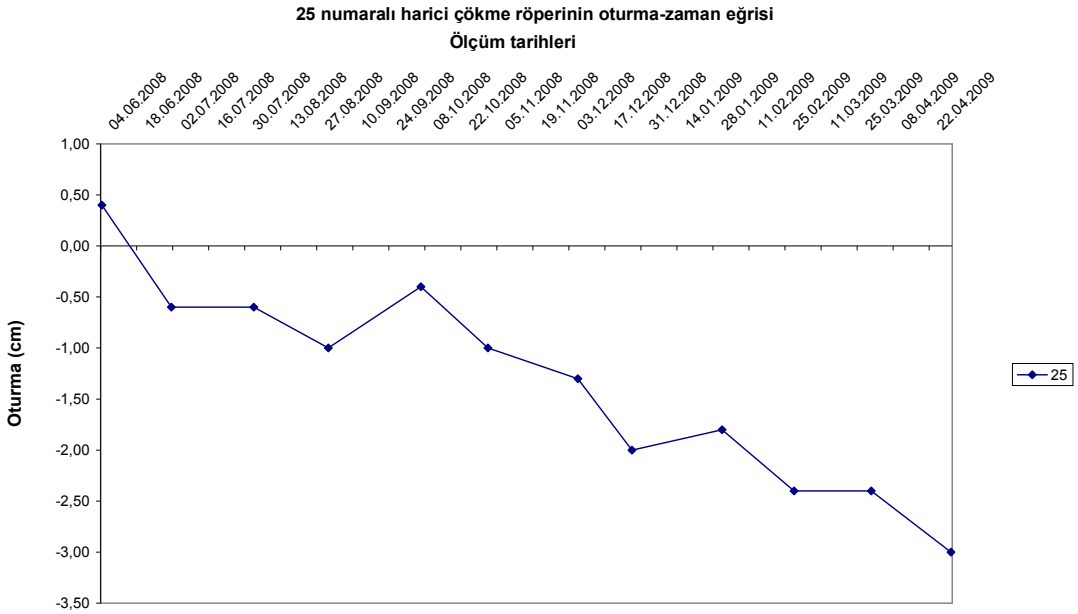


Şekil 2.1. 6 numaralı harici çökme röperinin 2008-2009 arası oturma-zaman eğrisi

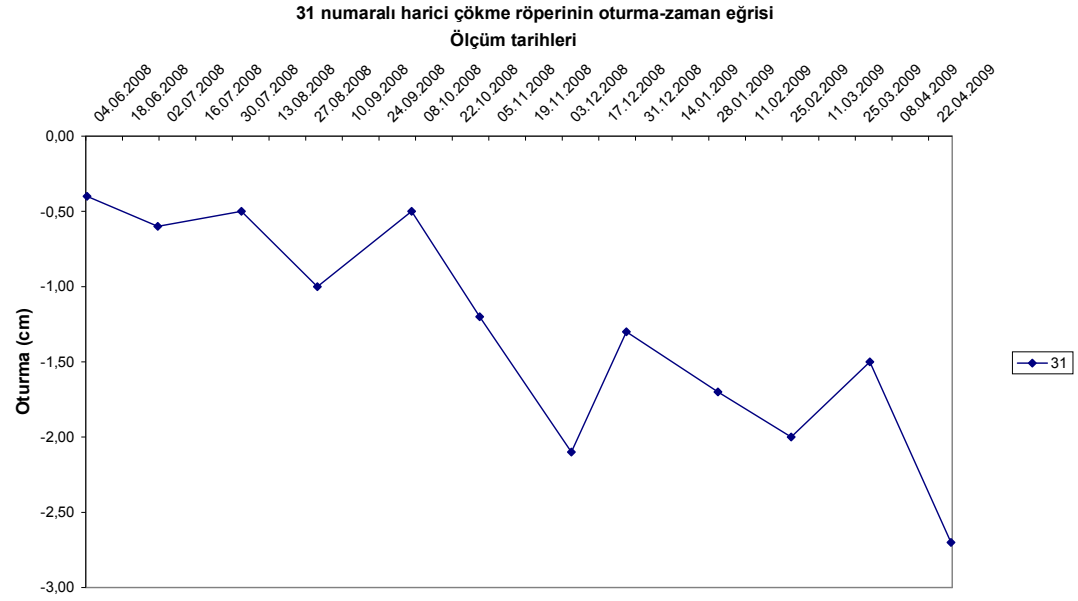


Şekil 2.2. 16 numaralı harici çökme röperinin 2008-2009 arası oturma-zaman eğrisi

EK-2 (Devam) Akköprü Barajı gövde en kesiti km:0+370'teki harici çökme röperlerinin oturma-zaman eğrileri

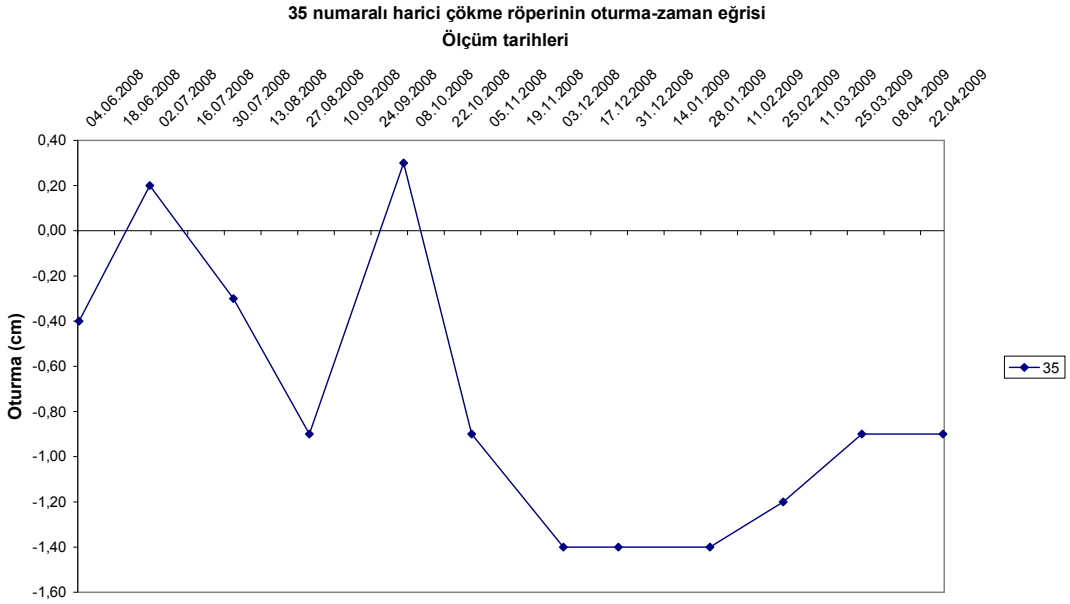


Şekil 2.3. 25 numaralı harici çökme röperinin 2008-2009 arası oturma-zaman eğrisi



Şekil 2.4. 31 numaralı harici çökme röperinin 2008-2009 arası oturma-zaman eğrisi

EK-2 (Devam) Akköprü Barajı gövde en kesiti km:0+370'teki harici çökme röperlerinin oturma-zaman eğrileri



Şekil 2.5. 35 numaralı harici çökme röperinin 2008-2009 arası oturma-zaman eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: SAK İbrahim
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 06.05.1979 Konya
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: 0 533 653 10 52
e-mail	: ibrahim081@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Selçuk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2002
Lise	Konya Meram Fen Lisesi/ Konya Gazi Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
09/2005 -	DSİ Genel Müdürlüğü	İnşaat Mühendisi
06/2004 - 09/2005	Nur İnşaat A.Ş.	Saha Mühendisi
04/2002 - 06/2002	Nur İnşaat A.Ş.	Saha Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce