

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BARAJ GÜVENLİĞİ VE DOLGU BARAJLARDA
SAYISAL ANALİZ: İKİZDERE BARAJI ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süleyman SARAYLI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik Bilim Dalı

HAZİRAN 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BARAJ GÜVENLİĞİ VE DOLGU BARAJLARDA
SAYISAL ANALİZ: İKİZDERE BARAJI ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süleyman SARAYLI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Osman SÖNMEZ

Ortak Danışman: Prof. Dr. Sedat SERT

HAZİRAN 2024

Süleyman SARAYLI tarafından hazırlanan “Baraj Güvenliği ve Dolgu Barajlarda Sayısal Analiz: İkizdere Barajı Örneği” adlı tez çalışması 24.06.2024 tarihinde aşığıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Doç. Dr. Osman SÖNMEZ (Danışman)
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Sedat SERT (Ortak Danışman)
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Emrah DOĞAN
	Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. İsa VURAL
	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Dr. Öğr. Üyesi A. İyad CEYHUNLU
	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “BARAJ GÜVENLİĞİ VE DOLGU BARAJLARDA SAYISAL ANALİZ: İKİZDERE BARAJI ÖRNEĞİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

24/06/2024

Süleyman SARAYLI

Eşime ve oğluma...

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca desteklerini ve tecrübelerini esirgemeyerek her zaman yol gösterici olan değerli danıőmanım Doç. Dr. Osman SÖNMEZ'e ve ortak danıőmanım Prof. Dr. Sedat SERT'e, yüksek lisans eğitimim boyunca üzerimde emeği olan Prof. Dr. Emrah DOğAN'a, çalıőmam kapsamında gerekli veri ve bilgi paylaşımında bulunan DSİ Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığında görevli mühendis Murat Ekrem ÇOBAN ve DSİ 21. Bölge Müdürlüğünde görevli mühendis Kemal AYDIN'a, bu zorlu sürecin her anında yanımda olarak desteğini esirgemeyen hayat arkadaőım Melike Nur SARAYLI'ya ve aileme teşekkür ederim.

Süleyman SARAYLI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET.....	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Türkiye ve Dünyada Barajlar	2
1.2. Dünyada Meydana Gelen Önemli Baraj Yıkılmaları	4
1.3. Çalışmanın Amacı ve Önemi	6
2. BARAJLARDA GÖRÜLEN YETERSİZLİKLER, BARAJ GÜVENLİĞİ VE BARAJ RİSK ANALİZİ	7
2.1. Barajlarda Tehlike, Risk ve Emniyet Kavramları	7
2.2. Barajlarda Tehlike Oluşturabilecek Durumlar ve Bu Tehlikelere Sebep Olan Yetersizlikler	9
2.2.1. Temel yetersizlikleri	13
2.2.2. Doğal yapı malzemelerinden kaynaklı yetersizlikler	13
2.2.3. Sızma	14
2.2.4. Baraj üzerinden su aşması	15
2.2.5. Dolusavak yetersizlikleri	16
2.3. Baraj Güvenliği	20
2.3.1. Devlet Su İşlerinin baraj güvenliği politikası	24
2.3.2. İnşaat aşamasında olan barajlar için yapılması gereken baraj güvenliği çalışmaları	26
2.3.3. İşletme aşamasında olan barajlar için yapılması gereken baraj güvenliği çalışmaları	27
2.3.4. Baraj güvenliği kapsamında yapılması gereken diğer çalışmalar	28
2.4. Barajlarda Risk Yönetim Süreci	29
2.4.1. Barajlarda risk analizi	30
3. BARAJLARIN İZLENMESİ VE ACİL DURUM EYLEM PLANLARI	47
3.1. Barajların Muayenesi	49
3.1.1. Barajlarda yapılan muayene türleri	50
3.1.2. Muayene öncesi yapılan hazırlıklar	50
3.1.3. Dolgu baraj gövdesinin muayenesi	50
3.2. Dolgu Barajlarda Yapılan Ölçümler ve Ölçme Aletleri	51
3.2.1. Dolgu barajlarda alınması gereken ölçümler ve kullanılan ölçüm aletleri	55

3.2.2. Kil çekirdekli toprak dolgu, homojen toprak dolgu ve kil çekirdekli kaya dolgu baraj tiplerinde kullanılan ölçüm aletleri	74
3.2.3. Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu baraj tiplerinde kullanılan ölçüm aletleri	81
3.2.4. Ölçüm aletlerinin yerleştirilme yerleri	82
3.2.5. Barajlarda denetim ve ölçüm periyodu	83
3.2.6. Barajlara ait işletme ve bakım talimatlarının hazırlanması	86
3.2.7. Acil durum hazırlık ve eylem planlaması	87
4. KULLANILAN YÖNTEM VE UYGULAMA	91
4.1. İkizdere Barajının Özellikleri	91
4.1.1. Genel bilgiler	92
4.1.2. Baraj gövdesine ait bilgiler	92
4.1.3. Baraj rezervuarına ait bilgiler	92
4.1.4. Baraj dolusavağına ait bilgiler	93
4.1.5. Baraj derivasyon tüneline ait bilgiler	94
4.1.6. Baraj dipsavak tüneline ait bilgiler	94
4.2. İkizdere Barajının Sismik Tehlike Analizi	95
4.2.1. Azalım ilişkileri	97
4.2.2. Deterministik yöntem	98
4.2.3. Olasılıksal yöntem	102
4.3. İkizdere Barajının Tehlike Sınıfının Belirlenmesi	105
4.3.1. ICOLD metoduna göre İkizdere Barajının risk sınıfı	105
4.3.2. Bureau metoduna göre İkizdere Barajının risk sınıfı	106
4.3.3. İkizdere Barajının risk sınıfının DSİ baraj emniyeti rehberi (2012)' de belirtilen yöntem kullanılarak belirlenmesi	107
4.4. Baraj Yerine Ait Jeolojik Özellikler	108
4.5. Baraj Dolgusunda Kullanılan Malzemelere Ait Mühendislik Özellikleri	110
4.6. Baraj Dolgusunda Yapılan Ölçümler ve Ölçüm Aletleri	112
4.6.1. Basınç ölçümleri	112
4.6.2. Deplasman ölçümleri	115
4.7. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı ve Baraj Sayısal Modeli	117
4.7.1. Lineer elastik zemin modeli	119
4.7.2. Mohr-Coulomb zemin modeli	119
4.7.3. Soft soil zemin modeli	119
4.7.4. Hardening soil (pekleşen) zemin modeli	119
4.8. Analiz Modelinde Kullanılan Malzemelere Ait Özellikler	120
4.9. Plaxis Paket Programında Sonlu Elemanlar Ağı	121
4.10. Modelleme ve Analiz Aşamalarında Yaşanan Zorluklar	122
4.11. Analiz Sonuçları İle Baraj Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirmeler	123
4.11.1. Röperlere ait analiz sonuçları ile baraj ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi	124
4.11.2. Piyezometrelere ait analiz sonuçları ile baraj ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi	138
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	175
KAYNAKLAR	179
EKLER	185
ÖZGEÇMİŞ	221

KISALTMALAR

AEP	: Acil durum eylem planı
AMR	: Alet merkezleme röperi
BİS	: Boşaltılacak insan sayısı
BRK	: Mansap boşaltma talepleri katsayısı
CBS	: Coğrafi bilgi sistemleri
CE	: Conformité Européenne
CORS	: Cross-origin resource sharing
DRI	: Mansap hasar riski indeksi
DSİ	: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
DŞİ	: Deprem şiddeti indeksi
EED	: Emniyet esaslı deprem
ERK	: Eskilik risk katsayısı
ESHM	: European seismic hazard model
EX	: Ekstensometre
FM	: Fay türü
GIS	: Global navigation satellite system
GLONAS	: Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema
GNSS	: Global navigation satellite systems
GPS	: Global positioning system
HES	: Hidroelektrik santral
HRK	: Hacim risk katsayısı
I	: İncinometre
ICOLD	: International commission on large dams
InSAR	: Interferometric synthetic aperture radar
İED	: İşletme esaslı deprem
JMO	: Jeoloji Mühendisleri Odası
LIDAR	: Light detection and ranging
MÖ	: Milattan önce
MPH	: Mansaptaki potansiyel hasar

MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
MTK	: Mansap tehlike katsayısı
NEHRP	: National earthquake hazards reduction program
NN	: Normal fay
ÖHİ	: Öngörülen hasar indeksi
ÖHK	: Öngörülen hasar katsayısı
PC	: Basınç hücresi
PGA	: Peak ground acceleration
PZ	: Piyezometre
RP	: Risk puanı
RS	: Ters fay
SC	: Oturma hücresi
SM	: İvme ölçer
SP	: Ölçüm noktası
SRR	: Sigorta referans röperi
SS	: Doğrultu atımlı fay
TBDY	: Türkiye bina deprem yönetmeliği
TDK	: Türk Dil Kurumu
TRK	: Toplam risk katsayısı
TS	: Sıcaklık algılayıcı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
USBR	: United States Bureau of Reclamation
W	: Üçgen savak
WL	: Su seviyesi ölçer
YRK	: Yükseklik risk katsayısı

SİMGELER

t	: Uyarı zamanı [dk]
h	: Dalga yüksekliği [m]
u	: Dalga hızı [m/sn]
M_w	: Deprem moment büyüklüğü
M_{min}	: Minimum deprem büyüklüğü
M_i	: i. deprem kaynağının moment büyüklüğü
R_i	: i. deprem kaynağının çalışma alanına uzaklığı
T_R	: Tekerrür süresi [yıl]
(V_s)₃₀	: Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı [m/sn]
(N₆₀)₃₀	: Üst 30 metredeki ortalama standart penetrasyon darbe sayısı [darbe/30cm]
(c_u)₃₀	: Üst 30 metredeki ortalama drenajsız kayma dayanımı [kPa]
R_{rup}	: Deprem odağına en yakın mesafe [km]
R_{jb}	: Deprem odağına yüzey izdüşümüne en yakın mesafe [km]
Z₁	: V _s =1 km/sn' ye kadar olan derinlik [km]
Z_{2.5}	: V _s =2.5 km/sn' ye kadar olan derinlik [km]
Z_{tor}	: Deprem odağının yüzeye olan derinliği [km]
Z_{hyp}	: Deprem odağının hiposentral derinliği [km]
Dip	: Fay düzleminin ortalama eğimi [°]
σ	: Standart sapma
km	: Kilometre
G	: Kayma modülü [kN/m ²]
E	: Elastisite modülü [kN/m ²]
ν	: Poission oranı
c	: Kohezyon [kN/m ²]
Ø	: İçsel sürtünme açısı [°]
ψ	: Dilatasyon açısı [°]
λ*	: Modifiye sıkışma indeksi
κ*	: Modifiye şişme indeksi
E₅₀^{ref}	: Sekant rijitliği [kN/m ²]

E_{oed}^{ref}	: Ödometre rijitliği [kN/m ²]
E_{ur}^{ref}	: Yeniden yükleme-boşaltma rijitliği [kN/m ²]
m	: Gerilmeye bağlı rijitlik değeri için girilen üs değer
p^{ref}	: Referans gerilme [kN/m ²]
ν_{ur}	: Yeniden yükleme-boşaltma poisson oranı
k_x	: x yönündeki permeabilite [m/gün]
k_y	: y yönündeki permeabilite [m/gün]
OCR	: Aşırı konsolidasyon oranı
γ_{sat}	: Zeminin suya doygun birim hacim ağırlığı [kN/m ³]
γ_{unsat}	: Zeminin suya doymamış birim hacim ağırlığı [kN/m ³]

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. 1936-2022 yılları arasında yapımı tamamlanan barajların belirli dönemler halinde sayıları.	2
Tablo 1.2. 2013 yılı verilerine göre en çok baraj bulunan 15 ülke ve baraj sayıları. ...	3
Tablo 1.3. 50’yi aşkın ölüm ile sonuçlanan bazı baraj yıkılmaları ve yıkılma nedenleri.	5
Tablo 2.1. Barajlarda görülen başlıca hasarlar ve yüzdeleri.	11
Tablo 2.2. ICOLD metodunda kullanılan potansiyel risk puanlaması.	32
Tablo 2.3. ICOLD Metodu toplam risk katsayısına bağlı risk sınıfları.	33
Tablo 2.4. ICOLD metodu deprem tehlike sınıfları.	33
Tablo 2.5. Bureau metoduna dayanan baraj büyüklüğü risk katsayıları.	34
Tablo 2.6. Bureau metoduna dayanan baraj eskilik derecelendirme katsayıları.	35
Tablo 2.7. Bureau metodunda verilen mansap risk katsayısı.	35
Tablo 2.8. ABD Milli Barajlar Envanterine dayanan mansap tehlike katsayıları.	36
Tablo 2.9. Bureau metodundaki baraj risk sınıfları.	37
Tablo 2.10. Baraj risk potansiyeli sınıflandırma tablosu.	38
Tablo 2.11. Toplam risk puanına bağlı risk sınıfları.	39
Tablo 2.12. Risk bölgeleri değerlendirme tablosu.	39
Tablo 2.13. Emniyet Esaslı Deprem (EED)’ in belirlenmesinde kullanılacak değerler.	45
Tablo 3.1. Aletsel ölçüm hizmetlerinde yapılacak işlemler ve alt görevleri.	52
Tablo 3.2. Mevcut dolgu barajlardan alınması tavsiye edilen ölçümler.	54
Tablo 3.3. Barajların izlenmesinde kullanılan başlıca aletler.	55
Tablo 3.4. Jeodezik yöntemler ve kullanılan alet ve donanımlar.	64
Tablo 3.5. Barajlardaki deformasyon ölçmelerinde uygulanan bazı doğruluk kriterleri.	65
Tablo 3.6. Jeodezik olmayan yöntemler ve ölçme donanımları.	69
Tablo 3.7. Ölçüm aletlerinin yerleştirilme yerleri.	82
Tablo 3.8. Muayene ve kontrol periyotları ve görevli kişiler.	83
Tablo 3.9. Barajlarda ölçü periyotları.	85
Tablo 3.10. Minimum denetim aralıkları ve baraj güvenliğinin izlenmesine yönelik gereksinimler.	85
Tablo 3.11. Dolgu barajlarda kullanılan ölçüm cihazlarının izlenme periyotları.	86
Tablo 4.1. Azalım ilişkilerine ait parametre sınırları.	98
Tablo 4.2. L-1 çizgisel kaynağı deterministik hesap sonuçları.	99
Tablo 4.3. L-2 çizgisel kaynağı deterministik hesap sonuçları.	99
Tablo 4.4. L-3 çizgisel kaynağı deterministik hesap sonuçları.	100
Tablo 4.5. L-4 çizgisel kaynağı deterministik hesap sonuçları.	100
Tablo 4.6. L-1, L-2, L-3 ve L-4 çizgisel kaynaklarına ait deterministik hesap sonuçları.	100
Tablo 4.7. L2 çizgisel kaynağı için hesaplanan tasarım spektrum değerleri.	101
Tablo 4.8. Çeşitli aşılma olasılıklarına karşılık gelen ivme değerleri.	103

Tablo 4.9. ICOLD metoduna göre yapı etkisi puanlaması.....	106
Tablo 4.10. ICOLD metoduna göre mansap etkisi puanlaması.....	106
Tablo 4.11. Bureau metoduna göre yapı etkisi puanlaması.....	106
Tablo 4.12. Bureau metoduna göre mansap etkisi puanlaması.....	106
Tablo 4.13. DSİ Baraj Emniyeti Rehberi (2012)' de belirtilen yöntem kullanılarak yapı etkisinin puanlaması.....	107
Tablo 4.14. DSİ Baraj Emniyeti Rehberi (2012)' de belirtilen yöntem kullanılarak mansap etkisinin puanlaması.....	107
Tablo 4.15. İkizdere Barajının risk sınıfları.....	108
Tablo 4.16. Jeolojik planlama raporuna göre sondajlara ait geçirimsizlik katsayıları.....	109
Tablo 4.17. Dolguda kullanılan malzeme zonları ve temin edildikleri sahalar.....	110
Tablo 4.18. İkizdere Barajına su basıncı ölçümü amacıyla yerleştirilmiş olan ölçüm aletlerinin yerleşim kotu ve baraj eksenine olan mesafeleri.....	112
Tablo 4.19. İkizdere Barajına yerleştirilmiş olan röperlere ait yerleşim kotu ve baraj eksenine olan mesafeleri.....	115
Tablo 4.20. Analiz modelinde kullanılan malzemelere ait parametreler.....	121
Tablo 4.21. R3, R4 ve R5 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.....	124
Tablo 4.22. R9, R10 ve R11 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.....	125
Tablo 4.23. R15, R16 ve R17 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.....	126
Tablo 4.24. R20, R21 ve R22 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.....	128
Tablo 4.25. R25, R26 ve R27 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.....	129
Tablo 4.26. R28 ve R29 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.....	130
Tablo 4.27. R3, R4 ve R5 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.....	131
Tablo 4.28. R9, R10 ve R11 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.....	132
Tablo 4.29. R15, R16 ve R17 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.....	133
Tablo 4.30. R20, R21 ve R22 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.....	135
Tablo 4.31. R25, R26 ve R27 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.....	136
Tablo 4.32. R28 ve R29 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.....	137
Tablo 4.33. P29 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	138
Tablo 4.34. P15 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	139
Tablo 4.35. P1 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	141
Tablo 4.36. P30 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	142

Tablo 4.37. P31 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.	143
Tablo 4.38. P2, P16 ve P32 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	144
Tablo 4.39. P3, P17 ve P33 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	145
Tablo 4.40. P4, P18 ve P34 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	147
Tablo 4.41. P5, P19 ve P35 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	149
Tablo 4.42. P6, P20 ve P36 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	150
Tablo 4.43. P7 ve P21 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	152
Tablo 4.44. P37 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.	153
Tablo 4.45. P8, P22 ve P38 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	154
Tablo 4.46. P9 ve P23 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	156
Tablo 4.47. P39 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.	157
Tablo 4.48. P10, P24 ve P40 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	158
Tablo 4.49. P11, P25 ve P41 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	160
Tablo 4.50. P12, P26 ve P42 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	161
Tablo 4.51. P13, P27 ve P43 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	163
Tablo 4.52. P14, P28 ve P44 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	164
Tablo 4.53. T3 ve T5 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	166
Tablo 4.54. T1 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.	167
Tablo 4.55. T4 ve T6 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	168
Tablo 4.56. T2 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.	169
Tablo 4.57. W3 su basıncı ölçerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.	171
Tablo 4.58. W1 ve W2 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.....	172

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. 1936-2022 yılları arasında yapımı tamamlanan barajların yıllara göre sayılarının kümülatif değişim grafiği.	2
Şekil 1.2. Barajların gövde türlerine göre sayıları ve yüzde dağılımları.	4
Şekil 2.1. Tehlike, ihtimal ve emniyet arasındaki bağıntının şeması.	8
Şekil 2.2. Tehlike ile risk arasındaki bağıntının şeması.	9
Şekil 2.3. Barajlarda görülen yetersizlikler.	10
Şekil 2.4. Beton barajlarda yıkılma nedenlerine ait yüzde grafiği.	11
Şekil 2.5. Dolgu barajlarda yıkılma nedenlerine ait yüzde grafiği.	12
Şekil 2.6. Bütün baraj türlerinde yıkılma nedenlerine ait yüzde grafiği.	12
Şekil 2.7. Barajlarda doğal yapı malzemesi kaynaklı oluşan yetersizliğe neden olabilecek durumlar.	13
Şekil 2.8. Kaya dolgu dikdörtgen kil çekirdekli bir barajda sızma çizgisi.	15
Şekil 2.9. Baraj üzerinden su aşmasına neden olabilecek durumlar.	15
Şekil 2.10. Dolusavakta yetersizliğe neden olabilecek durumlar.	17
Şekil 2.11. Baraj güvenliği için alınabilecek önlemler.	24
Şekil 2.12. DSİ tarafından baraj güvenliği konusunda hayata geçirilmiş olan çalışmalar.	25
Şekil 2.13. DSİ'nin baraj emniyeti politikasının temel ilkeleri.	26
Şekil 2.14. Baraj emniyeti çalışma programının kapsamı.	26
Şekil 2.15. Barajlarda risk yönetim süreci.	29
Şekil 2.16. Barajlarda riskin azaltılması yöntemleri.	29
Şekil 2.17. Farklı baraj türleri için öngörülen hasar indeksi.	36
Şekil 2.18. Barajlarda deprem tehlikesi hesap şeması.	41
Şekil 2.19. Deterministik sismik tehlike analizi aşamaları.	43
Şekil 2.20. Olasılıksal sismik tehlike analizi aşamaları.	44
Şekil 3.1. Baraj ölçüm sistematigi.	53
Şekil 3.2. Ani su inmesi neticesinde gerilme durumu.	57
Şekil 3.3. Barajlarda oturmalar sonucu oluşan deformasyonlar.	57
Şekil 3.4. Dolgu barajlarda yatay deformasyonların genel dağılımı.	60
Şekil 3.5. Bir dolgu barajda en büyük kesit boyunca oluşan hareketler.	60
Şekil 3.6. Baraj eksenini boyunca oluşan hareketler.	61
Şekil 3.7. Jeodezik yöntemle deformasyon izleme ağı.	64
Şekil 3.8. CORS-TR istasyonları.	66
Şekil 3.9. LIDAR teknolojisi.	67
Şekil 3.10. InSAR teknolojisi.	67
Şekil 3.11. Yersel InSAR ile baraj gövdesinin taranması.	68
Şekil 3.12. Baraj gövdesindeki deformasyonlar.	68
Şekil 3.13. Toprak ve kaya dolgu barajlarda ölçüm aletleri.	74
Şekil 3.14. Piyezometre.	75
Şekil 3.15. Piyezometre okuma formu.	75
Şekil 3.16. Basınç hücresi.	76

Şekil 3.17. Toplam basınçölçer okuma formu.	76
Şekil 3.18. Toplam basınçölçer okuma sonuçlarına ait örnek grafik.	77
Şekil 3.19. Ekstensometre.	77
Şekil 3.20. Ekstensometre okuma formu.	77
Şekil 3.21. Su basınçölçer okuma formu.	78
Şekil 3.22. İnklinometre.	78
Şekil 3.23. Oturma hücresi.	79
Şekil 3.24. Harici çökme röperi.	79
Şekil 3.25. DSİ röper tipleri.	80
Şekil 3.26. Önyüzü beton kaplı kaya dolgu baraj tipinde kullanılan ölçüm aletleri. .	81
Şekil 3.27. Hidrolik çökme ölçer okuma formu.	82
Şekil 3.28. İşletme evresinde bağlı ölçüler için ölçü programı.	84
Şekil 3.29. Bakım ve onarım çalışmalarının aşamaları.	86
Şekil 3.30. Acil durum hazırlığı.	89
Şekil 4.1. İkizdere Barajının yeri.	91
Şekil 4.2. İkizdere Barajına ait fotoğraf.	92
Şekil 4.3. Rezervuar alanına ait 30.01.2023 tarihli fotoğraf.	93
Şekil 4.4. İkizdere Barajının dolusavağı.	94
Şekil 4.5. İkizdere Barajı ve çevresindeki faylar.	95
Şekil 4.6. NEHRP (2003) kriterlerine göre $(V_s)_{30}$ kayma dalgası hızına bağlı olarak zeminlerin sınıflandırılması.	97
Şekil 4.7. TBDY 2018 kriterlerine göre $(V_s)_{30}$ kayma dalgası hızına bağlı olarak zeminlerin sınıflandırılması.	97
Şekil 4.8. Deterministik yöntemde İkizdere Barajının faylara olan mesafeleri.	99
Şekil 4.9. L2 çizgisel kaynağı için hesaplanan tasarım spektrum grafiği.	101
Şekil 4.10. Baraj sahasını merkez alan 150 km yarıçapında bölge içerisine giren alan kaynaklar.	102
Şekil 4.11. A-9 alansal kaynağı depremlerine ait magnitüd-oluşum sayısı grafiği.	102
Şekil 4.12. İkizdere barajı için 144, 475, 975 ve 2475 yıllık periyotlarda tasarım spektrum grafiği.	103
Şekil 4.13. AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından 475 yıllık geri dönüş periyodu için elde edilen PGA değeri.	104
Şekil 4.14. AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından 2475 yıllık geri dönüş periyodu için elde edilen PGA değeri.	104
Şekil 4.15. İkizdere Barajı baraj yeri ve dolayının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti.	109
Şekil 4.16. Dolguda kullanılan malzemelerin temin edildiği sahalara ait bulduru haritası.	110
Şekil 4.17. İkizdere Barajında kullanılan malzemeler ve kullanıldıkları kısımlar... ..	111
Şekil 4.19. İkizdere Barajına ait baraj emniyeti ve ölçüm tesisi odası.	113
Şekil 4.20. 01.03.2023 tarihli piyezometre ölçümleri.	114
Şekil 4.18. Piyezometrelerin baraj üzerindeki konumları.	114
Şekil 4.21. R9 röperine ait fotoğraf.	115
Şekil 4.22. Röperlerin baraj üzerindeki konumları.	116
Şekil 4.23. R11, R17 R20, R22, R26 ve R28 röperlerinin orijinal veri ve düzenlenmiş verilerine ait grafikler.	117
Şekil 4.24. B3, B4 ve B5 kesitlerine ait geometrik model.	118
Şekil 4.25. Drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucu elde edilen hiperbolik gerilme-deformasyon ilişkisi.	120
Şekil 4.26. B3, B4 ve B5 kesitleri için oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı.	123

Şekil 4.27. R3, R4 ve R5 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.	124
Şekil 4.28. R9, R10 ve R11 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.	126
Şekil 4.29. R15, R16 ve R17 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.	127
Şekil 4.30. R20, R21 ve R22 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.	128
Şekil 4.31. R25, R26 ve R27 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.	129
Şekil 4.32. R28 ve R29 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.	130
Şekil 4.33. R3, R4 ve R5 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.	132
Şekil 4.34. R9, R10 ve R11 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.	133
Şekil 4.35. R15, R16 ve R17 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.	134
Şekil 4.36. R20, R21 ve R22 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.	135
Şekil 4.37. R25, R26 ve R27 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.	137
Şekil 4.38. R28 ve R29 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.	138
Şekil 4.39. P29 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.	139
Şekil 4.40. P15 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.	140
Şekil 4.41. P1 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.	141
Şekil 4.42. P30 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.	142
Şekil 4.43. P31 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.	144
Şekil 4.44. P2, P16 ve P32 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	145
Şekil 4.45. P3, P17 ve P33 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	147
Şekil 4.46. P4, P18 ve P34 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	148
Şekil 4.47. P5, P19 ve P35 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	150
Şekil 4.48. P6, P20 ve P36 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	151
Şekil 4.49. P7 ve P21 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	153
Şekil 4.50. P37 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.	154
Şekil 4.51. P8, P22 ve P38 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	155
Şekil 4.52. P9 ve P23 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	157
Şekil 4.53. P39 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.	158
Şekil 4.54. P10, P24 ve P40 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	159

Şekil 4.55. P11, P25 ve P41 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	161
Şekil 4.56. P12, P26 ve P42 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	162
Şekil 4.57. P13, P27 ve P43 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	164
Şekil 4.58. P14, P28 ve P44 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	165
Şekil 4.59. T3 ve T5 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	167
Şekil 4.60. T1 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği... ..	168
Şekil 4.61. T4 ve T6 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	169
Şekil 4.62. T2 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği... ..	170
Şekil 4.63. W3 su basıncı ölçerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.	171
Şekil 4.64. W1 ve W2 su basıncı ölçerlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.	173

BARAJ GÜVENLİĞİ VE DOLGU BARAJLARDA SAYISAL ANALİZ: İKİZDERE BARAJI ÖRNEĞİ

ÖZET

Su, yaşam için vazgeçilmez bir kaynaktır. Nüfus artışı ve sanayinin gelişmesiyle doğanın dengesi bozulmuş, su ve enerji ihtiyacı artmıştır. Sınırlı su kaynaklarına sahip ülkelerde barajlar inşa edilerek su temini, elektrik üretimi ve taşkınlardan korunma sağlanmaktadır. Ancak, barajlarda yaşanabilecek mühendislik problemleri nedeniyle yıkılma riskleri ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, barajlardaki yetersizliklerin tespit edilerek önlemlerin alınması önemlidir. Mevcut barajların güvenilirlik seviyelerinin belirlenmesi ve gerekli risk-güvenlik çalışmalarının yapılması da gereklidir. Son yıllarda, hızla gelişen baraj yapım teknolojileriyle daha yüksek hacimli barajlar inşa edilmektedir, ancak bu barajların yıkılması durumunda büyük can ve mal kaybına neden olabileceği unutulmamalıdır.

Barajların sağlam, güvenli ve ekonomik olabilmeleri için kaliteli planlama ve projelendirme, kaliteli inşaat, iyi bir koordinasyon, sağlıklı bilgi akışı sağlayan baraj ölçüm tesisleri ile barajın gerçek zamanda gözlemlenmesi, iyi bir baraj işletimi ve tüm durumların göz önüne alındığı acil durum eylem planı hususlarının bir arada olması gerekmektedir.

Son teknoloji ve bilgiler kullanılarak inşa edilen barajlar dahi risklere maruz kalabilmektedir. Bu nedenle, barajdaki riskleri azaltmak için gerekli tedbirlerin hızlı bir şekilde alınması gerekmektedir. Sürekli izleme, periyodik muayeneler ve güvenlik değerlendirmeleri ile barajın davranışı ve yapısal güvenliği kontrol edilerek riskler tespit edilebilmektedir. Ölçüm sistemleri, barajlardaki problemleri zamanında tespit ederek önlemlerin alınmasında kullanılmaktadır. Bu sayede, baraj projelerinin performansı denetlenebilmekte ve yapılan hatalardan ders çıkarılabilmektedir. Barajların güvenliği için yaşanan sorunların belirlenmesi ve yeni projelerde dikkate alınması baraj güvenliği açısından çok önemlidir. ICOLD (International Commission on Large Dams) tarafından 2001 yılında yapılan araştırmada, baraj problemlerinin genellikle zamanında yapılmayan ölçümlerden ve gözlem eksikliklerinden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Barajların mevcut durumda güvenli olup olmadığının izlenmesinin yanı sıra, potansiyel tehlikeler karşısında davranışlarının değerlendirilmesi baraj güvenliğinin yönetilmesinde önemli bir adımdır. Barajların toplam risk faktörünü belirlemek için baraj özelliklerini farklı yönlerden inceleyen çeşitli sistematik yaklaşımlar vardır. Barajların tehlike sınıflarını belirleme kriterlerinde kullanılan yaklaşımlar arasında farklılıklar bulunsa da, literatürdeki tüm yaklaşımlar, barajın yıkılması durumunda kontrolsüz bir şekilde hareket edebilecek su kütlelerinin baraj mansabında bulunan insanlara yönelik potansiyel tehditleri ön planda tutarken, olası ekonomik ve çevresel kayıpları ikinci planda tutmaktadır.

Barajlarda gözlem, muayene ve ölçümler belirli bir program dâhilinde yapılmakta ve yapılacak olan ölçümler baraj tipine ve özelliklerine göre değişiklik göstermektedir.

Barajlarda yapılan ölçümler genel itibariyle yatay ve düşey deformasyon ölçümleri, sızıntı ölçümleri, basınç ve gerilme ölçümleri, sismik hareket ölçümleri, yağış ölçümleri, su seviyesi ölçümleri, yapı elemanlarına etki eden yüklerin ölçülmesi, çevresel faktör ölçümleri ve sıcaklık ölçümleri olarak sıralanabilir.

Acil durum eylem planı (AEP), barajın güvenliğini etkileyen acil veya beklenmedik durum ortaya çıktığında kimin, ne zaman, nerede ne yapacağını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Baraj için veya barajdan kaynaklı acil bir durum ortaya çıktığında, önceden hazırlanmış olan acil durum eylem planı derhal devreye sokulmalıdır. Acil durum eylem planında, alınması gereken önlemlerin önceden belirlenmesi, gerekli hazırlıkların ve gerekli denemelerin yapılması çok önemlidir. Ayrıca acil durum eylem planlarının etkili olabilmesi için etkilenecek olan vatandaşlar da planlamaya dâhil edilmeli ve acil durum esnasında nasıl davranacağı konusunda bilgilendirilmelidir. Acil durum eylem planları, barajın güvenliğini etkileyen acil ve beklenmedik durumların ardından ve düzenli olarak güncellenmelidirler. Acil durumda haberleşme çok önemli bir konudur. Acil durum eylem planının bilgilendirme akış şeması, “acil durumu belirleme, değerlendirme ve sınıflama, sorumlular, hazırlıklar, taşkın haritaları ve ekler” olmak üzere 6 temel unsuru bulundurmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, baraj güvenliği, dolgu barajlarda gözlenen yetersizlikler ve nedenleri, dolgu barajların muayenesi, dolgu barajlarda kullanılan ölçüm aletleri, muayene ve ölçüm periyotları konularından bahsedilmiş, İncirliova ilçesinde bulunan ve merkezi kil çekirdek, memba kum-çakıl, mansap kaya dolgu baraj türünde inşa edilen İkizdere Barajının risk sınıfı literatürde kabul görmüş olan 3 farklı yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bunun yanında barajın Plaxis sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulmuş modelleri üzerinde analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilmiş olan sonuçlar baraja ait ölçüm verileriyle karşılaştırılarak yorumlar ve değerlendirmeler yapılmış, ayrıca barajın modelleme ve analiz sürecinde yaşanan zorluklar belirtilerek yeni yapılacak barajların analizlerine yönelik tavsiyelerde bulunulmuştur.

DAM SAFETY AND NUMERICAL ANALYSIS OF EMBANKMENT DAMS: THE CASE STUDY OF IKIZDERE DAM

SUMMARY

Water is an indispensable resource for life. With the increase in population and industry development, the balance of nature has been disturbed, and the need for water and energy has increased. In countries with limited water resources, dams are built to provide water supply, electricity generation, and flood protection. However, risks of collapse may arise due to engineering problems in dams. Therefore, it is essential to identify dam inadequacies and take precautions. Determining existing dams' reliability levels and carrying out crucial risk-safety studies is also necessary. In recent years, higher-volume dams have been constructed with rapidly developing dam construction technologies. Still, it should not be forgotten that these dams may cause significant loss of life and property in case of collapse.

For dams to be robust, safe, and economical, quality planning and design, quality construction, good coordination, real-time monitoring of the dam with dam measurement facilities that provide healthy information flow, good dam operation, and an emergency action plan that takes into account all situations must be together.

Even dams constructed using the latest technology and information can be exposed to risks. Therefore, necessary measures must be taken quickly to reduce the risks in the dam. Risks can be identified by checking the behavior and structural safety of the dam through continuous monitoring, periodic inspections, and safety assessments. Measurement systems are used to detect problems in dams and take precautions promptly. In this way, the performance of dam projects can be monitored, and lessons can be learned from mistakes. It is essential for dam safety to identify the problems experienced for the safety of dams and to consider them in new projects. A study conducted by ICOLD (International Commission on Large Dams) in 2001 determined that untimely measurements and lack of observations generally cause dam problems.

In addition to monitoring whether dams are currently safe, assessing their behavior in the face of potential hazards is essential in managing dam safety. There are various systematic approaches to determining the total risk factor of dams, which analyze dam characteristics from different aspects. Although there are differences between the methods used in the criteria for determining the hazard classes of dams, all approaches in the literature prioritize the potential human threats downstream of the dam from water bodies that may move uncontrollably in the event of dam failure, while prioritizing potential economic and environmental losses.

Observations, inspections, and measurements at dams are carried out within a particular program, and the measurements to be made vary according to the type and characteristics of the dam. The measurements made in dams can be generally listed as horizontal and vertical deformation measurements, leakage measurements, pressure and stress measurements, seismic motion measurements, precipitation measurements,

water level measurements, measurements of loads acting on structural elements, environmental factor measurements, and temperature measurements.

Dam safety cannot be ensured only by placing measurement systems and collecting data from these systems. The devices to be installed should be carefully selected, their locations should be well determined, and the data obtained from the devices should be collected, processed, and evaluated accurately. A poorly planned systematic process can result in inaccurate or unneeded data, resulting in loss of time and money in data collection and interpretation.

As a general rule, visual observations are made every time the dam is visited, daily and weekly readings are taken during the first filling phase of the dam, extraordinary (emergency) readings are taken in severe stormy weather, earthquakes, etc., and other readings are taken at least in 1-month periods. Maintenance, repair, and revision needs of the equipment in the dam are determined during inspections and controls carried out on daily, weekly, monthly, quarterly, semi-annual, and annual periods. In the annual inspections carried out by the inspection committee consisting of technical staff, the extent to which the maintenance, repair, and revision needs identified after the periodic inspections are met, whether the identified maintenance, repair, and revision needs are repeated, if so, the reasons, deficiencies and inadequacies that prevent the facility from performing its duty thoroughly and flawlessly, damages during operation, whether there are necessary safety measures for the safety of life and property, the status of warning, notice and identification signs, etc. should be examined and the findings should be reported.

The change of deformations and displacements of the dam with time is essential in determining the measurement period. The relationship between the deformations and time occurs in short and long-term periods. Structural movements in the dam due to temperature changes in a day are short-term, while structural movements due to changes in annual water level and temperature values are long-term.

The emergency action plan (EAP) describes who, when, where, and what to do in an emergency or unexpected situation affecting the dam's safety. The emergency action plan prepared in advance should be activated immediately when an emergency situation arises for or from the dam. In the emergency action plan, it is essential to determine the measures to be taken in advance, make the necessary preparations, and conduct the required trials. In addition, for emergency action plans to be effective, the citizens who will be affected should be included in the planning and informed about how to behave during an emergency. Emergency action plans should be updated regularly following emergencies and unexpected situations involving the dam's safety. Communication is critical in an emergency. The emergency action plan has six main elements: Information flow chart, Emergency identification, assessment and classification, Responsible persons, Preparations, Flood maps, and Annexes. In addition, the emergency preparedness phase consists of 3 steps: works to be carried out for emergency preparedness (preparation of emergency action plans, installation of measuring and monitoring devices, installation of warning and communication systems, etc.), works to be carried out in case of emergency (implementation of emergency action plans) and works to be carried out after the emergency (damage assessment, determination of improvement works to be carried out, etc.).

Within the scope of this thesis, dam safety, inadequacies observed in embankment dams and their causes, inspection of embankment dams, measurement instruments used in embankment dams, and inspection and measurement periods were mentioned.

The risk class of İkizdere Dam, located in the İncirliova district and built as a central clay core, upstream sand-gravel, and downstream rockfill dam type, was determined using three different methods accepted in the literature. In addition, the dam was modeled and analyzed using Plaxis finite element software. The results of the analyses were compared with the measurement data of the dam, and interpretations and evaluations were made. The difficulties encountered in the modeling and analysis process of the dam were indicated, and recommendations were made for the analysis of new dams to be built.

1. GİRİŞ

Su, canlı hayatı için vazgeçilmez bir yaşam kaynağıdır. Özellikle 1900'lü yıllardan sonra dünya nüfusunun artması ve sanayinin gelişmesi sonucu doğanın dengesi bozulmuş, iklimlerde değişiklikler meydana gelmiş ve bu nedenlere bağlı olarak su ve enerji ihtiyacı artmıştır. Özellikle bizim gibi kullanılabilir su kaynaklarının sınırlı olduğu ve akarsu akış rejimlerinin düzensiz olduğu ülkelerde, içme, sulama ve kullanma amaçlı su temini yanında elektrik üretimi ve taşkınlardan korunma gibi farklı amaçlarla barajlar inşa edilmiş olup gelecekte de inşa edilmeye devam edilecektir.

Barajlarda ortaya çıkacak mühendislik problemleri sonucu oluşabilecek yetersizlikler nedeniyle barajlar yıkılma riski ile karşı karşıya kalabilmektedir. Baraj yıkılması sonucu baraj rezervuarında bulunan büyük hacimli su kütlesi çok kısa bir süre içerisinde kontrolsüz ve hızlı bir şekilde hareket ederek barajın mansap bölgesinde maddi ve manevi kayıplara neden olabilmektedir. Barajlarda yıkılmaya neden olabilecek yetersizliklerin önceden tespit edilerek gerekli tedbirlerin zamanında alınabilmesi amacıyla, barajlarda planlanan performansın sağlanıp sağlanmadığı inşaat aşamasından başlanmak üzere işletme ömrü boyunca sürekli takip edilmelidir.

Dikkat edilmesi gereken önemli bir diğer konu ise mevcut barajların güvenilirlik seviyelerinin tespit edilmesidir. Mevcut barajlarda yapılacak olan risk-güvenlik çalışmaları ile bu barajların durumu, güven seviyeleri ve varsa yetersizlik gösteren kısımlar tespit edilmeye çalışılmakta ve farklı tehlikelere karşı hazırlıklı olunmakta, bazı barajlarda ise rehabilitasyon ihtiyacı gündeme gelmektedir. Mevcut barajlar üzerinde yapılan bu çalışmalar, inşa edilecek olan barajlar için bilgi ve tecrübe kaynağı olmakta, böylelikle oluşması muhtemel benzer risklerin seviyeleri düşürülebilmekte veya riskler tamamen ortadan kaldırılabilir (Yenigün, 2007).

Son yıllarda baraj yapım teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler sonucu daha yüksek ve büyük rezervuar hacmine sahip barajlar inşa edilmeye başlanmıştır. Büyük barajlar birçok avantaja sahip olmasına rağmen yıkılma durumunda küçük barajlara göre çok daha fazla can ve mal kaybına neden olabilmektedirler.

1.1. Türkiye ve Dünyada Barajlar

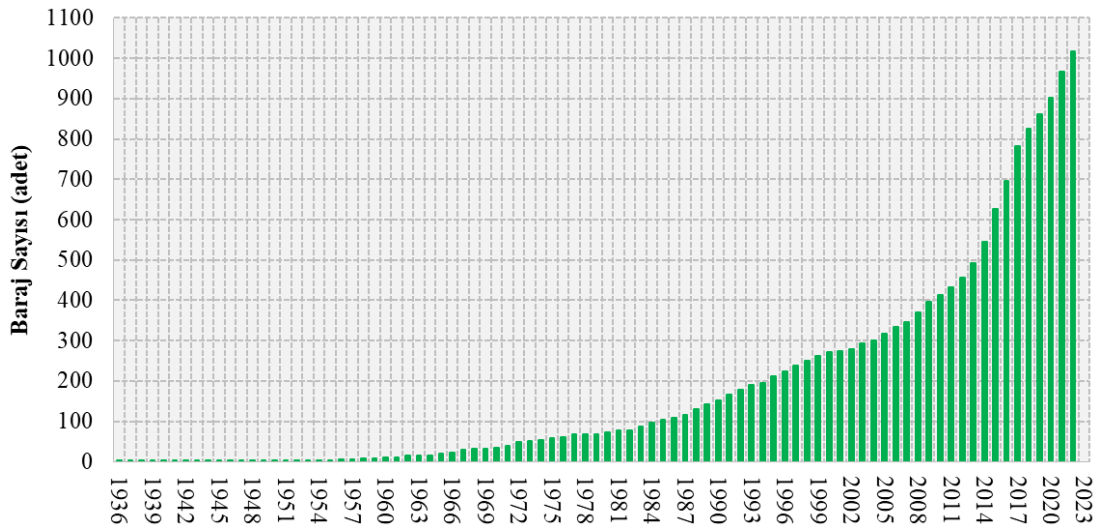
Ülkemizde; sahip olduğu yükseklik, gövde hacmi ve rezervuar su hacmi gibi farklı yönlerden dünya literatürüne girmiş barajlarımız bulunmaktadır. İnşa edilmiş olan bütün barajlarımız ülke kalkınmasında önemli bir role sahiptir (Aşık, 2016).

DSİ (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü) tarafından 2023 yılında yayımlanmış 2022 yılı resmi su kaynakları istatistikleri doğrultusunda 1936-2022 yılları arasında yapımı tamamlanan barajların sayıları belirli dönemler halinde Tablo 1.1’ de verilmiştir (DSİ, 2023).

Tablo 1.1. 1936-2022 yılları arasında yapımı tamamlanan barajların sayıları.

Dönemi	İşletmeye Açılan Baraj Sayısı
1936 - 1965	19
1966 - 1975	40
1976 - 1985	45
1986 - 1995	108
1996 - 2005	106
2006 - 2015	308
2016 - 2022	392
Toplam	1.018

DSİ tarafından 2023 yılında yayımlanmış 2022 yılı resmi su kaynakları istatistikleri doğrultusunda 1936-2022 yılları arasında yapımı tamamlanan barajların yıllara göre sayılarının kümülatif değişim grafiği Şekil 1.1’ de verilmiştir (DSİ, 2023).



Şekil 1.1. 1936-2022 yılları arasında yapımı tamamlanan barajların yıllara göre sayılarının kümülatif değişimi.

Tablo 1.1’ de görüldüğü üzere DSI’ nin 2022 yılı resmi su kaynakları istatistikleri Türkiye’de 2022 tarihi itibariyle tamamlanmış 1.018 adet barajın bulunduğunu göstermektedir. Bu veriler dönemsel aralıkta incelendiğinde barajların %70’e yakınının 2006 yılından sonra işletmeye alındığı görülmektedir.

2013 yılı verilerine göre en çok baraj bulunan 15 ülke ve baraj sayıları Tablo 1.2’ de gösterilmiştir (Ağırlioğlu, 2014).

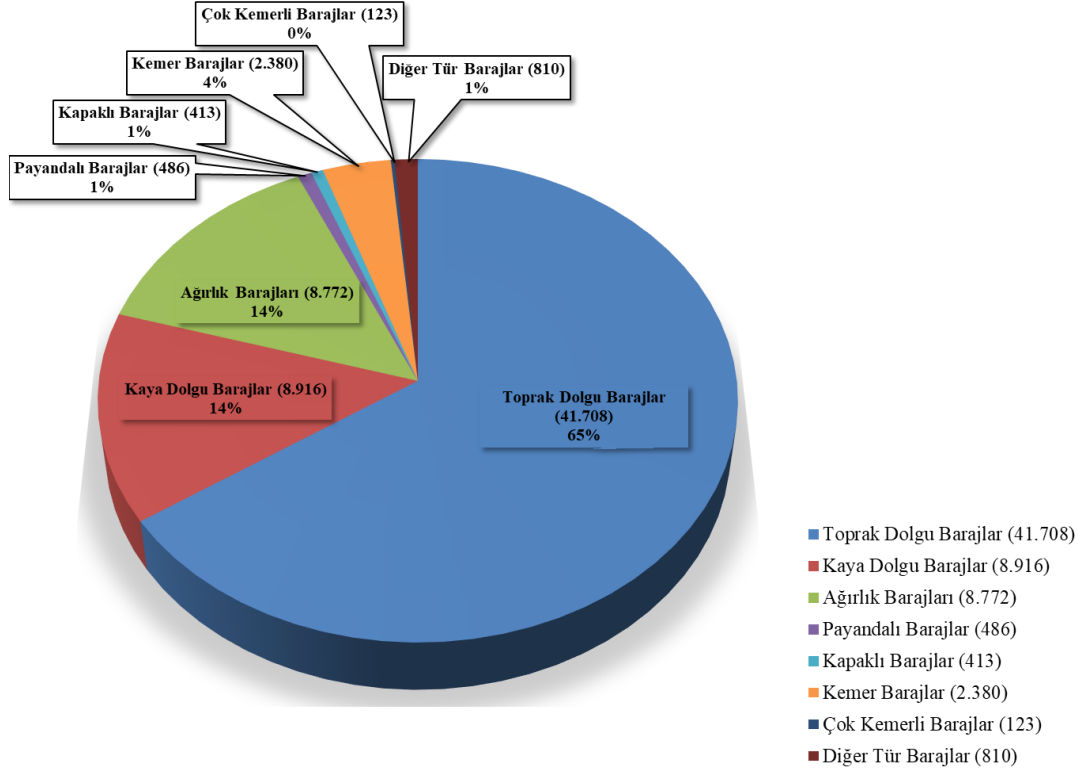
Tablo 1.2. 2013 yılı verilerine göre en çok baraj bulunan 15 ülke ve baraj sayıları.

Sıra No	Ülke	Baraj Sayısı	Yüzdesi, %
1	ABD	9265	26
2	Çin	5191	15
3	Hindistan	5101	14
4	Japonya	3076	9
5	Kanada	1166	3
6	Güney Afrika	1114	3
7	İspanya	987	3
8	Türkiye	741	2
9	Brezilya	684	2
10	Fransa	622	2
11	Meksika	569	2
12	İtalya	542	2
13	İngiltere	519	1
14	Avustralya	507	1
15	İran	501	1
Ara Toplam		30585	85
Diğer Ülkeler		7056	15
Toplam		37641	100

Tablo 1.2’ de görüldüğü üzere 2013 yılı verileri göz önüne alındığında, Türkiye ICOLD (International Commission on Large Dams) tarafından kayıt altına alınan baraj sayılarına göre dünyada 8. sırada bulunmaktadır.

ICOLD tarafından yayımlanmış veriler doğrultusunda 2023 yılı itibariyle barajların gövde türüne göre sayıları ve yüzde dağılımları Şekil 1.2’ de verilmiştir (ICOLD, 2023). Buradan barajların %79 gibi çok büyük bir kısmının dolgu barajlardan oluştuğu görülmektedir.

Ülkemizde bulunan büyük barajların yüzde 75’i toprak dolgu baraj ve yüzde 17’si kaya dolgu baraj türünde yapılmış olup kemer baraj sayısı ise azdır. Deriner, Ermenek, Karakaya, Gökçekaya, Berke ve Oymapınar barajları ülkemizdeki kemer barajlara örnek verilebilir (Ağırlioğlu, 2014).



Şekil 1.2. Barajların gövde türlerine göre sayıları ve yüzde dağılımları.

Tüm bu verilerden de anlaşılacağı üzere, dünyada olduğu gibi ülkemizde de en çok tercih edilen baraj türü dolgu barajlardır. Bunun sebepleri arasında diğer baraj türlerine göre yapım kolaylığına sahip olmaları, dar ve geniş tüm vadi türlerinde uygulanabilmeleri, etkiyebilecek tüm kuvvetler altında yeterli yer değiştirme kabiliyetine sahip olmaları, düzensiz oturmalarından diğer baraj türlerine göre daha az etkilenmeleri ve her türlü temel koşullarında uygulanabilmeleri gibi teknik avantajlarının yanında baraj sahasının civarından elde edilen malzemelerin kullanılmasıyla yapılabilmeleri gibi ekonomik avantajları bulunmaktadır.

1.2. Dünyada Meydana Gelen Önemli Baraj Yıkılmaları

Baraj gövdesinin veya yardımcı elemanlarının farklı nedenlerden kaynaklı olarak hasara uğraması sonucu barajın ana görevi olan rezervuarındaki suyu tutma işlevini güvenli bir şekilde yerine getirememesi baraj yıkılması olarak tanımlanmaktadır. Bugüne kadar, barajlarda birçok yetersizlik gözlenmiş ve bu yetersizliklere bağlı olarak barajların yıkılması sonucu büyük felaketler yaşanmıştır.

20. yüzyılda yaklaşık olarak 200 farklı rezervuar yetersizliği meydana gelmiş ve 8000'den fazla insan hayatını kaybetmiştir. Ayrıca, ICOLD'un hazırladığı tabloda,

tarihi çağlardan 1965 yılına kadar olan zaman içerisinde 202 adet büyük baraj yetersizliği olduğu belirtilmiştir (Yenigün ve Yüzgöl, 2013).

Tarihin en büyük baraj felaketi olarak kayıtlara geçen olay 8 Ağustos 1975 tarihinde Çin Halk Cumhuriyetinde meydana gelmiştir. Aşırı yağış nedeniyle Banqiao ve Shimantan barajları ile 62 adet büyük ve küçük ölçekli barajın yıkılması sonucu toplam 171.000 kişi hayatını kaybetmiş, birçok insan yaralanmış ve 5.96 milyon bina yıkılmıştır (Abay ve ark, 2015).

Çeşitli ülkelerde meydana gelen baraj yıkılmalarından 50'yi aşkın ölüm ile sonuçlananlardan bazıları ve yıkılma nedenleri Tablo 1.3' te verilmiştir.

Tablo 1.3. 50'yi aşkın ölüm ile sonuçlanan bazı baraj yıkılmaları ve yıkılma nedenleri (Abay ve ark, 2015).

Baraj	Yıl	Ülke	Ölü Sayısı	Yıkılma Nedeni
Situ Gintung	2009	Endonezya	98	Aşırı yağış/Hatalı işletme
Sayano/Shushenskaya	2009	Rusya	75	Türbin kopması
Koshi	2008	Nepal	250	Aşırı yağış
Shakidor	2005	Pakistan	70	Aşırı yağış
El-Zeyzun	2000	Suriye	50	Filtre tabakası problemi
Kantale	1986	Siri Lanka	180	Hatalı işletme
Val di Stava	1985	İtalya	268	Hatalı tasarım ve inşaat
Machchu 2	1979	Hindistan	5.000	Baraj üstünden su aşması
Banqiao/Shimantan	1975	ÇHC	171.000	Aşırı yağış
Canyon Lake	1972	ABD	238	Taşkın
Buffalo Creek	1972	ABD	125	Aşırı yağış
Certej	1971	Romanya	89	Gövde yıkılması
Sempor	1967	Endonezya	>2.000	Baraj üstünden su aşması
Vratsa	1966	Bulgaristan	107	Çamur ve su taşkını
Vaiant	1963	İtalya	2.000	Baraj üstünden su aşması
Panshet	1961	Hindistan	1.000	Gövde yıkılması
Malpesset	1959	Fransa	423	İnşaat aşamasında
Vega de Tera	1959	İspanya	144	Gövde yıkılması
Tangiwai	1953	Yeni Zelanda	151	Krater gölü taşması
Eder ve Möhne	1943	Almanya	70	Kasıtlı yıkım
Sella Zerbino	1935	İtalya	111	Jeolojik duraysızlık/Taşkın
St. Francis	1928	ABD	600	Jeolojik duraysızlık
Gleno	1923	İtalya	356	Hatalı tasarım ve inşaat
Tigra	1917	Hindistan	1.000	Temelden su sızması
Desna	1916	Av. Mac.İmp.	62	Hatalı inşaat
Austin	1911	ABD	78	Hatalı tasarım
South Fork	1889	ABD	2.209	Aşırı yağış
Bouzey	1884	Cezayir	150	Kayma
Mill Nehri	1874	ABD	139	Hatalı tasarım
Dale Dike	1864	İngiltere	244	Hatalı inşaat
Bilberry	1852	İngiltere	81	Aşırı yağış
Puentes	1802	İspanya	608	Yumuşak zemin

Tablo 1.3' ten de anlaşılacağı üzere geçmişten günümüze çok farklı nedenlerle birçok baraj yıkılması yaşanmış ve baraj yıkılmaları sonucu birçok insan hayatını kaybederek ciddi maddi kayıplar meydana gelmiştir.

İstatistiklere göre en çok hasara uğrayan baraj türü toprak dolgu barajlardır. Ağırılık barajları, kaya dolgu barajlar ve kemer barajlar hasara uğrama bakımından toprak dolgu barajları takip etmektedir (Uzel ve ark., 2007).

1.3. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Barajlar birçok faydaya sahip olmakla beraber mansap kısımlarında can ve mal güvenliği açısından tehdit oluşturmaktadırlar. İnşaatının ilk gününden itibaren birçok farklı yük etkisinde bulunan barajların bu yükler altındaki davranışının önceden bilinmesi ve sürekli olarak izlenmesi, herhangi bir olumsuz durumda ortaya çıkması muhtemel baraj yetersizliğinin önceden tespit edilmesinde ve gerekli önlemlerin alınarak yetersizliğin bir afete dönüşmesinin engellemesinde önemli bir faktördür. Bu nedenle, barajlar maruz kalabilecekleri tüm yük durumları göz önünde bulundurulularak tasarlanmalı, inşaat ve işletme aşamasında kabul görmüş ölçme teknikleri ile sürekli izlenmeli, belirli periyotlarla muayene edilmeli ve acil durum eylem planları hazırlanarak bu planlar acil durumlarda titizlikle uygulanmalıdır. Aksi durumda, baraj yıkılmasına bağlı olarak büyük can ve mal kayıplarının meydana gelmesi kaçınılmaz olacaktır.

Bu çalışma kapsamında; Aydın ili, İncirliova ilçesinin 5 km kuzeyinde İkizdere Çayının üzerinde DSİ tarafından içme ve sulama suyu temini amacı ile planlanan, 1999 yılında inşaatına başlanarak 2010 yılında işletmeye alınan, merkezi kil çekirdek, memba kum-çakıl, mansap kaya dolgu baraj türünde inşa edilen İkizdere Barajının risk sınıfı literatürde kabul görmüş olan 3 farklı yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bunun yanında baraj Plaxis sonlu elemanlar programı ile modellenerek barajdan alınan röper ve piyezometre ölçüm verileri doğrultusunda analizler yapılmış, analiz sonuçları ölçüm verileri ile karşılaştırılmak suretiyle yorumlanmış ve değerlendirmelerde bulunulmuştur. Son olarak barajın modellenmesi ve analizlerin yapılması sırasında karşılaşılan zorluklar ortaya konmuştur.

2. BARAJLARDA GÖRÜLEN YETERSİZLİKLER, BARAJ GÜVENLİĞİ VE BARAJ RİSK ANALİZİ

2.1. Barajlarda Tehlike, Risk ve Emniyet Kavramları

Yeryüzündeki baraj sayısının her geçen gün artması, eski barajların mevcut teknik standartları karşılayamaması, küçük barajların planlama, tasarım, inşaat ve işletme aşamalarında eksikliklerinin bulunması, iklim değişikliğinin barajların yapıldığı bölgelerde hidrolojik değişikliklere neden olması gibi birçok farklı nedenden dolayı barajların doğru tasarlanması ve işletilmesi, farklı etkiler karşısında gösterdikleri davranışların izlenmesi ve risk seviyelerinin belirlenmesi gibi konular büyük öneme sahiptir.

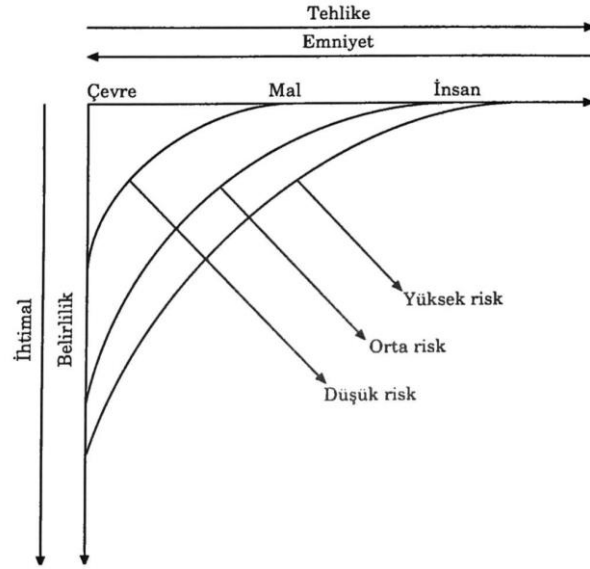
Tehlike; yapıda var olan veya dışarıdan gelerek yapıyı etkileyebilecek zarar ya da hasar verme potansiyelini ifade ederken, risk ise tehlikeden kaynaklı kayıp veya zararlı sonuç ortaya çıkarma ihtimalini ifade etmektedir. Tanımlardan da anlaşılacağı üzere; tehlike sebep iken risk ise tehlikenin bir sonucudur. Dolayısıyla tehlikenin olduğu yerde risk de bulunmaktadır. Tehlike ve risk kavramları farklı anlamlar ifade etmekte olup, riskin temel birleşenlerinden bir tanesi de belirsizliktir. Riskin sayısal olarak değerlendirilmesindeki amaç bu belirsizliği tanımlamaktır.

Bir barajın mevcut durumunun güvenli olup olmadığının takip edilmesinin yanında, maruz kalabileceği tehlikeler karşısında ne gibi bir davranış göstereceğinin değerlendirilmesi baraj güvenliği yönetiminin önemli bir adımıdır. Bir barajın toplam risk faktörünün tespit edilmesinde barajın sahip olduğu özellikleri farklı yönlerden inceleyen çeşitli sistematik yaklaşımlar bulunmaktadır. Bir barajın tehlike sınıfının belirlenmesine yönelik kriterler yöntemler arasında farklılık gösterse de, literatürdeki bütün yöntemler barajın yıkılması durumunda kontrolsüz bir şekilde hareket edebilecek olan su kütesinin baraj mansabında tehdit ettiği insan potansiyelini önceliklendirmekte, muhtemel ekonomik ve çevresel kayıp potansiyelini ikinci planda tutmaktadır (Ağıralıoğlu ve ark., 2018).

Baraj emniyeti açısından sadece barajın ve barajın bulunduğu alanın hidrolojik, jeolojik, sismik ve morfolojik durumu gibi konuların ele alınması çalışmaların yerel kalmasına neden olacaktır. Barajın sadece mühendislik açısından güvenliğinin sağlanması, barajın her türlü koşulda emniyetli bir şekilde işlevini yerine getireceği anlamına gelmemektedir. Çünkü barajların sadece mühendislik açısından değil insan, canlı, sosyal ve çevre değerlendirmesi gibi açılardan da güvenliği sağlayacak şekilde işlevini yerine getirmesi gerekmektedir. Öte yandan barajın mansaptaki yerleşim birimlerine, sanayi ve tarım alanlarına olası etkilerinin de güvenli tarafta kalmasını sağlayacak önlemlerin önceden alınması yararlı olacaktır. Barajdaki risk, barajın servis ömrü boyunca amaçlanan tüm işlevlerinin zarar görmesi ve olumsuz koşullar oluşması ihtimalini ifade etmektedir. Risk “R” ve güven “G” ile tanımlanacak olursa, risk ve güvenin toplamı 1’e eşittir (Şen, 2012).

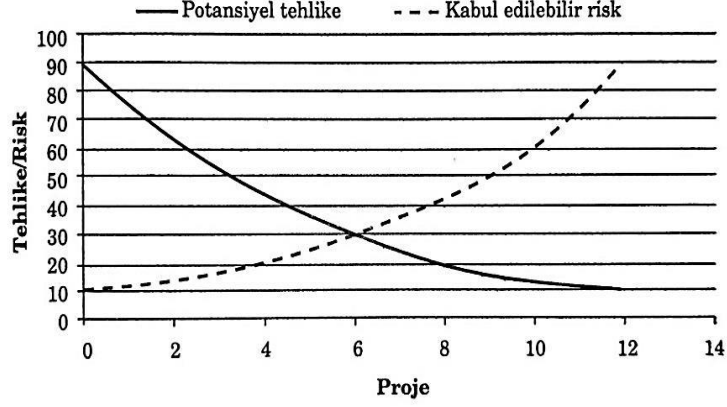
$$\text{Risk} + \text{Güven} = 1 \quad (2.1)$$

Tehlike, emniyet ve ihtimal kavramları arasındaki bağıntı Şekil 2.1’ de verilmiştir (Ağırlioğlu, 2011).



Şekil 2.1. Tehlike, ihtimal ve emniyet arasındaki bağıntının şeması (Ağırlioğlu, 2011).

Şekil 2.1’ de görüldüğü üzere emniyet ile tehlike arasında ters orantı vardır. Yani emniyet artarken tehlike azalmaktadır. Tehlike ile risk arasındaki bağıntı ise Şekil 2.2’ de verilmiştir.



Şekil 2.2. Tehlike ile risk arasındaki bağıntının şeması (Ağırlioğlu, 2011).

2.2. Barajlarda Tehlike Oluşturabilecek Durumlar ve Bu Tehlikelere Sebep Olan Yetersizlikler

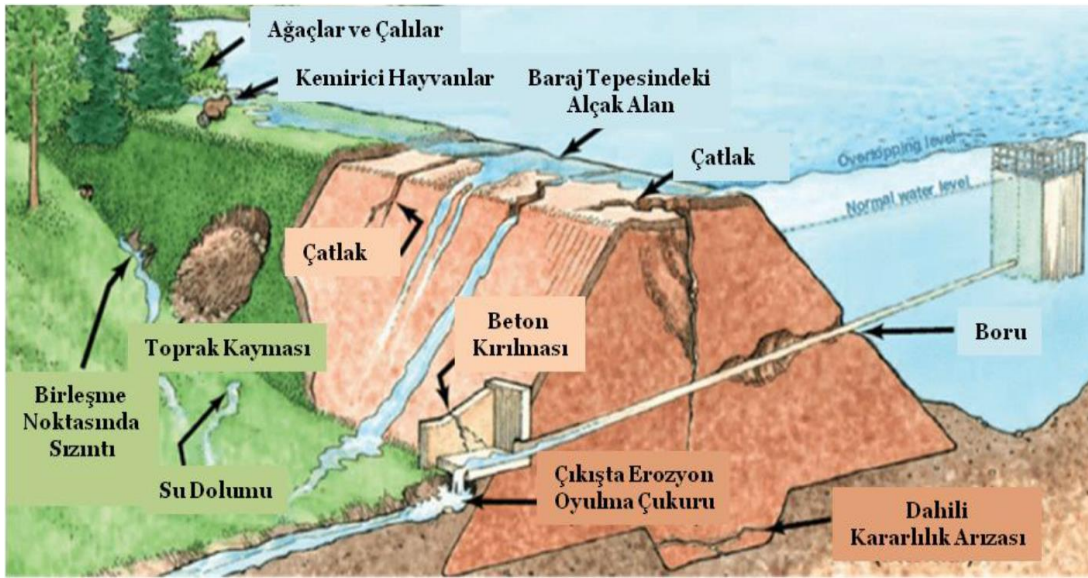
Barajlarda meydana gelen yıkılmalar, yapısal baraj yıkılması ve performansa dayalı baraj yıkılması olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yapısal baraj yıkılmalarında, baraj ve yardımcı elemanlarının özelliklerinin değişmesi söz konusu olduğundan yapı planlandığı gibi çalışmamaktadır. Ancak performansa dayalı baraj yıkılmalarında, baraj ve yardımcı elemanlarının tasarlandığı performans sınırları aşılmaktadır. Barajlar genel olarak yapısal yıkılma kavramına göre tasarlanmaktadır (Yenigün, 2007).

Barajlarda sıklıkla gözlenen yetersizlikler şunlardır:

- a) Temel yetersizlikleri
 - a. Düzensiz oturmalar
 - b. Temel zemininin kayması
- b) Doğal yapı malzemelerinden kaynaklı yetersizlikler
- c) Sızma kaynaklı yetersizlikler
 - a. Baraj gövdesinde meydana gelen sızmalar (Borulanma)
 - b. Temel altı su sızmaları
- d) Baraj üzerinden su aşması kaynaklı yetersizlikler
- e) Dolusavak yetersizliği
- f) Sismik olaylardan kaynaklı yetersizlikler
- g) Oluşan çatlaklardan kaynaklı yetersizlikler
 - a. Boyuna çatlaklar
 - b. Enine çatlaklar
 - c. Kuruma çatlakları

- h) Oluşan kaymalardan kaynaklı yetersizlikler
 - a. Yüksek boşluksuyu basıncı nedeniyle baraj gövdesinde oluşan kaymalar
 - b. Baraj haznesi sahillerinde oluşan toprak kaymaları
- i) Baraj gövdesinde oluşan çöküntülerden kaynaklı yetersizlikler
- j) İşletme hatalarından kaynaklı yetersizlikler
- k) Terör saldırılarından kaynaklı yetersizlikler

Barajlarda görülen yetersizliklere ait görsel Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Barajlarda görülen yetersizlikler (Caner, 2021).

Barajlar farklı etmenlerden kaynaklı yıkılırken, yıkılma sırasında farklı mekanizmalar görülmektedir. Baraj yıkılması genellikle tek mekanizmanın değil, farklı birkaç mekanizmanın ortak bir sonucudur (Abay ve ark., 2015).

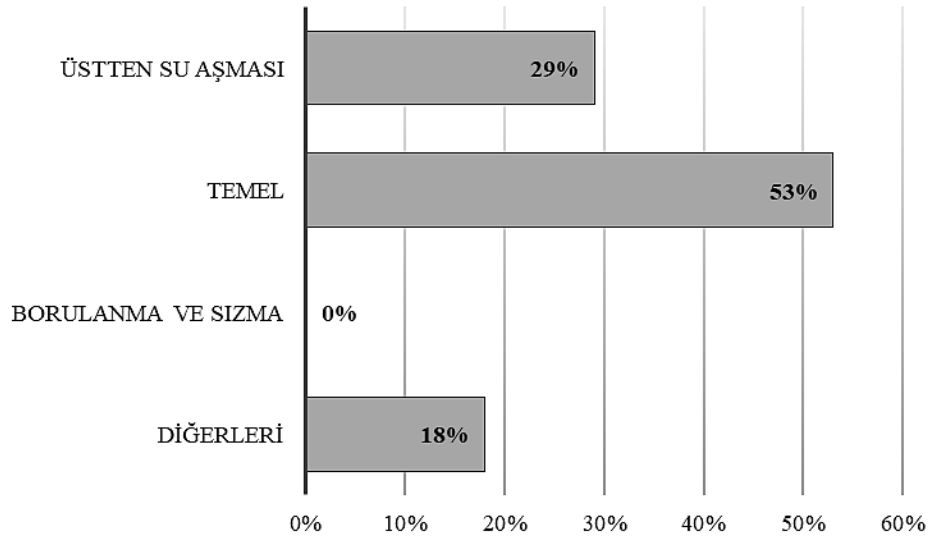
Barajlarda meydana gelmiş olan hasar ve yıkılma olayları incelendiğinde, hasar ve yıkılma nedenlerinin barajların tipine göre farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, baraj için alınması gerekli olan önlem ve projelendirme ölçütleri barajın tipine göre farklılık göstermektedir. Yapılan gözlemler baraj hasar ve yıkılma olaylarının genel itibarıyla temel ve dolusavak yetersizliklerinden kaynaklandığını göstermiştir (Yenigün ve Yüzgöl, 2014).

Barajlarda görülen başlıca hasarlar, nedenleri ve hasar yüzdeleri Tablo 2.1’ de verilmiştir.

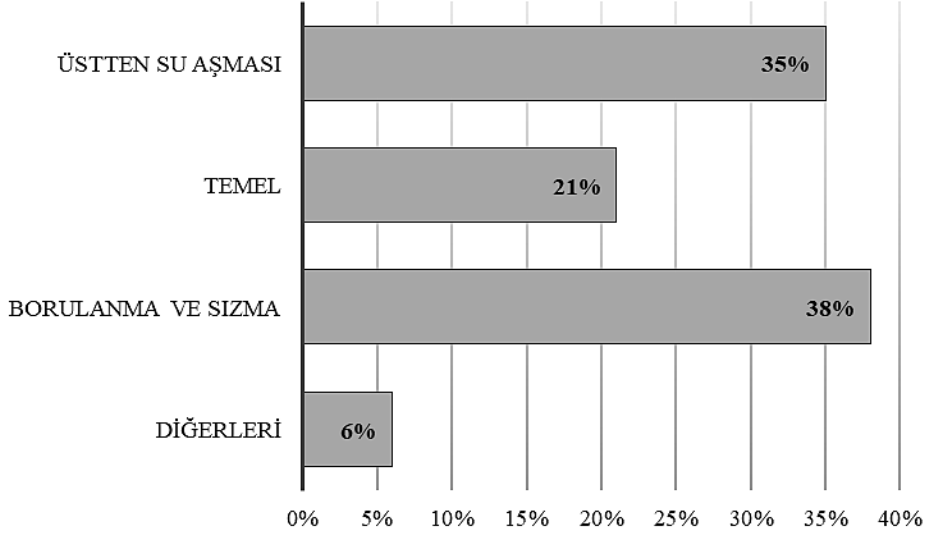
Tablo 2.1. Barajlarda görülen başlıca hasarlar ve yüzdeleri (Aydın, 2007).

Hasar Biçimi	Yüzde (%)	Hasar Nedeni
Baraj Üzerinden Su Aşması	34	<ul style="list-style-type: none">• Uygun olmayan dolusavak tasarımı• Dolusavakta sürüntü maddesi birikmesi• Göl alanında meydana gelen heyelan ve baraj tepesinde oyulma• Farklı oturmalar ve deprem yükleri altında sınılaşma
Temel Yetersizlikleri	30	<ul style="list-style-type: none">• Kayma ve şev duraysızlığı• Yüksek taban suyu basıncı• Denetimsiz sızma• Borulanma nedeni ile içten çöküntü
Borulanma ve Sızma	20	<ul style="list-style-type: none">• Dipsavak çıkışı gibi hidrolik yapılar boyunca sızma ve çökme• Baraj gövdesinde çatlak
Boru ve Vanalar	10	<ul style="list-style-type: none">• Bağlantı noktaları ya da çatlaklardan dolgu malzemesinin girmesi
Diğer	6	

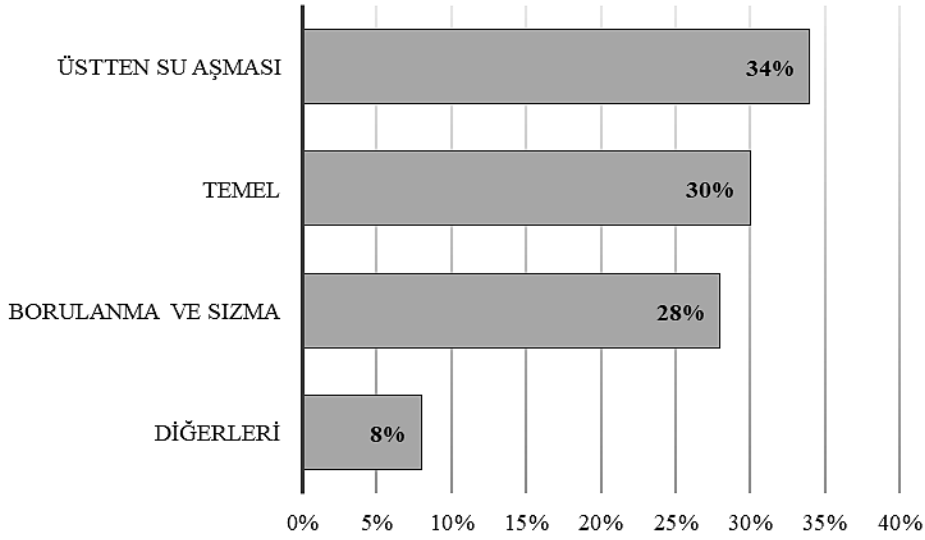
Şekil 2.4' da beton barajlarda, Şekil 2.5' de dolgu barajlarda, Şekil 2.6' de tüm baraj tiplerinde yıkılma nedenlerine ait yüzde grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.4. Beton barajlarda yıkılma nedenleri (Ağırlioğlu, 2011).



Şekil 2.5. Dolgu barajlarda yıkılma nedenleri (Ağırlioğlu, 2011).



Şekil 2.6. Bütün baraj türlerinde yıkılma nedenleri (Ağırlioğlu, 2011).

Şekil 2.4' de görüldüğü üzere beton barajlarda temel kaynaklı yıkılmalar, Şekil 2.5' de görüldüğü üzere dolgu barajlarda borulanma kaynaklı yıkılmalar, Şekil 2.6' da görüldüğü üzere bütün baraj türlerinde üstten su aşması kaynaklı yıkılmalar daha çok görülmektedir.

Ülkemizde az sayıda baraj hasarı yıkılma olayı gözlenmesinin sebebi, ülkemizdeki barajların genel itibariyle genç olmasından kaynaklanmaktadır.

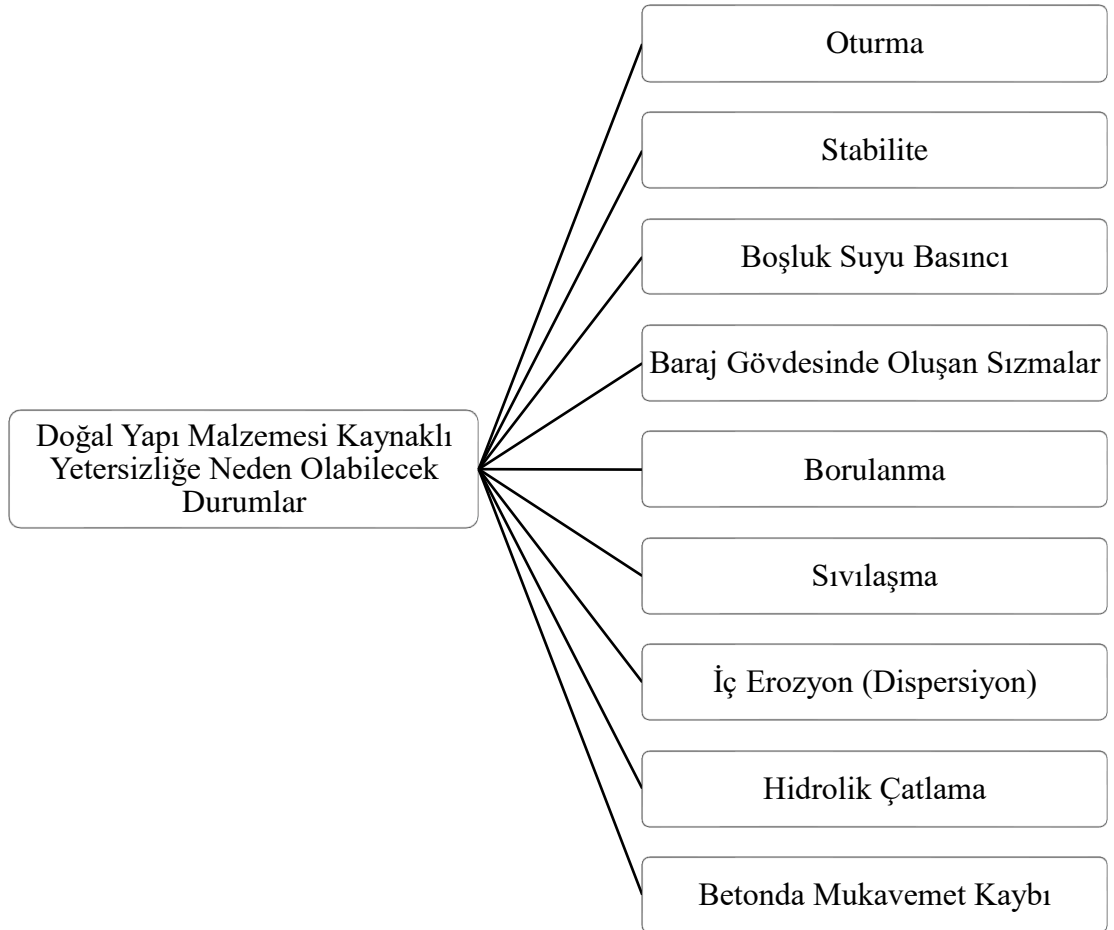
2.2.1. Temel yetersizlikleri

Temellerde gözlenen yetersizlikler, temel zemininin kendisinden kaynaklı olabileceği gibi inşaat sırasında yapılan hatalı veya eksik zemin iyileştirme uygulamalarından da kaynaklanabilir. Kontrol ve tahmin edilemeyen su sızıntısı, baraj temelinde meydana gelen düzensiz oturmalar ve kaymalar barajda yetersizliklere yol açmaktadır (Ulusoy, 2015).

2.2.2. Doğal yapı malzemelerinden kaynaklı yetersizlikler

Baraj yıkılmalarının %50 gibi büyük bir oranı kullanılan doğal yapı malzemelerinden kaynaklıdır. Bu nedenle doğal yapı malzemelerinin seçimi baraj güvenliği açısından çok önemlidir (Akçalı ve ark., 2014).

Barajlarda kullanılan doğal yapı malzemelerine bağlı olarak ortaya çıkan problemlerden bazıları Şekil 2.7' de verilmiştir:

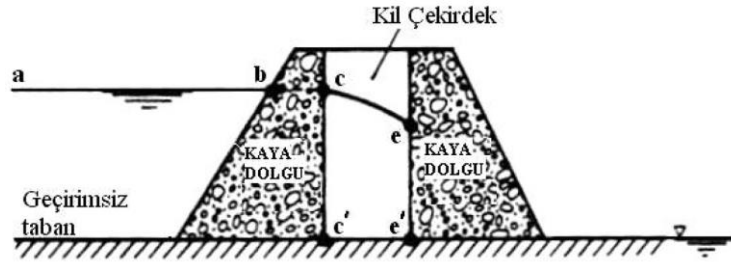


Şekil 2.7. Barajlarda doğal yapı malzemesi kaynaklı oluşan yetersizliğe neden olabilecek durumlar (Akçalı ve ark., 2014).

2.2.3. Sızma

Baraj dolgusunda ya da temelinde su sızması sonucu aşınmalar meydana gelebilmektedir. Baraj dolgusundaki sızmalara karşı önlem alınmaması durumunda dolguda boşluk suyu basıncı artmakta ve sızma sonucu oluşan gedik zamanla büyümektedir.

Baraj güvenliği açısından baraj gövdesinde sızma meydana gelip gelmediğinin tespit edilmesi, sızma oluşuyorsa sızma miktarının tespit edilerek sürekli izlenmesi gerekmektedir. Barajın stabilitesinin korunabilmesi amacıyla projelendirme safhasında alınması gereken tüm önlemler düşünülmeli, meydana gelmesi muhtemel sızma hatları ve sızma miktarları önceden tespit edilmelidir. Aksi halde sızma sonucu oluşabilecek problemlerin çözümü maliyetli ve zor olacaktır. Sızma miktarının belli sınırlar içerisinde olması barajın stabilitesini ve emniyetini etkilememektedir. Baraj gövdesi boyunca oluşacak olan sızmalar baraj dolgu malzemesini sürükleyebilecek aşamaya gelirse, kısa zamanda borulanma oluşacak ve baraj yıkılacaktır. Ayrıca baraj gövdesinde oluşacak olan sızmalardan kaynaklı olarak barajın mansap yüzünün su ile doymun hale gelmesi sonucu baraj mansap sevi de kayma durumuna gelebilecektir. Gövde dolgusu içerisinde meydana gelen sızmanın freatik hat (doymunluk çizgisi) adı verilen bir üst yüzeyi bulunmaktadır. Freatik hattın üst kısmında akım ve su basıncı yoktur. Ancak dolgu malzemesinin sahip olduğu kapilarite (kılcallık) etkisiyle freatik hattın üst kısmı ıslak ve/veya doymun olabilmektedir. Baraj rezervuarında bulunan suyun gövde çekirdeği içerisindeki sızma eğrisi ve hızı, rezervuardaki suyun belirli bir seviyede kalma süresine, dolgu malzemelerinin sıkıştırılma derecelerine, dolgu malzemelerinin yatay ve düşeydeki permeabilite (geçirimsizlik) katsayılarına, suyun sızma süresine (zamana) ve boşluk suyu basınçlarına bağlıdır. Baraj gövdesindeki sızmaların miktarı özellikle kil çekirdekte ve diğer bölgelerde kullanılan malzemelerin geçirimsizlik durumlarına bağlıdır. Kaya dolgu barajlardaki kaya dolgu zonları yalnızca barajın stabilitesi amacıyla yapılmakta olup sızmalara karşı önleyici bir etkisi yoktur. Şekil 2.8' de de görülebileceği üzere b-c noktaları arasındaki su yüzü yatay olup, su seviyesi a-b noktaları arasındaki hazne su seviyesi ile aynıdır. Freatik hat, kil çekirdek boyunca c-e noktaları arasındaki gibi olup, sızma noktası olan e noktası daima kuyruk suyunun üzerindedir (Mesci ve ark., 2007).



Şekil 2.8. Kaya dolgu dikdörtgen kil çekirdekli bir barajda sızma çizgisi (Mesci ve ark., 2007).

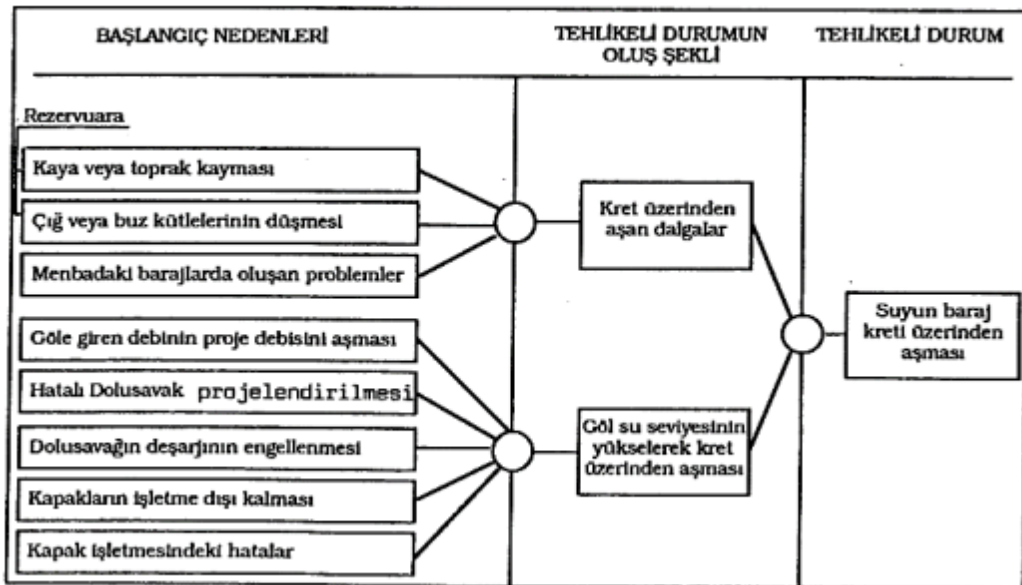
2.2.4. Baraj üzerinden su aşması

Baraj gövdesi üzerinden su aşması genel itibariyle iki yolla meydana gelmektedir.

- (1) Su dalgalarının baraj kretinin üzerinden aşması
- (2) Baraj gölü su seviyesinin yükselerek baraj kretinin üzerinden aşması

Temel yetersizlikleri veya baraj dolgusunun standartlara uygun şekilde sıkıştırılmaması sonucu baraj tepesinin oturması, dolusavak kapasitesinin üzerinde debi gelmesi, akış ile gelen kütük ve katı maddelerle dolusavak girişinin tıkanması, baraj kapaklarının arızalanması gibi farklı nedenlere bağlı olarak baraj üzerinden su aşabilmektedir. Baraj gölü su seviyesinin yükselerek baraj gövdesinin üzerinden aşması, dalgaların kretin üzerinden aşmasına oranla baraj güvenliğini daha çok tehdit etmektedir (Yıldız, 1992).

Baraj üzerinden su aşmasına neden olabilecek durumlar Şekil 2.9’ da verilmiştir.



Şekil 2.9. Baraj üzerinden su aşmasına neden olabilecek durumlar (Yıldız, 1992).

2.2.5. Dolusavak yetersizlikleri

Dolusavaklar, barajın üzerinde yapıldığı akarsuyun getirdiği suların baraj rezervuarı dolduktan sonraki fazla olan kısmının emniyetli bir şekilde barajın mansap kısmına aktarılmasını sağlayan yapılardır. Bu nedenle dolusavaklar özellikle toprak ve kaya dolgu barajların emniyeti açısından önem arz etmektedir. Taşkın debilerinin büyük olduğu akarsular üzerinde inşa edilen barajların dolusavak tasarımı ve işletilmesi, baraj gövdesinin tasarımından daha önemli bir duruma gelmektedir. Hesaplarda proje taşkını olarak göz önüne alınacak olan taşkın debisinin büyüklüğü (dönüş periyodu), baraj güvenliği bakımından alınabilecek riskin derecesine bağlı olmaktadır. Bu riskin derecesi ise göz önüne alınan proje taşkınının aşılması sonucu meydana gelecek olan zarar ile ilgilidir. Proje taşkınının aşılması sonucu oluşacak can kaybı ve zararlar büyük olacak ise risk çok küçük, ortaya çıkacak zararlar küçük olacak ise risk daha büyük seçilebilmektedir (Yenigün ve Erkek, 2002).

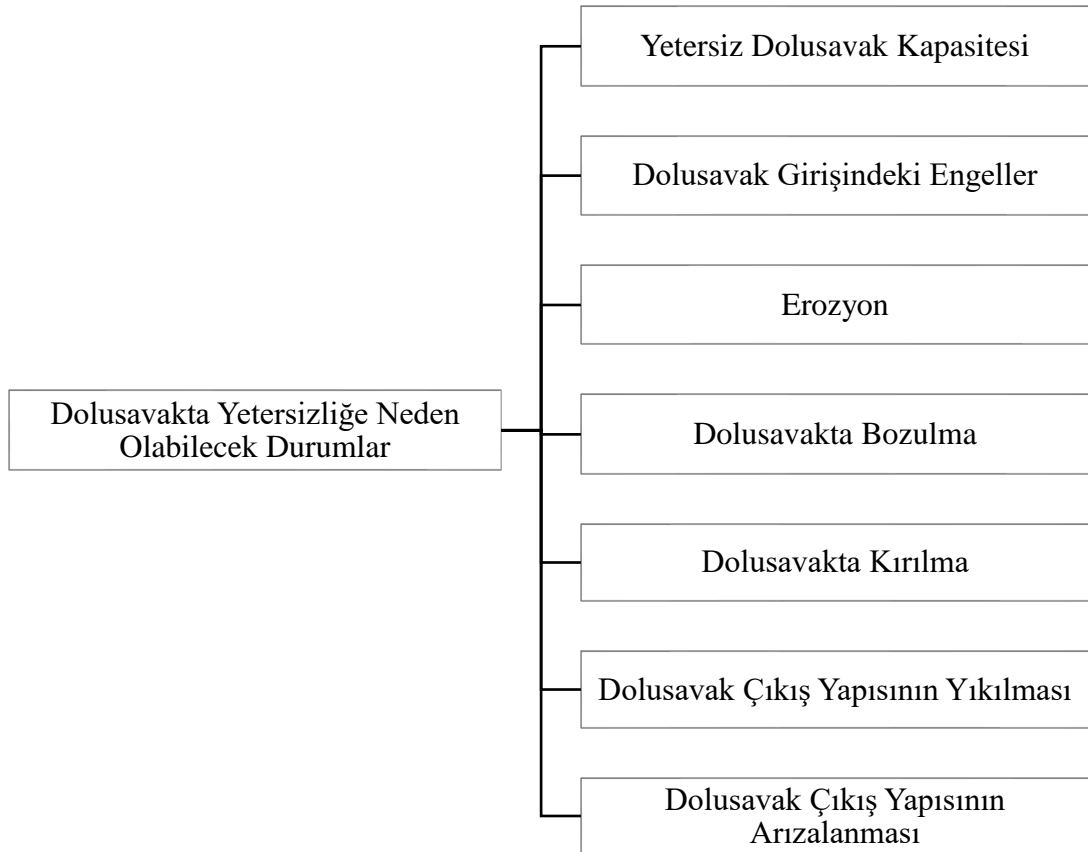
Dolusavağın yerinin ve türünün seçilmesi projelendirmede dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan birisidir. Dolusavak tipinin seçiminde baraj tipi ve özellikleri, jeolojik, hidrolojik ve ekonomik durum gibi önemli birçok konunun göz önüne alınması gerekmektedir. Ayrıca dolusavağın statik ve hidrolik açıdan emniyetli olması ve tahliye edilecek olan suyun çevrede zarara neden olmaması gerekmektedir. Bu zararın engellenmesi veya azaltılması amacıyla, dolusavağın deşarj kanalının sonunda yüksek hıza erişecek su akışının enerjisini kırarak olan ve enerji kırıcı ya da dağıtıcı yapı adı verilen tesisler inşa edilmektedir (Sucu ve ark., 2007).

Dolusavak tasarımında en uygun dolusavak boyutunun belirlenebilmesi için hidrolojik, meteorolojik, hidrolik, topografik, jeolojik veriler ile birlikte proje gerekleri, maliyet-fayda analizleri de dikkate alınmalıdır. Ayrıca yapılacak olan çalışmalarda aşağıdaki maddeler de göz önünde bulundurulmalıdır (Sucu ve ark., 2007):

- (1) Akış hidrografına ait karakteristik özellikler
- (2) Baraj öncesi oluşan taşkın sonucu meydana gelebilecek olan hasarlar
- (3) Baraj sonrası oluşan taşkın sonucu meydana gelebilecek olan hasarlar
- (4) Barajın ve dolusavağın hasar görmesi durumunda oluşabilecek zararlar
- (5) Barajın ve/veya dolusavağın boyutlarında değişiklik olması durumunda oluşabilecek hasar veya zararlar
- (6) Dolusavak kapasitesinin arttırılması için ihtiyaç duyulan ilave maliyet

(7) Dipsavak, santral binası gibi diğer debi boşaltım yapıları ile dolusavağın birlikte kullanılması durumunda oluşabilecek etkiler.

Dolusavakta meydana gelecek bir yetersizlik sonucu baraj rezervuarındaki suyun kret üzerinden aşması olasılığı yüksektir. Dolusavaklarda yetersizliğe neden olabilecek durumlar Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Dolusavakta yetersizliğe neden olabilecek durumlar (Yenigün ve Yüzgöl, 2014).

Toprak dolusavak kanallarında meydana gelen kırılmalar genellikle baraj için işlevsel bir sorun oluşturmazken, beton kaplı dolusavaklarda meydana gelen düzensiz oturmalar, betondaki büzülme, beton tabakasının yer değiştirmesi, aşırı zemin ve su basıncı sonucu meydana gelen kırılmalar işlevsel sorunlar oluşturmaktadır (Yenigün ve Yüzgöl, 2014).

Kapaklı dolusavaklar, baraj haznesindeki suyu kapakları vasıtasıyla yükselten yapılardır. Özellikle baraj haznesindeki su seviyesinin sabit tutulması istenen tesislerde kullanılmaktadırlar. Kapakların kısmen kaldırılmasıyla taşkın debisi güvenli bir şekilde mansaba aktarılırken su kotu sabit kalır ve enerji üretilen tesislerde bu

sayede suyun düşü kotu değişmez. Uygulamada silindir kapaklar, radyal kapaklar gibi farklı tiplerde kapaklar bulunmakta olup, en çok kullanılan ise basit ve ekonomik olmaları nedeniyle radyal kapaklardır. Radyal kapaklar, hafif olmaları nedeniyle daha düşük kaldırma kuvvetine ihtiyaç duymakta ve dolayısıyla çalıştırma mekanizmaları daha kolay ve basit olmaktadır. Ayrıca radyal kapakların geometrisi hidrolik karakteristiklere daha çok uygunluk sağlamaktadır. Radyal kapakları, deşarj debisinin 1000 m³/sn' den daha büyük olduğu barajlarda kullanmak uygun olmaktadır (Sucu ve ark., 2007).

Kapaklı dolusavakların sahip olduğu risk kapaksız dolusavaklara oranla daha büyük olmakta ve bu risk projelendirme aşamasında göz önüne alınan hidrolojik verilerin yetersizliği oranında artmaktadır (Yıldız, 1992).

Dolusavak kapaklarının düzensiz çalışması veya hiç çalışmaması sonucu geçmişte birçok baraj kazası meydana gelmiştir. Bu nedenle, baraj güvenliği konusunda kapaklı dolusavakların kapaklarının yetersiz çalışması ve kapakların hiç çalışmaması riski de göz önüne alınması gereken önemli bir konudur. 1985 yılında Seyhan Barajı'nda dolusavak kapaklarından birisinin kopması bu duruma ülkemizden bir örnektir (Yenigün ve Yüzgöl, 2014).

Dolgu barajlardaki dolusavak kapaklarının işletme dışı kalarak açılmaması sonrası suyun barajın üzerinden aşması durumu, baraj yıkılmasına sebep olabilecek en riskli durumlardandır. Barajdaki dolusavak kapaklarının hatalı işletilmesi sonucu da mansapta farklı problemler ortaya çıkabilmektedir. Dolusavakların belirli mevsimlerde daha sık çalıştırılması nedeniyle, dolusavakların bakımı, personellerin deneyimli olması ve dolusavak kapaklarının işletme güvenliğinin sağlanması gibi konular gündeme gelmektedir. Ayrıca dolusavak kapaklarının daha az çalıştırılacağı düşünöldüğü koşullarda, kapakların periyodik işletme testlerinin yapılması, ani tehlike durumlarında dolusavak kapaklarının işletme dışı kalmaması açısından oldukça önemli bir konudur. Projedeki dolusavak kapaklarının büyük boyutlara sahip olması durumunda ise dolusavak yapısının oturduğu sağlam olmayan kaya veya zemin ortamı ve orta ayaklarda oluşabilecek genleşmeler de işletme açısından problemlere neden olabilecektir. Sismik olaylar sonucu kapaklı dolusavaklarda sıkışma riski de bulunmaktadır. Bu riski en aza indirmek amacıyla dolusavak kapaklarının tek parçalı rijit çerçeveler içerisine yerleştirilmesi ve büyük boyutlarda az sayıda kapak yerine uygun boyutlarda daha fazla kapak

projelendirilmesi tavsiye edilmektedir. Deprem sonrası oluşabilecek elektrik kesilmesi, haberleşme hatlarındaki kopukluklar, taşkın zamanındaki panik koşulları gibi olağanüstü koşullarda kapaksız dolusavaklar gelen taşkın debisinin mansaba güvenli bir şekilde aktarılmasında problem yaratmamaktadır (Yıldız, 1992).

Kapaklı dolusavaklarda, deşarj anında yalnızca bir kapağın işletilememesi sonucu baraj kreti üzerinden suyun aşması engellenecek olsa bile, kapakların asimetrik olarak işletilmesi sonucu dolusavağın deşarj kanalında ve barajın mansabında sorunlar ortaya çıkabilecektir. Deşarj esnasında yapılan asimetrik işletme sonucu tünelli dolusavaklarda tünel güvenliğini stabilite açısından tehlikeye sokacak akım koşulları meydana gelebilmektedir. Kapakların önlerinde oluşan vorteksler kapaklı dolusavakların işletilmesinde karşılaşılan bir diğer problem olarak ortaya çıkmaktadır. Kapaklı dolusavaklar vasıtasıyla büyük debiler deşarj edilirken, batıklık oranının azaldığı büyük kapak açıklıklarında, dolusavak yaklaşım kanalında oluşan üniform olmayan akım koşulları dolusavak kapaklarının ön kısmında şiddetli vortekslere neden olabilmektedir. Oluşan bu vorteksler ise kapaklar üzerinde hidrodinamik yükler oluşturmakta ve vibrasyona neden olarak kapak güvenliğini büyük oranda tehlikeye düşürmektedir. Kapaklı dolusavak bulunan barajların güvenliği amacıyla detaylı ve kesin işletme talimatları hazırlanmalıdır. Bu talimatların içeriğinde olası insan hataları ve mekanik arızalar dikkate alınmalı, söz konusu tehlikenin önlenmesi amacıyla ani tehlike durumuna ait açıklamalar yer almalıdır (Yıldız, 1992).

Barajlar ve savaklarının boyutlandırılması ve projelendirilmesinde, geçmiş yıllara ait yağış ve akım ölçümlerinin göz önüne alınmasının yanında iklim değişikliğinin etkilerinin de hesaplara yansıtılması risk ve emniyet hesaplamalarında daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Projelendirme aşamasında iklim değişikliğinin etkilerinin göz önüne alınmadığı barajların dolusavaklarında öngörülemeyen riskler bulunduğu unutulmamalıdır (Şen, 2007).

Barajların işletilmelerini ve güvenliklerini tehlikeye sokabilecek bir diğer durum ise baraj havzasındaki kar ve buzulların beklenen zamandan daha önce eriyerek baraja hesap edilenden fazla su akışı getirmeleridir. Baraj işletilmesinde, hesap edilenden fazla olan bu suların bir an önce deşarj edilerek, daha sonra gelecek sular için gerekli hacimlerin baraj rezervuarında hazırlanması önemli bir konudur. Ayrıca baraj havzasındaki buzulların havzadaki dar kesitlerde birikerek buzdan bir set oluşturmaları ve bu setlerin aniden kırılarak veya eriyerek baraja planlanandan fazla su dalgalarının

yersiz ve zamansız gelmelerine neden olmaları baraj güvenliğini tehlikeye sokarak barajdaki risklerin artmasına sebep olmaktadır (Şen, 2007).

Dolusavağın beton yüzeylerindeki olası geometrik düzensizlikler, akan suyun basıncını düşürerek milyonlarca kabarcık oluşmasına neden olur. Bu düşük basınçlı ve kabarcıklı kısım normal basınçlı akan su durumuna geçerken kabarcıklar ortadan kalkar ve büyük yerel basınçlar meydana gelir. Bu büyük yerel basınçlar ise beton yüzeyinde kaviteasyona neden olur. Bu nedenle dolusavaktaki yüksek hızlı su akışıyla temasta olan beton yüzeyler için kaviteasyondan koruma amacıyla özel önlemler alınması gerekmektedir (Sucu ve ark., 2007).

Orifis dolusavaklarda simetrik olarak tasarlanan en az iki adet orifisin çalışması ile enerji kırılarak suyun tahliyesi sağlanmaktadır. Orifis dolusavakların çeşitli nedenlerle simetrik olarak çalışmaması durumunda mansap yamaçları yüksek hıza sahip su jetlerine maruz kalmakta ve bu durum yamaç stabilitesini tehlikeye sokmaktadır (Sucu ve ark., 2007).

Barajın dolusavağı ya da tabanı darlaştırıcı yapıları üzerindeki ve dolusavak kapaklarının altındaki akışlar sel rejiminde olmaktadır. Bu nedenle buralarda yüksek hızlar oluşmakta ve sel rejimli akıştan nehir rejimli akışa geçiş sırasında hidrolik sıçrama oluşmaktadır. Yüksek hızların ve hidrolik sıçramanın olduğu taban ve kıyı noktalarında ise oyulmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle dolusavak, dip savak ve kapakların mansabında oluşacak olan oyulmaları önlemek amacıyla düşü havuzları inşa edilmektedir (Sucu ve ark., 2007).

2.3. Baraj Güvenliği

Türk Dil Kurumu (TDK) sözlüğünde güvenlik kelimesinin anlamı “kişilerin korkusuzca yaşayabilmesi durumu, emniyet” olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımdan yola çıkarak baraj güvenliği terimi, barajların emniyetli olması, baraj mansabında bulunan kişilerin korkusuzca yaşayabilmesi olarak açıklanabilir. Bir barajın uzun yıllar sorunsuz ve verimli bir şekilde hizmet verebilmesi için baraj ve yardımcı yapılarının güvenliğinin sağlanması, bakımlarının düzenli olarak yapılması ve barajın sürekli olarak izlenmesi gereklidir. Barajların inşaat, işletme, bakım kalitesi ve havza alanı gibi özelliklerindeki değişiklikler barajların servis ömrünü ve baraj güvenliğini etkilemektedir. Daha güvenli bir yapı yapmak için ilave maliyetler gerekmektedir. Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD) tarafından 1987 yılında

yayınlanmış olan kılavuzda “Her bir baraj için, baraj güvenliği ile ekonomi arasında bir denge bulunmalıdır.” denilmektedir. Dolayısıyla baraj yapılarının tasarımında belirli kabul edilebilir riskler göz önüne alınarak tasarımlar yapılmakta, yapıların kabul edilebilir oranda güvenli olmasının yanında ekonomik olması da sağlanmaktadır.

Ülkemizde çok ciddi yatırımlar ile hayata geçirilen ve çok büyük öneme sahip olan barajlarımızın güvenilirlik kontrollerinin yapılması büyük önem arz etmektedir. Yaşanması muhtemel bir enerji krizi ile beraber uluslararası kamuoyunda sürekli gündemde olan su hakları konuları da mevcut su kaynaklarının çok iyi değerlendirilmesini, mevcut tesislerin çok dikkatli ve verimli işletilmesini ve risk faktörlerinin en aza indirgenmesini gerektirmektedir (Yenigün, 2007). Ancak, ülkemizdeki barajların gözlem ve denetim faaliyetleri bugüne kadar istenilen seviyede olmamıştır.

Baraj güvenliği; barajların sınıflara ayrılmasından, baraj proje kriterlerine, baraj yetersizliklerinden, baraj yıkılmalarına, barajların muayenesinden, güvenlik programlarına, yıkılma analizlerinden, barajların izlenmesine, baraj ölçüm sistemlerinden ölçüm âletlerine kadar çeşitli hususları kapsamaktadır (Ağralıoğlu, 2011).

Bir barajın emniyeti, barajın inşası aşamasındaki uygulanan gerçek koşullar ile projelendirme aşamasında göz önüne alınan proje koşulları arasındaki farklılıklar ve hasar oluşumuna neden olabilecek parametreler ortaya konularak değerlendirilebilir. Barajın emniyetli olarak tanımlanabilmesi için, barajın işletme ömrü boyunca maruz kalabileceği tahribat ve dayanmak zorunda olduğu tüm yıkım senaryolarının dikkate alınarak projelendirilmesi ve işletilmesi gerekir (Aksu ve Ağca, 2009).

Baraj güvenliği, yalnızca mevcut barajların güvenliği açısından değil, yeni inşa edilecek olan barajların tasarım aşamasından işletme ve bakım aşamasına kadar olan tüm süreçlerde göz önüne alınması gereken önemli bir konudur.

İyi bir baraj güvenliği planlamasının ilk ve en temel adımı baraj sisteminin en doğru şekilde tanınmasıdır. Baraj değerlendirmesinde tasarım bilgileri, arazi gözlemleri, periyodik bakım ve işletme kayıtları kullanılabilir. Baraj ve yardımcı yapıları, havza özellikleri, mansap koşullarının bir biri üzerine olan etkilerinin değerlendirilmesi baraj sisteminin bütünsel olarak analizine imkân sağlamaktadır. Baraj sisteminin tanınmasından sonra planlama aşamasında izlenecek adımlar baraj ve yardımcı

yapılarının güvenliğini tehdit eden durumların tespiti, çözüm önerileri ve sistemin takibi olarak sıralanabilir (Ağırlioğlu ve ark., 2018).

Barajın planlama aşamasından itibaren projelendirme, inşa, işletme ve periyodik bakım aşamaları bilgileri ve işletme aşamasında barajın işletilmesini engelleyen ya da zorlaştıran hasarlar ile varsa onarım çalışmalarına ait tüm bilgi ve belgelerin kayıt altına alınması, yorumlanması ve alınması gereken tedbirler olması durumunda bu tedbirlerin belirlenmesi baraj emniyetinin sürekliliğinin sağlanması açısından büyük öneme sahiptir. Kayıt altına alınan bu bilgiler sayesinde barajda meydana gelmesi muhtemel problemlerin önüne geçilmesinin yanında diğer barajların davranışları konusunda bilgi birikimi sağlanarak barajların projelendirme, inşa, işletme ve bakım aşamalarında yeni düzenlemeler yapılması sağlanmaktadır. Baraj emniyeti programı kapsamında planlama, projelendirme, inşa, işletme ve periyodik bakım aşamalarında potansiyel risklerin tanımlanması ve bu risklerin kabul edilebilir seviyelere kadar indirilmesi amacıyla alınması gereken tedbirlerin belirlenmesi ve mevcut tedbirlerin iyileştirilmesi için yapılması gereken çalışmaları içeren baraj emniyeti dosyası hazırlanmalıdır (Kasalak ve ark., 2012).

Barajların yıllar geçtikçe yaşlanması, yıpranması ve eskimesi ile birlikte yıkılma ihtimalleri de artmaktadır. Yaşlanan ve eskiyen baraj sayısına paralel olarak tehlike de zamanla büyümektedir. Ancak yıllar içerisinde artan işletme ve bakım tecrübeleri, gelişen ölçüm ve değerlendirme teknolojileri ile birlikte bu önemli tehdit unsurunun kontrol altına alınması sağlanabilmektedir. Bütün bu koşullar göz önüne alındığında barajların düzenli olarak bakım, onarım ve güvenlik kriterlerinin tespitinin yapılması, ele alınması gereken ulusal bir konu olarak öne çıkmaktadır (Ağırlioğlu ve ark., 2018). Ayrıca barajların mevcut durumlarının bilinmesinin ve takip edilmesinin yanında zamanla değişen koşullar altındaki davranışlarının ne olacağının önceden bilinmesi büyük öneme sahiptir.

Baraj yıkılmaları ve barajlarda oluşan hasarlar ile ilgili olarak yapılmış araştırmalar ve güncel veriler göz önüne alındığında, hasar ve yıkılmalarda barajın yaşı, tipi ve büyüklüğü ile ilgili olarak şunlar söylenebilir;

Barajlarda görülen yıkılma ve hasarların %50'den fazlası baraj işletmeye alındıktan sonraki ilk beş yıl içerisinde meydana gelmiştir. Bu da bize barajların yaşlı olmasının yıkılmada öncelikli faktör olmadığını göstermektedir. Genel itibarıyla, 1940 yılı

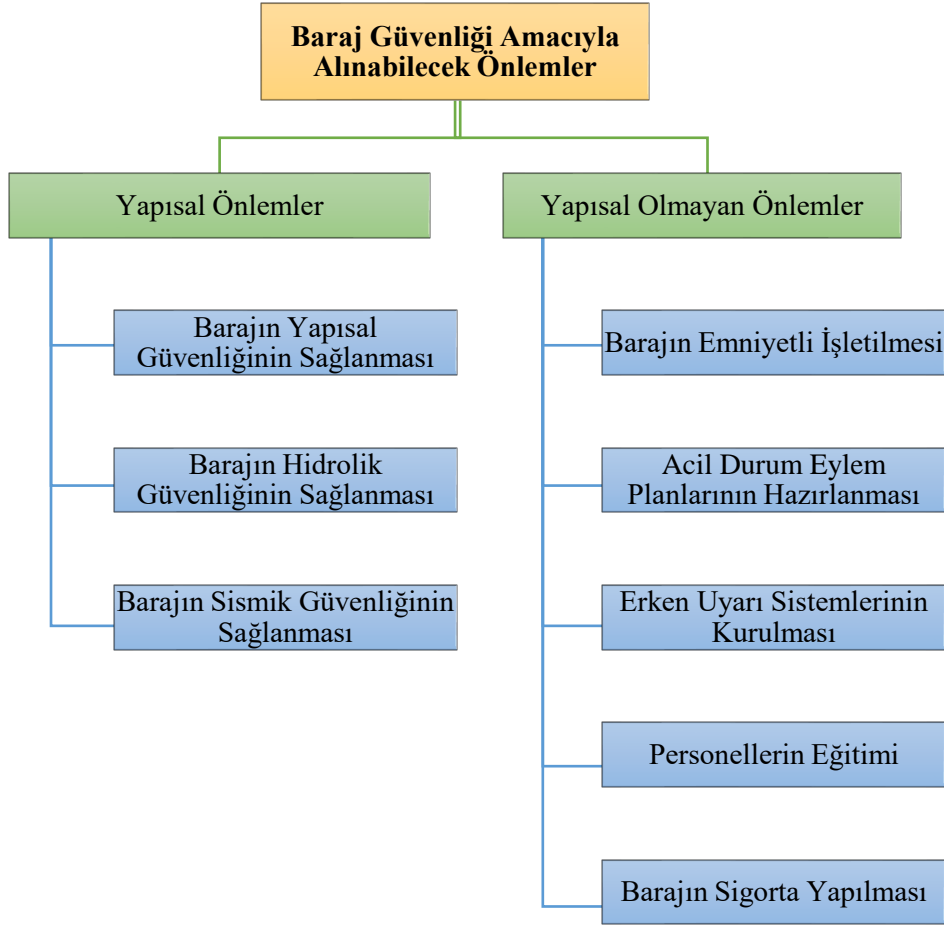
sonrası inşa edilmiş barajların yıkılma olasılığı, daha eski barajlara göre azalmıştır. Kaya dolgu ve payandalı barajların yıkılma olasılığı, diğer tip barajların yıkılma olasılığından daha fazla olup beton barajların yıkılma olasılığı diğer tip barajların yıkılma olasılığı ile hemen hemen aynıdır (Yenigün ve Sepetçioğlu, 2012).

Yüksekliği 15 m' den az olan barajların yıkılma olasılıkları yükseklikleri 50 m' den daha fazla olan barajlarınkinden daha yüksektir. Bunun sebebi yüksek barajlarda; projelendirme, inşa ve işletme konularında daha çok dikkat gösterilmesidir. Öte yandan farklı yükseklikteki barajların yıkılma risklerinin hemen hemen aynı olasılıklar göstermesi, barajın yüksekliğinin yıkılma risklerinde belirleyici olmadığını göstermektedir (Yenigün ve Sepetçioğlu, 2012).

Baraj yıkılması sonucu can kayıpları, çevre hasarları, mülk hasarları, altyapı hasarları, enerji üretiminin durması, sosyo-ekonomik ve politik etkiler meydana gelmektedir. Bu sonuçlar alınacak yapısal ve yapısal olmayan önlemlerle azaltılabilmektedir.

Yapısal önlemler esas olarak; taşkın güvenliği, deprem emniyeti ve barajın koşulları gibi barajın güvenliği ile ilgili tedbirlerdir. Yapısal olmayan önlemler yapısal önlemlere göre genellikle çok daha etkilidir (Caner, 2021).

Baraj güvenliği amacıyla alınabilecek önlemler Şekil 2.11' de verilmiştir.



Şekil 2.11. Baraj güvenliği için alınabilecek önlemler.

2.3.1. Devlet Su İşlerinin baraj güvenliği politikası

Ülkemizde baraj güvenliği çalışmaları DSİ tarafından başlatılmış ancak diğer ülkelere göre bu konuda çok geç kalınmıştır. DSİ tarafından baraj güvenliği konusunda hayata geçirilmiş olan çalışmalar kronolojik olarak Şekil 2.12’ de özetlenmiştir.

DSİ tarafından baraj emniyeti konusunda hayata geçirilmiş ilk çalışma Baraj Emniyeti Çalışma Programının yayımlanmasıdır. 2006 yılında yayımlanmış olan Baraj Ölçüm Cihazları Teknik Şartnamesi ve 2012 yılında yayımlanmış olan Baraj Emniyeti Rehberi günümüzde kullanılmaya devam etmektedir. 2005 yılında kurulmuş olan Baraj Emniyeti Şube Müdürlüğünün yerine günümüzde Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Dairesi Başkanlığına bağlı olarak görev yapmakta olan Ölçüm Tesisleri ve Kesin Hesap Şube Müdürlüğü bulunmaktadır.

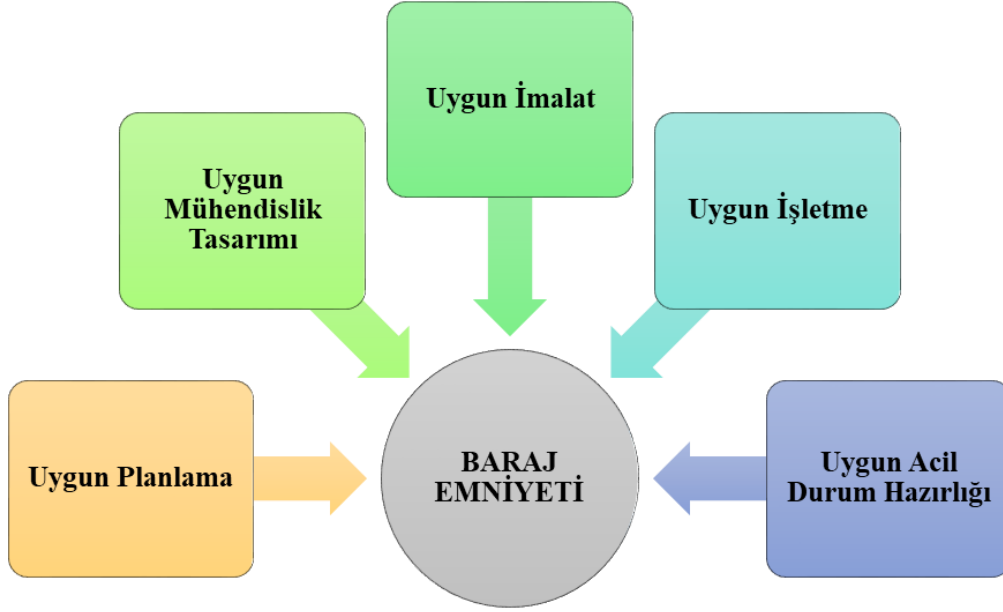


Şekil 2.12. DSİ tarafından baraj güvenliği konusunda hayata geçirilmiş olan çalışmalar.

Barajların belirli yöntem ve usullere göre kontrollerinin yapılması ve bakım-onarım ihtiyaçlarının karşılanabilmesi amacıyla örnek olarak hazırlanmış olan “Atikhisar Barajı İşletme ve Bakım Talimatı”nın DSİ Bölge Müdürlüklerine dağıtımı yapılmış ve böylelikle birçok barajın işletme ve bakım talimatı hazırlanmıştır. İşletme ve bakım talimatında baraja ait genel bilgiler, baraj tesis ve tesis ünitelerine ait karakteristik bilgiler, tesis ünitelerinin işletilmesi, baraja ait daimi ekipmanların muayene, bakımı ve onarımı ile baraj ölçüm tesis ve cihazlarına ait bilgiler bulunmaktadır (Aksu ve Ağca, 2007).

DSİ tarafından 2012 yılında yayımlanmış olan Baraj Emniyeti Rehberinin amacı, barajın planlama, projelendirme, inşaat, işletme-bakım ve acil durumlara hazır olma aşamalarında baraj güvenliğinin göz önüne alındığı Baraj Emniyet Çalışma Programının hazırlanarak uygulanmasıdır.

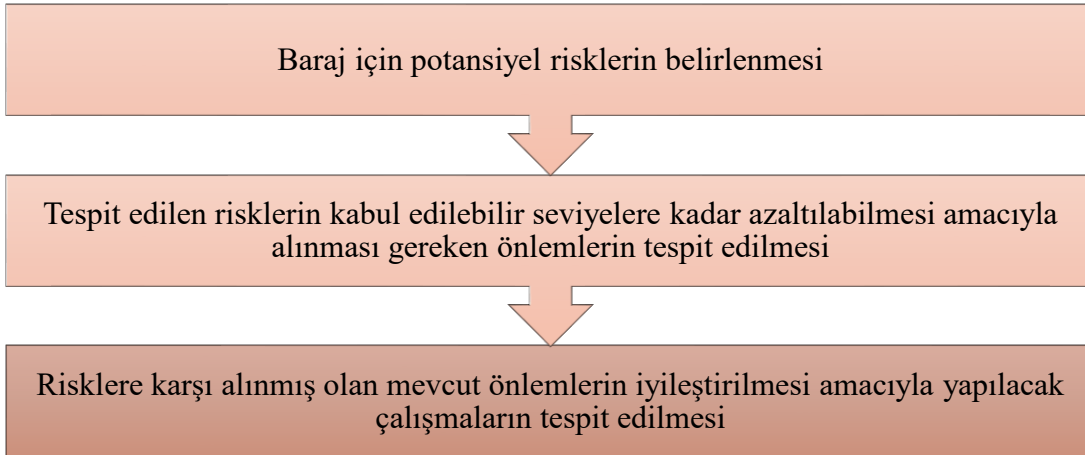
DSİ'nin baraj emniyeti politikasının temel ilkeleri Şekil 2.13' de verilmiştir.



Şekil 2.13. DSİ'nin baraj emniyeti politikasının temel ilkeleri (ENCON, 2006).

Temelden yüksekliği 15 metreden fazla olan, temelde yüksekliği 10 ile 15 metre arasında olup depolama hacmi 1 milyon m³ üzeri olan ve yıkılması durumunda büyük oranda can ve mal kaybına neden olabilecek tüm depolama tesisleri baraj emniyeti çalışma programına dâhil edilecektir (DSİ, 2012b).

Baraj Emniyet Rehberinde Baraj Emniyeti Çalışma Programının kapsamı şu şekilde ifade edilmiştir (DSİ, 2012b):



Şekil 2.14. Baraj emniyeti çalışma programının kapsamı.

2.3.2. İnşaat aşamasında olan barajlar için yapılması gereken baraj güvenliği çalışmaları

İnşaat aşamasında olan barajlar için baraj güvenliği çalışmaları kapsamında yapılması gereken işlemler aşağıda liste halinde verilmiştir (Aksu ve Ağca, 2007):

- 1) İhtiyaç duyulan baraj ölçüm tesislerinin kurulması ve ekipmanların yerleştirilmesi, ilk okumalarının yapılması ve her zaman çalışır halde bulundurulması,
- 2) Yerleştirilmesi düşünülen ölçüm ekipmanları için üretici firma garantisi ve sürekli olarak gözetim hizmeti talep edilmesi,
- 3) Farklı firmalara ait ölçüm ekipmanlarının kullanılmaması, bu durum mümkün olmuyorsa okuma üniteleri arasında uyum sağlanması,
- 4) İnşaat bitiminde baraj güvenliği dosyasının hazırlanması,
- 5) İnşaat aşamasında karşılaşılan sorunlar ve çözümlerini kapsayan her türlü belge, rapor vb. dokümanların derlenmesi.

Baraj güvenliği dosyasında olması gereken bilgiler şunlardır:

- 1) Uygulama projeleri,
- 2) As-built projeler,
- 3) Projede yapılan değişiklikler,
- 4) Malzemede yapılan değişiklikler ve laboratuvar sonuçları,
- 5) Kalibrasyon belgeleri,
- 6) TSE belgeleri,
- 7) Uygulama aşamasına ait fotoğraf, video vb. kayıtlar,
- 8) Ölçüm tesislerine ve ekipmanlara ait sıfır okumalar.

2.3.3. İşletme aşamasında olan barajlar için yapılması gereken baraj güvenliği çalışmaları

İşletme aşamasında olan barajlar için baraj güvenliği çalışmaları kapsamında yapılması gereken işlemler aşağıda liste halinde verilmiştir (Aksu ve Ağca, 2007):

- 1) Barajların konusunda uzman kişilerden oluşan heyet tarafından incelenmesi ve baraj güvenliği raporlarının hazırlanması,
- 2) Baraj güvenliği çalışmalarından sorumlu birimlerin kurulması ve bu birimlerin görev ve sorumluluklarının net bir şekilde belirlenmesi,
- 3) Barajın mansabındaki koşullara bağlı risk durumlarına göre barajda gerekli incelemelerin yapılması,
- 4) Baraj rezervuarındaki suyun farklı nedenlerle ani bir şekilde boşalmasına bağlı olarak taşkın haritalarının hazırlanması,
- 5) Uygulanacak farklı yıkılma senaryolarına bağlı olarak meydana gelecek olan taşkın baraj mansabındaki seyri, su derinliği, su hızı, meydana gelmesi

muhtemel can kaybı, üst yapı, altyapı, tarımsal alan vb. ekonomik kayıplar gibi veri ve kayıpların belirlenmesi,

- 6) Yüksek risk faktörüne sahip barajların membasında, mansabında ve havzasında alınabilecek önlemler ile ilgili yasal düzenlemelerin yapılması,
- 7) Yüksek risk faktörüne sahip barajlarda kısa, orta ve uzun vadeli süreçlerde yapılabileceklerin belirlenmesi,
- 8) Yüksek risk faktörüne sahip barajlardan başlayarak tüm barajlar için baraj güvenliği dosyalarının hazırlanması,
- 9) Yüksek risk faktörüne sahip barajlarda erken uyarı sistemlerinin kurulması,
- 10) Yönetimler, idareler, müdürlükler, kuruluşlar vb. yetkili tüm birimler arası koordinasyonu sağlayacak ilgili düzenlemelerin yapılması,
- 11) CBS ortamında veri bankalarının oluşturulması,
- 12) CBS ve uzaktan algılama çalışmaları ile hidrolojik olayların önceden hızlı bir şekilde belirlenebilmesi için gerekli altyapıların hazırlanması,
- 13) İşletmedeki barajların hidrografik etütlerinin bir program dâhilinde yapılması ve topoğrafik haritaların hazırlanması.

2.3.4. Baraj güvenliği kapsamında yapılması gereken diğer çalışmalar

Baraj güvenliği kapsamında yapılması gereken diğer çalışmalar aşağıda liste halinde verilmiştir (Aksu ve Ağca, 2007):

- 1) Baraj güvenliği yönetmeliğinin yayınlanması,
- 2) Baraj güvenliği rehberlerinin yayınlanması,
- 3) DSİ bölge müdürlüklerinde baraj güvenliği başmühendisliği birimlerinin kurulması,
- 4) Barajlar için planlama aşamasında Acil Eylem Planları dâhil bütün yapılması gerekenlerin belirlenmesi,
- 5) Baraj güvenliği konusunda görevli teknik personellerin üniversiteler aracılığıyla eğitim almasının sağlanması,
- 6) Baraj güvenliği konulu bilgilendirme toplantılarının yapılması,
- 7) Yap-İşlet modeli ile inşa edilen barajların yasal durumu, sorumlulukları ve yapılabilecekler hakkında gerekli çalışmaların yapılması,
- 8) Baraj güvenliği amacıyla ödenek ayrılması.

2.4. Barajlarda Risk Yönetim Süreci

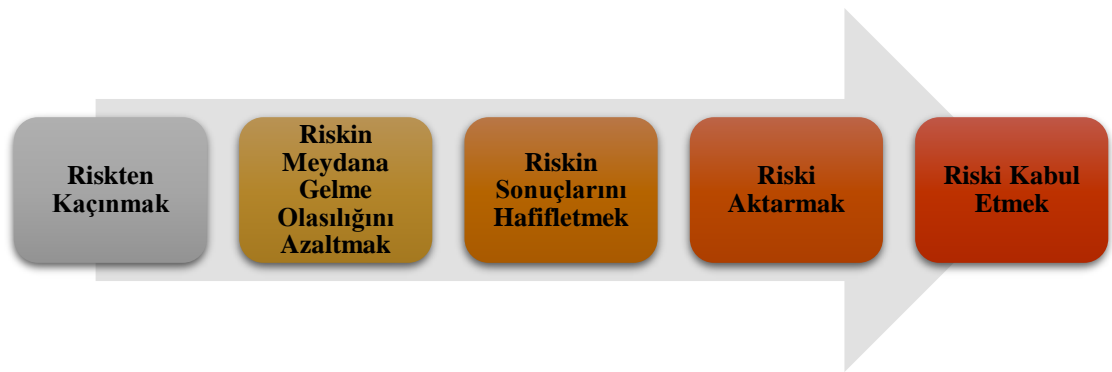
Risk analizi, barajlarda risk olarak kabul edilen durumların sonuçlarının değerinin ya da derecesinin belirlenmesidir. Risklerin değerinin ya da derecesinin belirlenmesi ile can veya mal kaybı gibi istenmeyen sonuçlara ne derecede yakın olunduğu görülebilmekte ve riskler karşısında alınması gereken önlemlerin öncelikleri belirlenebilmektedir. Ancak bilinmelidir ki riskin net değerinin, zamanının ve sonuçtaki etkisinin büyüklüğünü gerçek anlamda tam olarak belirlenememektedir (Yenigün ve Erkek, 2002).

Baraj güvenliği açısından risk yönetim süreci Şekil 2.15' te gösterildiği gibi üç ana başlıkta toplanabilir.



Şekil 2.15. Barajlarda risk yönetim süreci.

Tespit edilen riskler bertaraf edilemiyorsa riskin azaltılması yoluna gidilir. Barajlarda riskin azaltılması beş farklı yolla yapılabilmektedir. Barajlarda riskin azaltılmasında kullanılan yöntemler Şekil 2.16' da verilmiştir.



Şekil 2.16. Barajlarda riskin azaltılması yöntemleri (Yenigün ve Erkek, 2002).

Riskten kaçınmaya örnek olarak riski bertaraf etmek amacıyla baraj inşası öncesi tüm önlemleri almak, riskin meydana gelme olasılığını azaltmaya örnek olarak yapısal ölçümler alınması, güvenlik yönetimi çalışmaları yapılması, periyodik kontroller

yapılması, riskin sonuçlarını hafifletmeye örnek olarak erken uyarı sistemleri kurulması, riski aktarmaya örnek olarak sözleşmeye dayalı düzenlemeler yapılması, sigorta yaptırılması, riski kabul etmeye örnek olarak risk azaltıldıktan veya aktarıldıktan sonra geri kalan risklerin kabul edilmesi verilebilir (Yenigün ve Erkek, 2002).

Barajların inşa ve işletme aşamalarının risk mühendisliği mantığıyla göz önünde bulundurulması, her türlü önlem, müdahale ve iyileştirme sürecine veri oluşturması, sürekli güncellenen bilgi ve belgelerle dinamik bir özellik kazanması gerekmektedir (Yenigün ve Erkek, 2002).

2.4.1. Barajlarda risk analizi

Planlanmakta olan barajların risk grubunun bilinmesi baraj emniyeti bakımından büyük öneme sahiptir. Risk grubu yüksek ve çok yüksek olarak tespit edilen barajlarda planlama aşaması ve sonrasında daha kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır.

Barajlarının toplam riski, baraj ve yardımcı yapılarının risk oranına ve baraj yerinin sismik tehlikesine bağlı olarak değerlendirilmektedir.

Daha önce inşa edilmiş olan barajların en uygun yerlere yapılması ve ekonomik ömürlerinin ya dolmuş ya da dolmak üzere olması ve yeni inşa edilecek olan barajların daha az uygun yerlere yapılmak zorunda kalınması barajlarda risk faktörünü daha da arttırmaktadır (Uzel ve ark., 2012).

Ülkemizde bulunan barajların büyük bir bölümü yaşlanma dönemine girmiş ve bu barajlardan bazıları büyük can ve mal kayıplarına sebep olabilecek kadar yerleşim bölgelerine yakın inşa edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı söz konusu barajların üzerinde yapılan çalışmaların kapsamının genişletilerek baraj güvenliklerinin detaylı bir şekilde gözden geçirilmesi ve baraj risk analizlerinin yapılması gerekmektedir (Güler ve ark., 2012).

Baraj toplam riski üzerinde baraj cinsi önemli etkiye sahiptir. Deprem yükü altındaki dolgu barajlarda güvenlik problemi, gövde dolgusu ve temel zeminindeki dayanım azalmasından kaynaklı stabilite yetersizliği ya da aşırı deformasyonların meydana gelmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır (Türköz ve ark., 2007).

Baraj ve yardımcı elemanlarının toplam riski, çeşitli tehlike katsayıları göz önünde bulundurularak analiz edilmektedir. Bu tehlike katsayıları üç gruba ayrılmaktadır (Ağralıoğlu, 2011):

- a) Yapıyla ilgili katsayılar: Oturma, sızma, borulanma vb.
- b) Baraj yeriyile ilgili katsayılar: Sismik hareketler, toprak kayması (heyelan), kaya düşmesi, vb.
- c) Taşkın ile ilgili katsayılar.

Baraj güvenliğinin arttırılabilmesi için bu tehlike katsayılarının ayrıntılı olarak incelenmesi, gerekli tasarım ve inşaat tedbirlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Sabotaj ve harp gibi öngörüleemeyen bazı tehdit faktörleri de bulunmaktadır. Maalesef klasik risk analizi yöntemlerinde bu tehditler göz önüne alınmamaktadır. Risk analizi yöntemi ile baraj sistemindeki en zayıf eleman veya elemanlar belirlenmekte, baraj güvenliği ise bu zayıf elemanların iyileştirilmesi ile arttırılabilmektedir (Ağralıoğlu, 2011).

Barajların toplam riskini çözümlenme metotları esas itibariyle iki ayrı bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

- (1) Baraj ve yardımcı elemanlarının risk derecesi,
- (2) Baraj yerinin sismik risk derecesi.

Baraj yerinin sismik riski, doruk yer ivmesi PGA (peak ground acceleration) şeklinde ifade edilebilir. Baraj ve yardımcı elemanlarının risk derecesi ise baraj haznesinin hacmine, barajın yüksekliğine, baraj mansabındaki insan boşaltma ihtiyacına ve baraj mansabında oluşabilecek muhtemel hasarlara bağlıdır. Baraj ve yardımcı elemanlarının toplam risk analizinin yapılabilmesi için çeşitli metotlar bulunmaktadır. Bu metotlarda genellikle sismik risk ve baraj ve yardımcı elemanlarının risk dereceleri ayrı ayrı değerlendirilmektedir. Son zamanlarda ise bu iki risk derecesinin birleştirilmesiyle baraj toplam riski tek bir çalışma ile belirlenmektedir.

2.4.1.1. ICOLD metodu

ICOLD Metodunda baraj yerinin sismik riski ile baraj ve yardımcı elemanlarının riski ayrı başlıklar altında değerlendirilmektedir. Bu yöntemde yapı tipinden bağımsız olarak baraj yerinin sismik tehlikesi dört grupta sınıflandırılmıştır. Ayrıca bu yöntemde barajların potansiyel riskleri yapısal etkiler ve mansapta oluşabilecek sosyoekonomik etkiler olmak üzere iki ayrı başlıkta incelenmektedir. Yapısal etkiler,

barajın rezervuar kapasitesine ve baraj yüksekliğine bağlıdır. Sosyoekonomik etkiler, mansaptaki insan boşaltma gerekliliği ve mansapta oluşabilecek potansiyel hasara bağlıdır. Barajların toplam risk katsayısı, bu dört etkinin katsayılarının toplamı olarak hesaplanır ve barajın risk sınıfı belirlenir. Bu risk sınıflaması ve sismik risk parametreleri ile kullanılacak risk analiz yöntemi seçilir (Tosun ve ark., 2007a).

ICOLD tarafından yayınlanmış olan ve barajın potansiyel riskinin derecelendirmesinde kullanılan puanlama Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2. ICOLD metodunda kullanılan potansiyel risk puanlaması (Ağralıoğlu, 2011).

Risk Faktörü	Şiddetli		Yüksek		Orta		Düşük	
	Değeri	Puanı*	Değeri	Puanı	Değeri	Puanı	Değeri	Puanı
Hacmi (hm ³)	> 120	6	120 - 1	4	1 - 0,1	2	< 0,1	0
Yüksekliği (m)	> 45	6	45 - 30	4	30 - 15	2	< 15	0
İnsan Boşaltma İhtiyacı (İnsan Sayısı)	> 1000	12	1000 - 100	8	100 - 1	4	Yok	0
Mansapta Muhtemel Hasar	Yüksek	12	Orta	8	Düşük	4	Yok	0

* Puanı: Risk katkısını gösteren ağırlık puanı

Barajın toplam risk katsayısının hesaplanmasında kullanılan formül aşağıda verilmiştir.

$$\text{Toplam Risk Katsayısı} = \text{Hacim RP} + \text{Yükseklik RP} + \text{BİS RP} + \text{MPH RP} \quad (2.2)$$

RP: Risk Puanı, BİS: Boşaltılacak İnsan Sayısı, MPH: Mansaptaki Potansiyel Hasar
Mansaptaki insan boşaltma ihtiyacı ve mansapta oluşması muhtemel potansiyel hasar risk faktörleri yapılacak baraj yıkılma analizleri sonucu elde edilecek sonuçlara göre değerlendirilmelidir.

Risk faktörleri belirlenirken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır (DSİ, 2012a):

- Mansap kısmındaki insan boşaltma ihtiyacı incelenirken, baraj yıkılması sonrası su altında kalacak olan taşkın alanlarında bulunan geçici insan varlığından ziyade kalıcı ve yoğun nüfusun bulunduğu alanlar dikkate alınmalıdır.
- Baraj için en kötü durum göz önüne alınarak tek bir risk faktörü belirlenmelidir.

- Eğer barajda meydana gelecek kontrolsüz su tahliyesi sonrası oluşacak taşkın mansap kısmında bulunan diğer barajlarda öngörülemeyen su tahliyesine sebep oluyorsa bu barajların oluşturacağı risk de göz önünde bulundurulmalıdır.

Hesaplanan toplam risk katsayısı göz önünde bulundurularak barajların oluşturacağı risk dört sınıfa ayrılmaktadır. Bu risk sınıfları Tablo 2.3' te verilmiştir.

Tablo 2.3. ICOLD metodu toplam risk katsayısına bağlı risk sınıfları (Ağırlioğlu, 2011).

Toplam Risk Katsayısı	Risk Sınıfı	Risk Derecelendirmesi
0 - 6	I	Düşük Risk Grubu
7 - 18	II	Orta Dereceli Risk Grubu
19 - 30	III	Yüksek Risk Grubu
31 - 36	IV	En Yüksek Risk Grubu

ICOLD metodunda tavsiye edilen deprem tehlike sınıfları Tablo 2.4' te gösterilmiştir.

Tablo 2.4. ICOLD metodu deprem tehlike sınıfları (Ağırlioğlu, 2011).

Durum	Tehlike Sınıfı	Tehlike Derecesi
Doruk Yer İvmesi (DYİ)* < 0,10g	I	Düşük
0,10g < DYİ < 0,25g	II	Önemli
DYİ > 0,25g (Baraj yerinin 10 km mesafesinde aktif fay yok)	III	Yüksek
DYİ > 0,25g (Baraj yerinin 10 km mesafesinde aktif fay var)	IV	Şiddetli

* Doruk Yer İvmesi (DYİ): Peak Ground Acceleration (PGA).

2.4.1.2. Bureau metodu

Bureau metodunda, baraj tipi, baraj yaşı, baraj yüksekliği, baraj rezervuar hacmi, barajın mansap için oluşturduğu risk ve baraj hassasiyeti göz önünde bulundurularak barajın toplam risk faktörü belirlenir (Tosun ve ark., 2007a).

Toplam risk katsayısında (TRK) iki farklı bileşeni içeren bir mansap tehlike katsayısı bulunmaktadır. Bureau metodunda mansaptaki insan boşaltma ihtiyaçlarının ve mansapta oluşması muhtemel hasarın risk katsayılarının hassas bir şekilde elde edilmesinin zor olduğu durumlarda, mansap tehlike katsayısının belirlenebilmesi için basit bir sınıflandırma şekli önerilmiştir. Toplam risk katsayısı şöyle yazılabilir (Ağırlioğlu, 2011):

$$TRK = [(Yapı Etkisi Risk Katsayısı) - (Mansap Etkisi Risk Katsayısı)] \times ÖHK \quad (2.3)$$

$$Yapı Etkisi Risk Katsayısı = HRK + YRK + ERK \quad (2.4)$$

$$Mansap Etkisi Risk Katsayısı = MTK \quad (2.5)$$

TRK: Toplam risk katsayısı, HRK: Hacim risk katsayısı, YRK: Yükseklik risk katsayısı, ERK: Eskilik risk katsayısı, MTK: Mansap tehlike katsayısı, ÖHK: Öngörülen hasar katsayısıdır.

Bureau metodunda yapı etkisi (HRK+YRK+ERK) toplamı ile elde edilir. Ayrıca baraj büyüklüğü için tanımlanmış olan baraj hacmi ve baraj yüksekliği ile ilgili katsayılar Tablo 2.5' te ve barajın eskilik durumu ile ilgili katsayılar Tablo 2.6' da verilmiştir (Ağırlioğlu, 2011).

Tablo 2.5. Bureau metoduna dayanan baraj büyüklüğü risk katsayıları (Ağırlioğlu, 2011).

Risk Katsayısı	Toplam Risk Katsayısına Katkı Değeri (Ağırlıklı Puan olarak)							
	Şiddetli		Yüksek		Orta		Düşük	
Değeri ve Puanı	Değeri	Puan	Değeri	Puan	Değeri	Puan	Değeri	Puan
Baraj Hacmi (hm ³) (HRK)	> 62	6	62 - 1,15	4	1,15 - 0,125	2	< 0,125	0
Yükseklik (m) (YRK)	> 25	6	25 - 12	4	12 - 6	2	< 6	1

Baraj hacmi ve baraj yüksekliği ile ilgili risk katsayıları, barajların taşkın tehlikelerinin göz önüne alınmasını sağlamaktadır. Büyük hazneli ya da yüksek barajlar önemli taşkınlara sebep olabilmektedir.

Baraj eskilik risk katsayısı ile eski barajların yeni inşa edilmiş barajlara göre daha yıkılabilir olduğu göz önüne alınmaktadır. Çünkü eski barajlarda oluşan muhtemel bozulmalar, bakım eksikliği, eski ve basit inşaat metotlarının kullanılmış olması, yetersiz sıkıştırma, haznenin ölü hacminin dolmuş olması veya temel iyileştirmelerinin yetersizliği gibi durumlar bulunabilmektedir (Ağırlioğlu, 2011).

Tablo 2.6. Bureau metoduna dayanan baraj eskilik derecelendirme katsayıları (Ağırlioğlu, 2011).

Risk Katsayısı	Barajın Yapılma Tarihi					
	< 1900	1900 - 1925	1925 - 1950	1950 - 1975	1975 - 2000	> 2000
Eskilik Risk Katsayısı (ERK)	6	5	4	3	2	1

Bureau metodunda mansap tehlike katsayısı mansapta bulunan kalıcı nüfusun ve varlıkların (mal ve mülk) riskine bağlıdır. Mansap tehlike katsayısı aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Ağırlioğlu, 2011).

$$MTK = BRK + DRI \quad (2.6)$$

MTK: Mansap tehlike katsayısı, BRK: Mansap boşaltma talepleri katsayısı, DRI: Mansap hasar riski indeksidir.

Mansap boşaltma talepleri katsayısı (BRK) insan nüfusuna, Mansap hasar riski indeksi (DRI) ise taşkın alanlarındaki özel ve kamuya ait mal ve mülklere bağlıdır. Bureau bu katsayıların taşkın haritaları ve ekonomik çalışmalar sonucunda elde edilecek veriler doğrultusunda belirlenmesinin gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca bu katsayılar, yeni veriler geldikçe ve koşullar değiştikçe güncelleştirilmelidir. Bu değerler Tablo 2.7’ den doğrudan alınabilir (Ağırlioğlu, 2011).

Tablo 2.7. Bureau metodunda verilen mansap risk katsayısı.

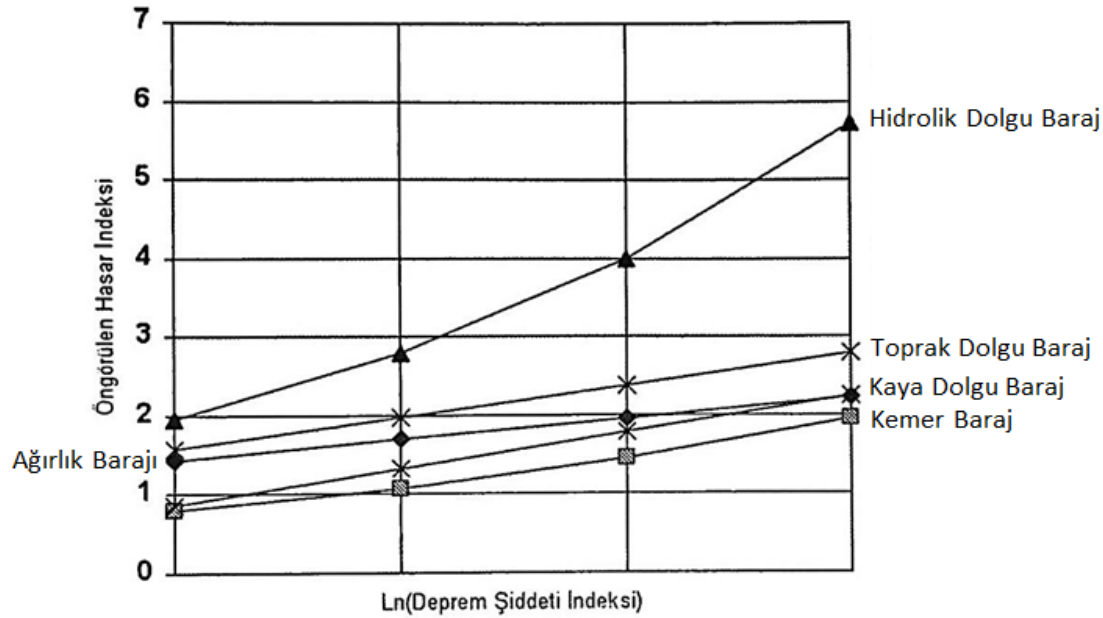
Risk Katsayısı	Toplam Risk Katsayısına Katkı							
	Şiddetli		Yüksek		Orta		Düşük	
	Değeri	Puan	Değeri	Puan	Değeri	Puan	Değeri	Puan
Boşaltılacak İnsan Sayısı (BRK)	> 1000	12	1000 - 100	8	100 - 1	4	Yok	1
Mansaptaki Hasar Riski İndeksi (MRI)	Yüksek	12	Orta	8	Düşük	4	Yok	1

Mansaptaki koşulların belirlenebilmesi için detaylı çalışmaların yapılamadığı durumlarda ABD’nin Milli Barajlar Envanterinde kayıtlı barajlar için belirttiği Tablo 2.8’ de gösterilen değerler kullanılabilir (Ağırlioğlu, 2011).

Tablo 2.8. ABD Milli Barajlar Envanterine dayanan mansap tehlike katsayıları (Ağırlioğlu, 2011).

Potansiyel Derecelendirme	İnsan Ölümleri	Ekonomik Çevre ve Canlı Kayıpları	Mansap Tehlike Katsayısı
Düşük	Beklenmiyor	Düşük, genellikle barajla sınırlı	2
Önemli	Beklenmiyor	Evet	12
Yüksek	Muhtemelen 1 veya 1'den fazla	Evet ve muhtemel; fakat kesin olarak aranmıyor	24

Barajın deprem kaynaklı hasar görebilirliğinin belirlenebilmesi amacıyla Bureau ve Baletline tarafından 2002 yılında geliştirilmiş olan eğri kullanılmaktadır. Söz konusu eğri Şekil 2.17' de görülmektedir.



Şekil 2.17. Farklı baraj türleri için öngörülen hasar indeksi (ÖHİ) (Yatay eksen sırasıyla 0,1; 1; 10 ve 100 değerlerinin tabii logaritmasını göstermektedir).

Baraj türüne ve deprem şiddeti indeksine bağlı olarak öngörülen hasar indeksi eğriden bulunur ve öngörülen hasar katsayısı hesaplanır.

Öngörülen hasar indeksi (ÖHİ) eğrisi yerine aşağıda baraj türüne göre verilmiş olan bağıntılar da kullanılabilir (Ağırlioğlu, 2011):

$$\text{ÖHİ} = 1,0712 \times \text{DŞİ}^{0,1302} \quad \text{Kemer barajlar} \quad (2.7)$$

$$\text{ÖHİ} = 0,1162 \times \ln(\text{DŞİ}) + 1,6979 \quad \text{Ağırlık barajlar} \quad (2.8)$$

$$\text{ÖHİ} = 0,1772 \times \ln(\text{DŞİ}) + 1,9763 \quad \text{Toprak dolgu barajlar} \quad (2.9)$$

$$\text{ÖHİ} = 0,1994 \times \ln(\text{DŞİ})^{1,3249} \quad \text{Kaya dolgu barajlar} \quad (2.10)$$

$$\text{ÖHİ} = 2,7888 \times \text{DŞİ}^{0,1559} \quad \text{Hidrolik dolgu ve atık barajlar} \quad (2.11)$$

Deprem şiddeti indeksi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Ağralıoğlu, 2011):

$$\text{DŞİ} = \text{DYİ} \times (\text{M} - 4,5)^3 \quad (2.12)$$

DYİ: Doruk yer ivmesi, M: Richter ölçeği büyüklüğüdür.

Öngörülen hasar katsayısı (ÖHK) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Ağralıoğlu, 2011):

$$\text{ÖHK} = 2,5 \times \text{ÖHİ} \quad (2.13)$$

Hesaplanan toplam risk katsayısı göz önünde bulundurularak barajların oluşturacağı risk dört sınıfa ayrılmaktadır. Bu risk sınıfları Tablo 2.9' da verilmiştir.

Tablo 2.9. Bureau metodundaki baraj risk sınıfları.

Toplam Risk Katsayısı (TRK)	Baraj Risk Sınıfı
2 - 25	I (Düşük)
25 - 125	II (Önemli)
125 - 250	III (Yüksek)
> 250	IV (Şiddetli)

2.4.1.3. DSİ baraj emniyeti rehberi (2012)' de belirtilen metod

Bir barajın emniyet bakımından hangi risk sınıfında olduğunun tespiti için yapılacak işlemler DSİ tarafından 2012 yılında yayımlanmış olan Baraj Emniyeti Rehberinde Baraj Risk Grubunun Belirlenmesi başlığı altında anlatılmıştır. Yayımlanan bu dokümanda DSİ Baraj Risk Puanlamasını ICOLD Bulletin 72'de anlatılan yöntem doğrultusunda yapmaktadır.

ICOLD tarafından geliştirilen bu yöntemde, barajların potansiyel riski, yapısal ve sosyoekonomik etkiler olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Barajın yapısal etkileri, temel olarak rezervuarın kapasitesine ve barajın yüksekliğine, sosyoekonomik etkileri ise, baraj yıkılması durumunda tahliye gereksinimini ve muhtemel mansap hasarını ifade etmektedir. Barajın potansiyel risk faktörü, hesaplanan bu dört ayrı

değerin toplamı olarak dikkate alınmaktadır. Barajın potansiyel risk faktörü değerine bağlı olarak barajın risk sınıfı dört ayrı risk sınıfından biri olarak tanımlanır. Yapılan bu risk sınıflamasına bağlı olarak barajın sismik parametreleri için kullanılacak analiz yöntemine karar verilir (Tosun ve ark., 2007a).

DSİ tarafından 2012 yılında yayımlanmış olan Baraj Emniyeti Rehberinde bulunan Baraj Risk Potansiyeli Sınıflandırma Tablosu Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.10. Baraj risk potansiyeli sınıflandırma tablosu (DSİ, 2012b).

Risk Faktörü	Şiddetli		Yüksek		Orta		Düşük	
	Değeri	Puanı	Değeri	Puanı	Değeri	Puanı	Değeri	Puanı
Rezervuar Kapasitesi (hm ³)	> 120	6	120 - 1	4	1 - 0,1	2	< 0,1	0
Barajın Yüksekliği (m)	> 60	6	60 - 30	4	29 - 15	2	< 15	0
İnsan Sayısı Olarak Boşaltma Gereksinimi	> 1000	12	1000 - 100	8	99 - 1	4	Yok	0
Potansiyel Mansap Zararı	Yüksek	12	Orta	8	Düşük	4	Yok	0

Söz konusu rehberde insan sayısı olarak boşaltma gereksinimi ve potansiyel mansap zararı risk faktörlerinin baraj yıkılma analizleri neticesinde elde edilecek sonuçlara göre yorumlanması gerektiği belirtilmektedir.

$$\text{Toplam Risk Puanı} = \text{Rezervuar Kapasitesi Risk Faktörü} + \text{Baraj Yüksekliği Risk Faktörü} + \text{Mansaptaki Etkilenecek İnsan Sayısı Risk Faktörü} + \text{Potansiyel Mansap Zararı Risk Faktörü} \quad (2.14)$$

Risk faktörleri belirlenirken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır (DSİ, 2012a):

- Mansap kısmındaki insan boşaltma ihtiyacı incelenirken, baraj yıkılması sonrası su altında kalacak olan taşkın alanlarında bulunan geçici insan varlığından ziyade kalıcı ve yoğun nüfusun bulunduğu alanlar dikkate alınmalıdır.
- Baraj için en kötü durum göz önüne alınarak tek bir risk faktörü belirlenmelidir.

- Eğer barajda meydana gelecek kontrolsüz su tahliyesi sonrası oluşacak taşkın mansap kısmında bulunan diğer barajlarda öngörülemeyen su tahliyesine sebep oluyorsa bu barajların oluşturacağı risk de göz önünde bulundurulmalıdır.

Hesaplanan toplam risk puanı göz önünde bulundurularak barajların oluşturacağı risk dört sınıfa ayrılmaktadır. Bu risk sınıfları Tablo 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.11. Toplam risk puanına bağlı risk sınıfları (DSİ, 2012b).

Toplam Risk Puanı	Risk Sınıfı	Risk Sınıfı
0 - 6	I	Düşük Risk Grubu
7 - 18	II	Orta Dereceli Risk Grubu
19 - 30	III	Yüksek Risk Grubu
31 - 36	IV	En Yüksek Risk Grubu

DSİ tarafından 2012 yılında yayımlanan Baraj Emniyeti Rehberinde sınır aşan sular üzerinde bulunan barajların en yüksek risk grubuna (IV) dâhil edilmesi gerektiği ve risk puanlamasının mühendislik düşünce mantığı süzgecinden geçirilerek gereğinden yüksek veya düşük puan verilmesinden kaçınılması belirtilmiştir (DSİ, 2012b). Risk bölgelerine ait değerlendirme tablo Tablo 2.12’de verilmiştir.

Tablo 2.12. Risk bölgeleri değerlendirme tablosu (DSİ, 2012a).

Bölge	Bölge Tanımı	Taşkın Erişim Pik Zamanı (dakika)*	Dalga Dinamiği
1	Yüksek Riskli	$t < 30$	-
2	Orta Riskli	$30 < t < 120$	$u \cdot h > 0.5 \text{ m}^2/\text{sn}$
3	Düşük Riskli	$t > 120$	$u \cdot h < 0.5 \text{ m}^2/\text{sn}$

* Uyarı zamanı, yıkılmanın başlangıcı, yıkılma ve taşkın dalgasının belirlenen kesite ulaşmasını içeren sürenin toplamıdır.

t: Uyarı zamanı (dk)

h: Dalga yüksekliği (m)

u: Dalga hızı (m/sn)

2.4.1.4. Barajların sismik tehlike analizi

Sismik dalgaların yer yüzeyine ulaşması sonucu oluşması muhtemel PGA (maksimum yer ivmesi), spektral ivme gibi yer hareketi parametrelerinin güvenilir bir şekilde tahmin edilmeleri, baraj ve yardımcı yapılarının tasarımı ve performans analizlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Baraj ve yardımcı yapılarında sismik aktiviteye bağlı olarak oluşacak olan hasarlar iki şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlar:

- a) Baraj ve yardımcı yapılarının altından geçen bir fayın hareket etmesi sonucu meydana gelen yüzey deformasyonu,
- b) Baraj ve yardımcı yapılarının fayın kırılması sonucu deprem kaynağından yayılarak yer yüzeyine ulaşan sismik dalgalardan kaynaklı sarsıntıya maruz kalmasıdır (DSİ, 2012a).

DSİ tarafından yayımlanmış olan Baraj Tasarımında Sismik Parametre Seçimi Kılavuzunda anlatılan sismik tehlike hesap yöntemleri, gelecekte meydana gelmesi muhtemel bir deprem sırasında oluşacak sismik dalgalar sonucu baraj sahasında ortaya çıkması muhtemel ve baraj tasarımında kullanılacak olan PGA (maksimum yer ivmesi), spektral ivme gibi yer hareketi parametrelerinin farklı risk seviyelerine göre belirlenmesine yöneliktir (DSİ, 2012a)

Barajların sismik tehlikesinin hesaplanmasında iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar:

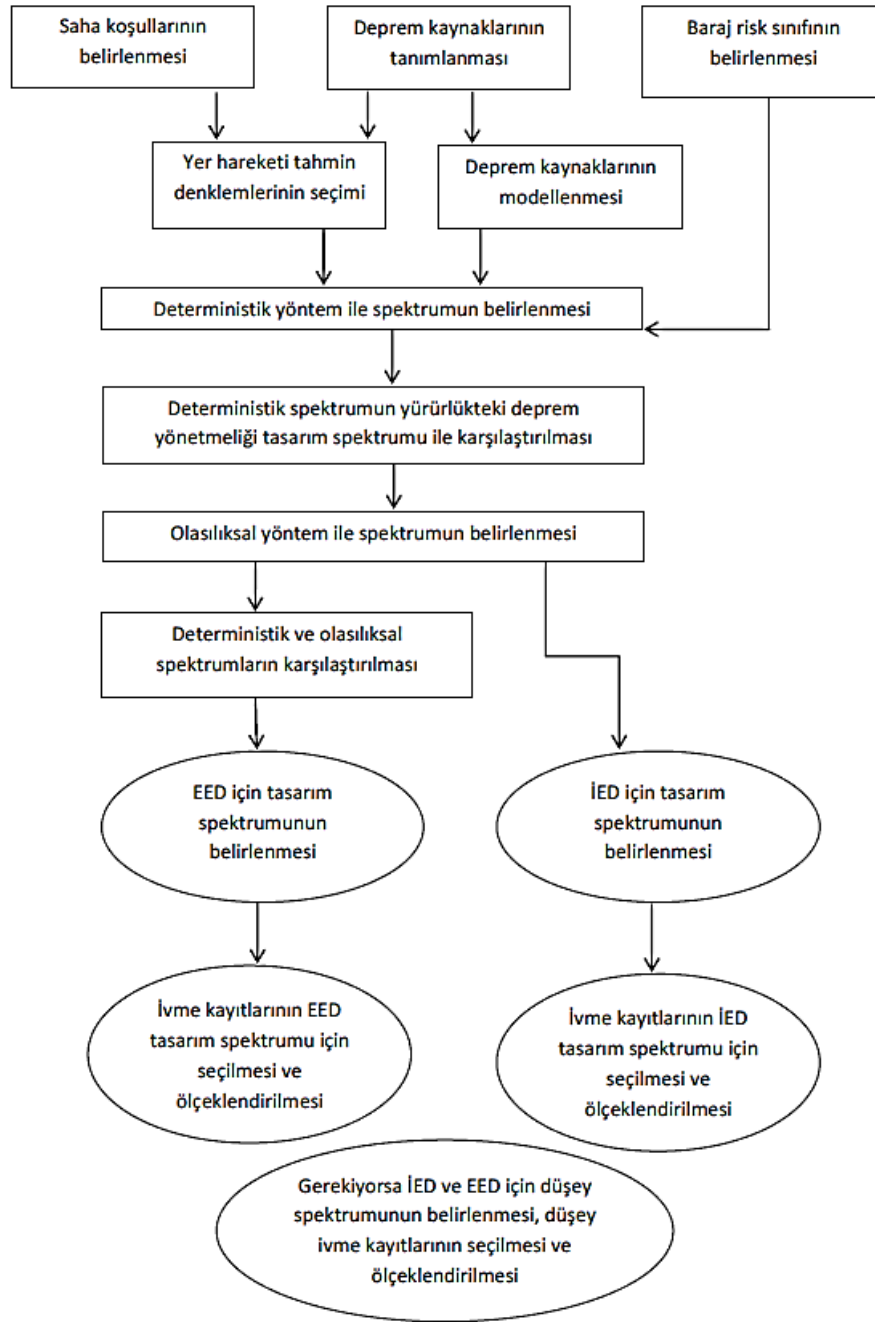
- (1) Olasılıksal (Probabilistik) Sismik Tehlike Hesabı
- (2) Deterministik Sismik Tehlike Hesabı

Her iki hesap yönteminde de sismik kaynaklar belirlenerek sismik kaynaklara bağlı yer hareketi parametreleri tahmin edilir ve hesaplamaların içerdiği modelleme ve rassal belirsizlikler hesaba yansıtılır (DSİ, 2012a). Barajlarda deprem tehlikesi hesaplanırken uygulanacak olan şema şekil 2.18’de verilmiştir.

Saha koşullarının belirlenmesi

Baraj ve yardımcı yapılarının maruz kalacakları sismik tehlikeler, bu yapıların bulunduğu zeminlerin dinamik özelliklerine bağlıdır. Baraj sahasının zemin koşulları sahada yapılacak deneyler ile belirlenmeli, uygulanan deneysel yöntemlerle ilgili belirsizlikler ve deney sonuçlarında gözlenen değişkenlikler zemin koşullarıyla ilgili parametrelerin seçiminde göz önünde bulundurulmalıdır. Sismik tehlike hesaplarında zemin koşulları iki farklı yöntemle göz önüne alınabilir (DSİ, 2012a). Bunlar:

- Yer hareketi tahmin denklemleri kullanılarak
- Zeminlerin dinamik tepkisinin hesaplanması yoluyla



Şekil 2.18. Barajlarda deprem tehlikesi hesap şeması (DSİ, 2012a).

- **Yer hareketi tahmin denklemleri kullanılarak zemin koşullarının göz önüne alınması**

Sismik tehlike hesabında farklı zemin koşullarının göz önüne alınabilmesi amacıyla kullanılacak olan yer hareketi tahmin denklemlerinde kullanılacak olan yerel zemin koşulları ile ilgili parametreler zemin etütleriyle doğrulanmalıdır. Ayrıca spektral değerler ile yapılacak olan tasarım hesaplarında da zemin etütleriyle doğrulanmış bu zemin parametreleri kullanılmalı ya da deney sonucu elde edilen değerlere göre daha güvenli sonuçlar verecek kabul değerleri göz önüne alınmalıdır. Bu şekilde hesaplanan

yer hareketi parametreleri (spektral ivme, PGA) eğimi az olan serbest yüzey koşullarında geçerlidir (DSİ, 2012a).

Seçilecek olan yer hareketi tahmin denklemi baraj sahasını kapsayan alanın tektonik yapısına uygun olmalı ve farklı fay tiplerinden ve zemin özelliklerinden kaynaklı yer hareketi parametrelerindeki değişim göz önüne alınmalıdır.

- **Zeminlerin dinamik tepkisinin hesaplanması yolu ile zemin koşullarının göz önüne alınması**

Yüksek risk grubundaki veya jeolojisi ve morfolojisi karmaşık olan saha yapısına sahip baraj yapılarında kullanılmaktadır (DSİ, 2012a).

Çalışma yapılan baraja ait zeminlerin dinamik koşulları belirlenirken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- (1) Sahaya ait sismik koşullar, sismik deneyler ile belirlenmelidir.
- (2) Yüksek risk grubundaki barajlar için P ve S dalgası hızı profilleri yanında zeminlere ait geoteknik özellikler belirlenmelidir.

Deprem kaynaklarının tanımlanması

Çalışma yapılan baraja ait deprem kaynakları belirlenirken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- (1) En az 100 km yarıçapında ve baraj sahasını merkez alan bölge içerisinde bulunan deprem kaynakları belirlenmelidir.
- (2) Yüksek riskli barajlarda, baraj sahasını merkez alan en az 25 km yarıçapındaki bir bölgede, M_w 6.0 ve üzeri deprem oluşturabilecek diri faylar saha çalışmaları ile belirlenmelidir.
- (3) Geçmişte meydana gelmiş depremler deprem kataloglarından belirlenmeli ve bu depremlerin tespit edilebilmiş özellikleri literatürden derlenmelidir.
- (4) Tarihsel, jeolojik ve sismik veriler kullanılarak deprem kaynaklarının oluşturabileceği en büyük deprem büyüklükleri (magnitüd) belirlenmelidir.
- (5) M_{min} değeri hasara sebep olabilecek minimum deprem büyüklüğü olan 4.0 alınmalıdır (DSİ, 2012a).

Deterministik sismik tehlike analizi

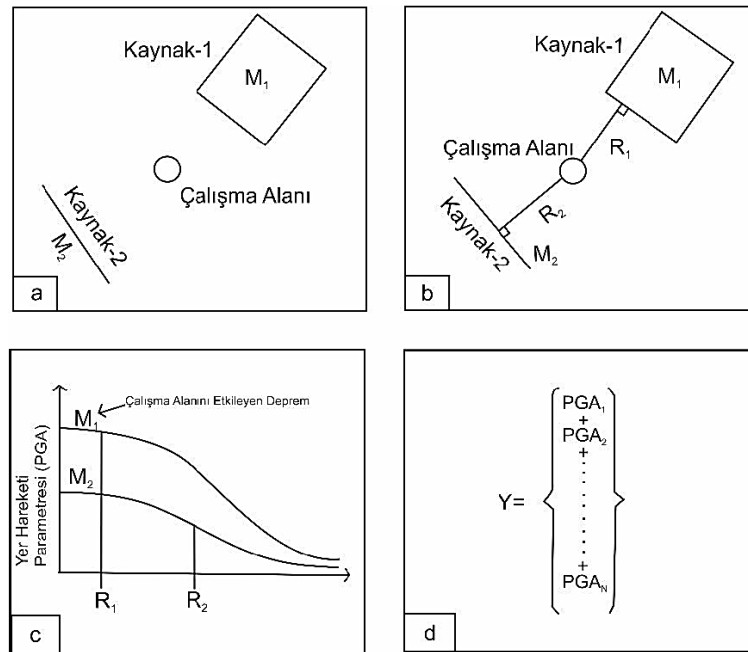
Deterministik sismik tehlike analizi baraj için sismik tehlikede en belirgin rol oynayan deprem kaynağına bağlı en kritik depremi göz önüne almaktadır. Kırılacağı tahmin edilen faya göre baraj sahasının en yakın mesafesi ve oluşabilecek en büyük deprem

göz önüne alınarak, yer hareketi tahmin denkleminde faydalanılarak baraj sahasında gerçekleşmesi muhtemel yer hareketi parametreleri hesaplanmaktadır (DSİ, 2012a).

Deterministik sismik tehlike analizinde dört aşamalı bir sismik senaryo dikkate alınmaktadır.

- Baraj sahasında etkili yer hareketi üretebilecek kapasiteye sahip deprem kaynakları belirlenir.
- Her bir kaynak için kaynak-baraj yeri en yakın mesafe değerleri belirlenir.
- Baraj sahasında en kuvvetli depremi meydana getirecek olan belirleyici deprem seçilir.
- Baraj yerinde belirleyici depremden kaynaklı yer hareketinin neden olacağı PGA, hız ve spektrum uygun yer hareketi tahmin denklemleri kullanılarak tahmin edilir (Tosun ve ark., 2007a).

Deterministik sismik tehlike analizi aşamaları Şekil 2.19’ da verilmiştir.



Şekil 2.19. Deterministik sismik tehlike analizi aşamaları (Özmen, 2018).

Olasılıksal (Probabilistik) sismik tehlike analizi

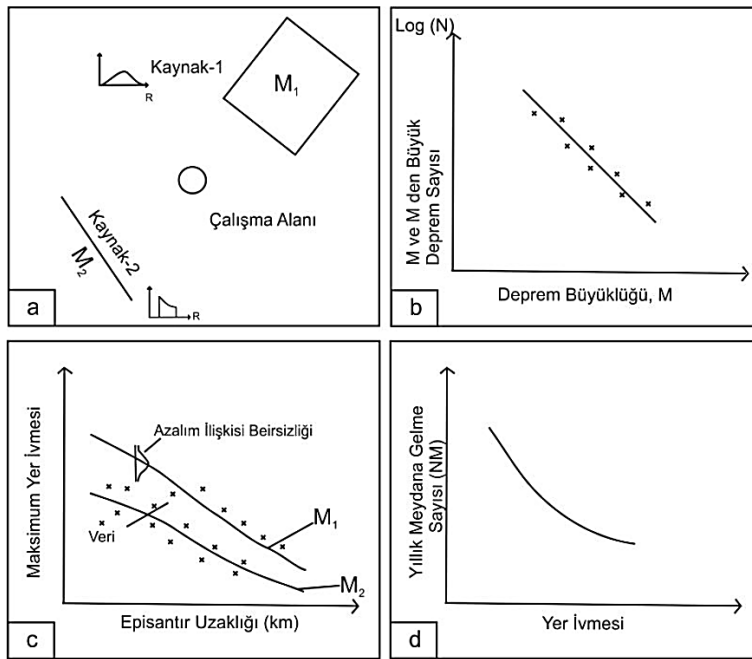
Olasılıksal sismik tehlike analizi ile belirli bir zaman aralığında meydana gelmiş deprem verileri kullanılmak suretiyle istenilen periyotlarda ve aşılma olasılıklarında baraj alanında oluşması muhtemel ivme değerleri hesaplanmaktadır (Özmen, 2018).

Deterministik sismik tehlike analizinde baraj alanına yakın sismik kaynaklar göz önüne alınırken, olasılıksal sismik tehlike analizinde baraj alanına etki edebilecek tüm sismik kaynaklar göz önüne alınmaktadır.

Probabilistik sismik tehlike analizinde dört aşamalı bir sismik senaryo dikkate alınmaktadır.

- Baraj sahasına etki edebilecek tüm deprem kaynakları belirlenir.
- Her bir deprem kaynağı için deprem periyotları hesaplanır ve magnitüd-frekans ilişkisi tespit edilir.
- Deprem kaynağının herhangi bir yerinde ve herhangi bir büyüklükte meydana gelecek depremin baraj sahasında meydana getireceği yer hareketi belirlenir. Burada deprem kaynağının yer hareketi oluşurken meydana gelecek belirsizlikler dikkate alınmalıdır.
- Baraj sahasını etkilemesi muhtemel deprem büyüklüğü değerleri için aşılma olasılığı değerleri hesaplanır (Özmen, 2018).

Olasılıksal sismik tehlike analizi aşamaları Şekil 2.20' de verilmiştir.



Şekil 2.20. Olasılıksal sismik tehlike analizi aşamaları (Özmen, 2018).

Baraj tasarımı ve performans değerlendirmede kullanılan sismik tehlike seviyeleri

İşletme esaslı deprem (İED), tasarlanan barajın hasarının normal baraj işleyişini aksatmayacak seviyede kaldığı veya oluşacak hasarın ekonomik ve hızlı bir şekilde

giderilebildiği yer hareketini temsil eden deprem seviyesidir. İşletme esaslı deprem seviyesi olasılıksal yöntemle belirlenmektedir. Baraj risk sınıfına göre farklı tekerrür süreleri (T_R) önerilmiştir (DSİ, 2012a).

Emniyet esaslı deprem (EED), baraj tasarımında kullanılması önerilen en yıkıcı yer hareketini temsil eden deprem seviyesidir. Baraj risk sınıfına göre farklı seviyelerde önerilmiştir (DSİ, 2012a).

Barajlar için yapılacak olan sismik tehlike hesapları hem deterministik hem de olasılıksal yöntemle yapılmalıdır. Baraj emniyetinin değerlendirilmesi ve tasarımda göz önüne alınacak en yıkıcı yer hareketine karşılık gelen deprem olan Emniyet Esaslı Deprem (EED)' in belirlenmesinde kullanılacak değerler Tablo 2.13' te verilmiştir (DSİ, 2012a).

Tablo 2.13. Emniyet Esaslı Deprem (EED)' in belirlenmesinde kullanılacak değerler (DSİ, 2012a).

Risk Sınıfı	Deterministik EED İçin Yüzdeler (Persentil)	Olasılıksal EED İçin Tekerrür Süreleri
I Düşük Risk Grubu	%50	$T_R = 224$ yıl
II Orta Dereceli Risk Grubu	%50	$T_R = 475$ yıl
III Yüksek Risk Grubu	%84	$T_R = 975$ yıl
IV En Yüksek Risk Grubu	%84	$T_R = 2475$ yıl

Deterministik yöntem ile bulunan spektrum Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde önerilmiş olan spektrum ile karşılaştırılır. Karşılaştırma yapılacak olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde önerilmiş olan spektrum, düşük ve önemli risk sınıfına giren barajlar için yönetmelikte belirtilmiş olan spektrum olarak alınırken, yüksek ve çok yüksek risk sınıfına giren barajlar için yönetmelikte belirtilmiş olan spektrum değerleri %50 arttırılarak alınmaktadır. Bu karşılaştırma sonucu daha büyük olan spektral ordinatlar deterministik değerler olarak seçilmelidir (DSİ, 2012a).

Deterministik ve olasılıksal yöntemler kullanılarak hesaplanan spektral ordinatlardan düşük olanı sahaya özel tasarım spektrumu ordinatları olarak seçilmektedir (DSİ, 2012a).

3. BARAJLARIN İZLENMESİ VE ACİL DURUM EYLEM PLANLARI

Barajlar en son teknoloji ve bilgiler kullanılarak inşa edilse bile riskler tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu nedenle; barajdaki riskleri azaltabilmek için gerekli rehabilitasyon tedbirlerinin en kısa sürede tespit edilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Barajdaki riskler ise sürekli izleme, periyodik muayene ve güvenlik değerlendirmelerinin yapılması ile tespit edilebilmektedir. Periyodik muayeneler sayesinde barajın davranışı ve yapısal güvenliği teyit ve kontrol edilebilmektedir (Caner, 2021). Denetim, ölçüm ve gözlemlerin analiz ve değerlendirilmeleri sonucu baraj için herhangi bir tehlike tespit edilmese dahi denetim, ölçüm ve gözlemlere devam edilmeli, elde edilen veriler ve değerlendirmeler arşivlenmeli ve ihtiyaç duyulduğunda kullanılmalıdır.

Barajlarda gözlem, muayene ve ölçümler belirli bir program dâhilinde yapılmalıdır. Yapılacak olan ölçümler baraj tipine ve özelliklerine göre değişiklik göstermektedir.

Barajlarda yapılan ölçümler genel itibariyle şunlardır:

- Yatay ve düşey deformasyon ölçümleri,
- Sızıntı ölçümleri,
- Basınç ve gerilme ölçümleri,
- Yapı elemanlarına etki eden yüklerin ölçülmesi,
- Çevresel faktör ölçümleri
 - Su seviyesi ölçümleri,
 - Sıcaklık ölçümleri,
 - Yağış ölçümleri,
 - Sismik hareket ölçümleri.

Baraj gövdesinde farklı nedenlerden dolayı borulanma, çatlaklar, aşınmalar, lokal kaymalar gibi birtakım bozulmalar meydana gelebilir. Bu bozulmalar uzman personel tarafından gözlem ve muayeneler vasıtasıyla tespit edilmekte ve ihtiyaç duyulan bakım ve onarımlar yapılmaktadır (Yıldız, 2018).

Ölçüm sistemleri sayesinde, barajda yaşanan yetersizlikler ve problemler zamanında tespit edilebilmekte, ihtiyaç duyulan önlemler zamanında alınabilmekte ve barajın proje performansı denetlenerek benzer baraj projelerinin yapımında dikkat edilmesi gereken hususlar konusunda bilgi edinilebilmektedir. Barajın güvenli bir yapı olarak inşa edilip korunabilmesi için barajlarda karşılaşılan problemlerin tespit edilmesi ve yeni yapılacak olan baraj projelerinde bu hususların dikkate alınması büyük önem taşımaktadır (Aydın, 2007). Barajların ekonomik, sağlam ve güvenli olabilmesi için aşağıdaki hususların bir arada olması gerekmektedir.

- İyi bir koordinasyon,
- Kaliteli planlama ve projelendirme,
- Kaliteli inşaat,
- Sağlıklı bilgi akışı sağlayan baraj ölçüm tesisleri ile barajın gerçek zamanda gözlemlenmesi,
- İyi bir baraj işletimi,
- Tüm durumların göz önüne alındığı acil durum eylem planı.

ICOLD tarafından 2001 yılında yapılan araştırmada birçok barajın problemlerinin ve yetersizliklerinin genellikle gerekli ölçümlerin zamanında yapılmamasından ve barajda ortaya çıkan fonksiyonel eksikliklerin zamanında gözlemlenmemesinden kaynaklandığı görülmüştür (Aksu ve Ağca, 2007).

Barajlardaki ölçüm ve gözlemler doğrudan veya uzaktan gözleme olmak üzere iki yoldan yapılmaktadır. Doğrudan yapılan ölçüm ve gözlemlerde, barajın tipine ve özelliklerine göre ölçülmesi gereken parametrelere uygun ölçüm sistemleri barajın yapımı sırasında baraj temeli, gövdesi içerisine veya baraj yüzeyinde uygun olan yerlere yerleştirilirler. Ölçüm sisteminin yerleştirildiği yerde meydana gelen değişimler görsel olarak izlenirler veya bir kablo vasıtası ile kayıt merkezine iletilir ve burada toplanırlar. Uzaktan gözleme ile yapılan ölçüm ve gözlemler, barajın yüzeyine yerleştirilmiş olan ölçüm noktalarına jeodezik ölçme yöntemleriyle yapılır. Barajda hangi tip ölçüm ve gözlem yönteminin uygulanacağına; barajın tipi ve yüksekliği, konumu, temel özellikleri, rezervuar ve dolusavak kapasitesi, sismik özellikleri gibi özellikler dikkate alınarak karar verilmektedir (Aşık, 2016).

3.1. Barajların Muayenesi

Barajlardaki risklerin seviyesinin minimuma indirilebilmesi için barajlar belirli bir program dâhilinde muayene edilmeli ve izlenmelidirler. Barajların önceden belirlenmiş programlar dâhilinde muayene edilmesi sonucu, ölçümlerle tespit edilmesi mümkün olmayan eksiklik ve kusurlar önceden tespit edilerek giderilebilmektedir. TDK sözlüğünde muayene kelimesinin anlamı “gözden geçirme, araştırma, yoklama, kontrol” olarak verilmiştir.

Baraj güvenliği açısından arazide yapılacak olan gözlemsel inceleme ve değerlendirmeler, barajın önemi, tasarımındaki karmaşıklık derecesi ve hasar görme seviyesine göre farklılık göstermektedir (Emiroğlu ve ark., 2020).

Gözlemsel incelemede baraj gövdesi ve yardımcı yapılarının (dokusavak, dipsavak, derivasyon tüneli, kapaklar ve mekanik teçhizatları, su alma yapıları, kuyruk suyu kanalı, düşü havuzu ve enerji kırıcı yapılar, dokusavak yaklaşım kanalı, batardo kapakları, HES binası ve teçhizatları) detaylı bir şekilde incelenmesi ve fotoğraflanarak belgelenmesi büyük önem taşımaktadır. Ölçüm cihazlarından alınmış olan verilerin doğruluğunun ve cihazların çalışma durumlarının tespiti de yapılmalı, veriler işlenerek yorumlanmalıdır (Emiroğlu ve ark., 2020).

Barajlar genel itibariyle üç açıdan incelenmektedir:

- (1) Yapısal açıdan,
- (2) Geoteknik açıdan,
- (3) Çıkış yapıları açısından.

Barajın yapısal açıdan incelenmesi yapısal bütünlüğün sağlanması açısından önemlidir. Geoteknik açıdan incelemede baraj temelini güvenliği ve oluşabilecek sızmaların tespiti araştırılmakta, dolu savak gibi çıkış yapılarının incelenmesinde ise işletme durumundaki hususlara odaklanılmaktadır.

Baraj gövdesi güvenliği, baraj güvenliği açısından öncelikli dikkat edilecek konudur. Baraj gövdesinin memba ve mansap yüzeyleri ve kreti incelenir. Bu kısımlarda oturma, aşınma, bitkilenme, ufalanma, çatlaklar ile sızma ve kaçakların olup olmadığı kontrol edilir. Dolu savakların yaklaşım kanalı, eşik ve enerji kırıcı gibi bölümleri incelenir (Ağralıoğlu, 2011).

3.1.1. Barajlarda yapılan muayene türleri

Barajlarda 5 farklı türde muayene yapılmaktadır (Ağırlioğlu, 2011). Bunlar;

3.1.1.1. Resmi muayene

Barajın geçici ve kesin kabul işlemleri sırasında yapılan muayenedir. Barajda tasarım, işletme ve baraj güvenliği açısından incelenmesi gereken tüm durumların ve mekanik ekipmanların alt ve üst sınırlarının kontrol edildiği muayenedir.

3.1.1.2. Ara muayene

Barajın resmi muayeneleri arasında yapılan muayenedir. Ara muayenede risk öngörülüyorsa mekanik ekipmanların teste tabi tutulmasına gerek yoktur. Bu muayenede barajın anlık durumu detaylı bir şekilde incelenerek tespit edilen hususlar kayıt altına alınır.

3.1.1.3. Sürekli muayene

Baraj işletiminde görevli olan teknik ekibin işletme ömrü boyunca barajın anlık durumunu tespit etmek amacıyla yaptığı muayenelerdir. Muayene esnasında tespit edilen veriler geçmiş muayene verileri ile karşılaştırılarak detaylı analizler yapılmadan barajın anlık durumu değerlendirilir.

3.1.1.4. Özel muayene

Barajdaki bir noktada uzman ekip tarafından yapılan detaylı muayenedir.

3.1.1.5. Acil muayene

Barajın güvenliğini etkileyecek olağan dışı bir durum sonrası yapılan muayenedir.

3.1.2. Muayene öncesi yapılan hazırlıklar

Muayene öncesinde, baraj yerinin jeoloji ve hidrolojik özellikleri, barajın tasarımına ait dokümanlar, inşaat aşamasına ait tutanaklar, ölçüm aletlerine ve ölçümlere ait kayıtlar, işletme ve bakım tutanakları, geçmişte yapılmış olan muayenelere ait raporlar, haritalar ve fotoğraflar incelenir ve değerlendirilir (Ağırlioğlu, 2011).

3.1.3. Dolgu baraj gövdesinin muayenesi

Dolgu barajlardaki yetersizliklerden bazıları baraj tepesinde, baraj şevinde ve baraj gövdesinin baraj zemin yüzeyi ile birleştiği noktalarda görsel olarak tespit edilebilmektedir.

Dolgu barajlarda, baraj kretindeki doğrusal biçimin durumu, meydana gelen oturmalar, çatlakların durumu, fazla ve derin köklü bitkilerin varlığı, hayvanların oluşturduğu oyuklar, ölçme sistemlerinin çalışır durumda olup olmadığı veya yerlerinin değiştirilip değiştirilmediği durumları incelenmelidir. Ayrıca baraj gövdesindeki sızmalar ve sızmalara ait izler, sızma suyundaki değişimler, sızma ölçen sistemlerin çalışır durumda olup olmadığı ve diğer basınç ve yer değiştirme ölçüm sistemlerinin durumu incelenmelidir (Ağırlioğlu, 2011).

3.2. Dolgu Barajlarda Yapılan Ölçümler ve Ölçme Aletleri

Barajlar genellikle barajdan alınan ölçümler, fotoğraflar, yerinde yapılan testler ve laboratuvar testleri ile gözlenmektedir. Aşırı yağışlar, haznedeki suyun seviyesi ve sıcaklığı, hava sıcaklığı, içsel sıcaklık ve rüzgârın etkisi gibi hidrolojik etkiler ve suyun baraja uyguladığı kaldırma kuvveti, gövdedeki ve temeldeki sızma miktarları, gövde üzerindeki basınçlar, sismik kuvvetler gibi yapısal hareketliliklerin olduğu sırada alınan ölçümlerin barajın bu etkiler karşısında göstereceği tepkiyi iyi anlatması gerekmektedir. Baraj yerinde yapılan ölçüm, inceleme ve gözlemler, barajda meydana gelmiş olan fonksiyonel eksikliklerin ve anormal durumların tespitini kolaylaştırmaktadır. Yapılan ölçüm, inceleme ve gözlemler sonucu elde edilen veriler veri tabanına aktarılarak koruma altına alınır (Aksu ve Ağca, 2009).

Ülke çapında aletsel gözlem ve performans izleme sistemlerinin tasarımını, kurulum standartlarını ve kurulum detaylarını kapsayan ilk teknik kılavuz, DSİ tarafından “Baraj Ölçüm Cihazları Teknik Şartnamesi” adı altında yürürlüğe konulmuştur. Bu şartnamede kullanılacak cihaz tipleri dolgu ve beton barajlar için ayrı bölümlerde verilmiş olup, seçilen cihazların tipi, dağılımı ve sayısı idare tarafından proje bazında belirlenmektedir. Söz konusu şartnamede, listelenen ekipman türleri için çalışma prensibi, ekipmanın kapasitesinin belirlendiği sınırlar, ölçüm doğruluğu ve hassasiyeti için karşılanması gereken minimum standartlar ve minimum fiziksel koruma gereksinimleri (özellikle kablolama) listelenmiştir. Ayrıca ölçüm sonuçlarının raporlanması ve saklanması ilişkin temel standartlar da bu şartnamede belirtilmiştir (Yunatçı ve ark., 2014).

Aletsel ölçümde yapılacak olan işlemler ve alt görevleri Tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. Aletsel ölçüm hizmetlerinde yapılacak işlemler ve alt görevleri (Yunatçı ve ark., 2014).

Yapılacak İşlem	Görev
Ölçüm Sisteminin Tedariki	Ölçüm donanım ve yazılımlarının tedarik edilmesi ve kalibrasyonlarının yapılması Donanım ve yazılımların ön kabul testlerinin yapılması Ölçüm donanımının ve yazılımının kurulması Sıfır okumalarının alınması
Saha Hizmetleri	Donanımın düzenli periyotlarla bakımı ve kalibrasyonu Veri toplama takviminin oluşturulması ve ihtiyaç durumunda güncellenmesi Verilerin toplanması
Verilerin Değerlendirilmesi ve Raporlanması	Verilerin işlenmesi ve sunulması Verilerin değerlendirilerek raporlanması Alınacak tedbirlerin değerlendirilmesi Alınacak tedbirlerin hayata geçirilmesi

Baraj güvenliği amacıyla yapılan ölçümlerden bazıları şunlardır (Uzel ve ark., 2007):

- Baraj ve rezervuarlarının bulunduğu arazinin ve baraj çevresindeki tepelerin yatay ve düşey hareketlerinin ölçüldüğü jeodezik ölçümler,
- Baraj gövdesinin, destek sistemlerinin ve temelinin davranışının izlendiği fiziksel ölçümler,
- Baraj gövdesinde ve temelinde kullanılan malzemelerin özelliklerinin belirlenebildiği laboratuvar ölçümleri,
- Barajda yetersizliğe sebep olabilecek yeraltı su seviyesinin değişimi, sismik olaylar gibi olayların ve değişimlerin ölçüldüğü jeofizik ve jeolojik gözlem ve ölçümler.

Bu gözlemler veya ölçümler periyodik olarak yapılmaktadırlar. Baraj inşa edilmeden önce hidrolojik ölçümler, yatay tabaka hareketi ölçümleri ve sismik ölçümler gibi bazı ölçümler alınır ve diğer ölçümler baraj inşaatı bitiminin hemen ardından sıfır (referans) ölçümler olarak başlamaktadır. Rezervuarın doldurulması belirli bir plana göre kademeli olarak gerçekleştirilir. Kademeler arası verilen aralarda alınması gereken tüm ölçümler yapılmaktadır (Uzel ve ark., 2007).

Barajın gerek inşa gerekse işletme aşamasında yapılan jeodezik gözlemler ile bir yandan güncel durumları hakkında bilgi elde ederken diğer yandan barajın tasarım modelinin kalibrasyonu sağlanmaktadır. Ancak barajdaki mutlak değişimlerin

belirlenmesine olanak veren jeodezik ölçümlerin yanında barajın farklı kısımlarının birbirlerine göre değişimlerini gösteren fiziksel (göreceli) ölçümler de yapılmalıdır. Bu gözlemler ile jeodezik ölçümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak barajın performansı yorumlanır (Uzel ve ark., 2007).

Tasarım aşamasında barajın sayısal olarak modellenmesi, barajın sonraki aşamalarda karşılaşması muhtemel gerilme durumları ile yatay ve düşey deformasyonlar hakkında ve barajın hangi kısımlarında ne tür ölçüm tesislerinin yerleştirilmesi gerektiği konusunda bilgi sağlar. Yapılan analizlerle, baraj haznesinin tam kapasite dolu olması ve hızlı su çekilmesi gibi kritik koşullar altında oluşabilecek gerilme ve aşırı boşluk suyu basıncı dağılımları ile baraj gövdesi ve temelinde oluşması muhtemel deformasyon ve gerilmeler bulunmaya çalışılırken, barajın güvenlik durumunun kontrol edilmesi için gerekli eşik değerlerin belirlenmesine yönelik veriler de sağlanmaktadır. Daha sonra ilgili değerler dikkate alınarak ölçüm sisteminin seçimine ve yerleşimine karar verilir. Aynı zamanda ölçüm sistemlerinin çalışma aralıklarının doğru seçilmesi bu analiz sonuçları ile elde edilebilmektedir (Aydın, 2007).

Baraj güvenliği yalnızca ölçüm sistemlerinin yerleştirilmesi ve bu sistemlerden veri toplanması ile sağlanamamaktadır. Yerleştirilecek olan cihazlar dikkatli bir şekilde seçilmeli ve yerleştirilecekleri yerler iyi belirlenmeli, cihazlardan elde edilen veriler doğru bir şekilde toplanmalı, işlenmeli ve değerlendirilmelidir. İyi planlanmamış bir sistematik süreç yanlış veya ihtiyaç duyulmayan veriler sağlayarak, verilerin toplanmasında ve yorumlanmasında para ve zaman kaybına neden olmaktadır (Ağırlioğlu, 2011).

Görüldüğü üzere baraj ölçümleri sistematik bir süreçtir. Bu sistematığın üç önemli bileşeni Şekil 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1. Baraj ölçüm sistematığı (Kürklü ve Zorluer, 2007).

Baraj güvenliğinin denetimi için elektronik veri toplama sistemleri ve bilgisayar yazılımlarının kullanılması, ekipmanların özelliklerinin geliştirilmesi ve maliyetleri düşürmesi açısından avantajlı olmaktadır. Barajların gerçek zamanlı izlenmesi, ölçüm sistemleri tarafından hızlı bir şekilde toplanan verilerin hızlı bir şekilde işlenerek,

şiddetli yağış, su baskını, sızıntı ve deprem gibi kritik zamanlarda baraj güvenliği konusunda karar verilebilmesine olanak sağlar (Kürklü ve Zorluer, 2007).

Baraj gövdesi inşaatına başlanmadan önce yerleştirilmesi planlanan ölçüm cihazlarına ait tüm malzeme, alet ve ekipmanlar, bunlara ait uygulama projeleri ile birlikte sahada hazır bulundurulur. Ölçüm aletlerinin sağlamlığı elle ve görsel olarak kontrol edildikten sonra yerine takılmadan önce tespit edilen kusurlar mümkün olan en kısa sürede düzeltilmelidir. Kullanılan malzemelerin CE sertifikasına sahip olması gerekmektedir. Ölçüm aletlerinden doğru veriler elde etmek için kalibrasyonlarının ve yerleştirilmelerinin hassas ve hatasız olması gerekir. Her ölçüm cihazı yerine yerleştirildikten sonra uzmanlar tarafından dikkatle incelenmeli ve teknik olarak test edilmelidir. Sonuçlara göre doğru bir değerlendirme yapabilmek için ölçüm cihazının bulunduğu yerin özelliklerinin dikkatle incelenmesi gerekmektedir. Gerekirse bu aletlerin yerleştirildiği bölgeden numuneler alınmalı, etiketlenmeli ve saklanmalıdır (Ulusoy, 2015).

Mevcut dolgu barajlarda alınması tavsiye edilen ölçümler Tablo 3.2’ de verilmiştir (Ağırlioğlu, 2011).

Tablo 3.2. Mevcut dolgu barajlardan alınması tavsiye edilen ölçümler.

Ölçüm	Tehlike Potansiyeli Düşük Olan Barajlar	Tehlike Potansiyeli Orta ve Yüksek Olan Barajlar
Gözle Gözlem*	✓	✓
Rezervuar Su Seviyesi		✓
Mansap Su Seviyesi		✓
Drenaj Akımı, Sızma ve Kaçak**		✓
Boşluk Suyu Basıncı, Kaldırma Basıncı		✓
Temel Hareketleri		✓
Sismik Yükler		✓

* Baraj tepesinde, topuğunda, yamaçlarında ve diğer kısımlarında yürüyerek gözlem yapılır.

** Piyezometreler ve gözlem kuyuları kullanılır.

Barajların izlenmesinde kullanılan başlıca aletler Tablo 3.3’ te verilmiştir.

Tablo 3.3. Barajların izlenmesinde kullanılan başlıca aletler (Ağırlioğlu, 2011).

Ölçülen Büyüklük	Alet
Düşey Yer Değişirme	- Hidrostatik seviyeler
	- Hassas topografik seviyelendirme aletleri
	- Genleşme ölçerler (extensometers)
Açısal Yer Değişirme	- Teodolit
	- Oturma aletleri
	- Clinographs
	- Clinometers
Yatay Yer Değişirme	- Eğim göstergeleri
	- Doğru ve ters sarkaçlar
	- Teodolit
Genleşme	- Collimation
	- EDMİ
Oturma	- Genleşme ölçme aletleri
	- Oturma ölçümleri
	- Seviyelendirme aletleri
Kaldırma ve Boşluk Basınçları	- Tel veya çubuk gerilme ölçekleri
	- Çapraz kollular
	- Piyezometreler (Açık veya kapalı türleri)
Sismik Hareketler	- Su seviyesi ölçekleri
	- Basınç ölçekleri
Nemlilik	- Sismograflar
	- İvmeölçerler
	- Hidrometreler

3.2.1. Dolgu barajlarda alınması gereken ölçümler ve kullanılan ölçüm aletleri

Dolgu barajlarda alınması gereken ölçümlerden bazıları aşağıda verilmiştir.

- (1) Su basıncı
- (2) Toprak basıncı
- (3) Deformasyonlar
- (4) Sızma
- (5) Sismik yükler

3.2.1.1. Su basıncı

Barajdaki su basınçları, rezervuar su seviyesi, mansap su seviyesi ve yeraltı suyu seviyesindeki değişikliklere göre değişir. Rezervuardaki su seviyesindeki ve barajın mansabındaki su seviyesindeki basınç değişiklikleri baraja bazı kuvvetler uygulamaktadır. Barajların stabilitesi analiz edilirken bu kuvvetler dikkate alınmalıdır (Ağırlioğlu, 2011).

Su basıncı ölçmelerinin yapılma nedenlerinden bazıları aşağıda verilmiştir (Ağırlioğlu, 2011):

- (1) Arazideki yeraltı su seviyesinin belirlenmesi,
- (2) Şevlerde, baraj temelinde ve mansap sahasındaki farklı jeolojik birimlerdeki boşluk suyu basıncının belirlenmesi,
- (3) Barajdaki perde duvarlarında, geçirimsiz dolgu bölümlerinde veya diğer yapılarda sızmaları önlemek için yapılan ünitelerde sızmaların kontrolünün yapılması,
- (4) Dren ve filtrelerin beklenen seviyede çalışıp çalışmadıklarının belirlenmesi.

Barajlardaki su basınçlarını ölçmek amacıyla piyezometreler ve gözlem kuyuları kullanılmaktadır.

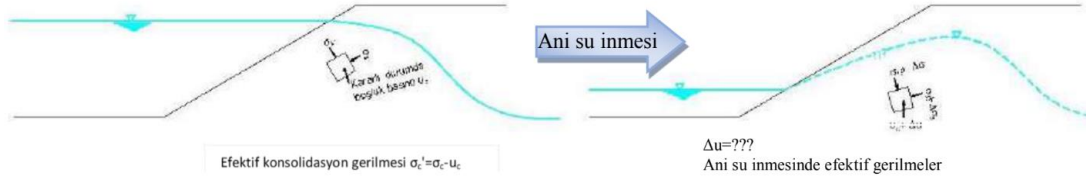
Baraj rezervuarı bir süre dolu kalıp aniden boşaldığında, suya doymuş zemindeki boşluk suyu basıncına karşı koyan su kuvveti ortadan kalkar ve sonuç olarak memba seviyesi tehlikeli duruma gelir (Yıldız, 2007).

Deprem dalgalarının yayılması sonucu oluşan kayma gerilmesi ile zemin daneleri drenajsız kayma birim deformasyonuna maruz kalmakta ve sonuç olarak boşluk suyu basıncında bir artış meydana gelmektedir. Boşluk suyu basıncındaki artış, efektif gerilmenin düşmesi nedeniyle zemin rijitliğini azaltarak, daha yüksek kayma gerilmesi ve boşluk suyu basıncıyla sonuçlanan bir kısır döngüye neden olmaktadır. İleri seviyelerde, boşluk suyundaki artış efektif gerilmenin yok olmasına ve zemin sıvılaşmasına neden olabilecektir (Bilge ve Çetin, 2011).

Barajda oluşan su basıncı nedeniyle barajda yetersizlik oluşmasını önlemek için baraj gövdesi ve temelindeki su seviyesi ve basıncının sürekli izlenmesi gerekmektedir.

Rezervuardaki su seviyesinin ani bir şekilde inmesi barajlar, seddeler, doğal su kanalları ve su altındaki doğal yamaçlar için sorun teşkil etmektedir. Bu durum boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesi için gerekli zamana sahip olmayan şevdeki görece hızlı su alçalması ile ortaya çıkmaktadır. Su seviyesinin düşmesi ile şevdeki toplam gerilmeler azalarak zemin, drenajsız yük boşalma koşuluna maruz kalmakta ve yük boşalması sonucu suya doymuş olan dolguda boşluk suyu basınçları azalmaktadır. Aynı zamanda suyun şev yüzeyinin stabilitesi üzerindeki olumlu etkisi ortadan kalkarak kayma gerilmeleri artmaktadır. Artan kayma gerilmeleri boşluk suyu basıncının artmasına ve azalmasına neden olabilmektedir. Boşluk suyu basıncındaki bu değişiklikler gerilmelere bağlı olup kesin olarak tahmin edilmesi çok zordur. Zemindeki kayma mukavemeti boşluk suyu basıncına bağlı olduğu için, su seviyesinin

ani bir şekilde inmesi durumunda gerçek davranışa uygun kayma mukavemeti değerlerini elde etmek güçtür (Berilgen ve ark., 2014). Ani su inmesi neticesinde gerilme durumu Şekil 3.2’ de verilmiştir.



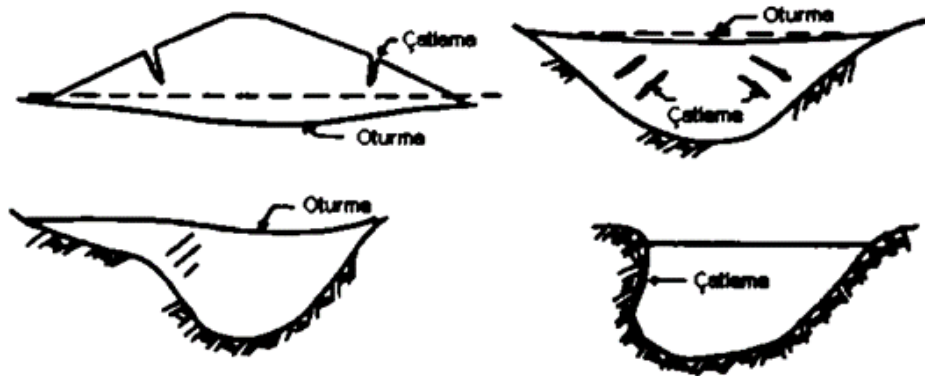
Şekil 3.2. Ani su inmesi neticesinde gerilme durumu (Berilgen ve ark., 2014).

3.2.1.2. Toprak basıncı

Zeminin yapılar üzerinde oluşturduğu yüklere toprak basıncı, zemin arasındaki boşlukların suyla dolu olması sonucu zemin boşluklarındaki basınca boşluk suyu basıncı denir. Zemin arasındaki boşluklar suyla dolu olduğunda, baraj temelleri ve baraj elemanları zemin ve boşluk suyu basınçlarının birleşik etkisiyle oluşan yüklere maruz kalır. Dolgu içindeki ve beton yapı üzerindeki toprak basıncı toplam basınç hücreleri ile ölçülür (Ağırlioğlu, 2011).

3.2.1.3. Deformasyonlar (Yer değiştirmeler)

Barajlar sismik hareketler, rezervuar suyu, yeraltı suyu, hızlı rezervuar boşalımı, heyelan, oyulma, kil şişmesi, ana kaya sıcaklığı değişiklikleri, ana kayada oluşan yaşlanma ve borulanma gibi iç ve dış etkilerden dolayı şekil değiştirmektedir. Yapıyı ve çevresini etkileyen iç ve dış faktörlerin neden olduğu şekil değişikliklerine deformasyon denir. İç ve dış etkilerden kaynaklanan yükler genellikle sabit değildir ve zamanla değişebilmektedir. Barajlarda birçok nedenden dolayı deformasyon oluşmaktadır. Barajlardaki oturmalar sonucu oluşan deformasyonlar Şekil 3.3’ te verilmiştir.



Şekil 3.3. Barajlarda oturmalar sonucu oluşan deformasyonlar (Berkün, 2007).

Rezervuardaki su seviyesi ile baraj yüzeyinin deformasyonu arasında bir ilişki bulunmaktadır. Bu durum baraj deformasyonunun temel sebebinin rezervuardaki su seviyesi değişimleri olduğunu göstermektedir (Al-Jassani ve Konuk, 2021).

Barajlarda oluşan deformasyonlar temel olarak aşağıdaki nedenlerden dolayı ölçülmektedir (Bilir ve ark., 2009):

- Baraj gövdesinde ve çevresinde oluşması muhtemel olağandışı davranışların önceden tespit edilmesi,
- Projede kabul edilen hesapların sınanması için beklenen hareketlerle gerçek hareketlerin karşılaştırılması,
- Statik hesap modelinin kalibrasyonunun yapılması.

Gövde dolgusu bittikten sonra oluşan konsolidasyon sonucu hem gövde dolgusunda hem de temel zemininde az ya da çok oturma meydana gelmektedir. Genel itibariyle oturmalar iki kısma ayrılmaktadır: inşaat oturması (ani oturma) ve konsolidasyon oturması. Bu oturmalar sonucu baraj gövdesinin hava payında önemli ölçüde bir azalma veya baraj yapılarında hasar meydana gelebilir (Mısırlıoğlu ve ark., 2012).

Konsolidasyon oturmasının temel sebepleri şunlardır (Mısırlıoğlu ve ark., 2012):

- Geçirimsiz dolgu malzemesinde meydana gelen fazla konsolidasyon oturması,
- İnşaat sırasında dolgu tabakasının kalınlığının şartnamede belirtilenden daha fazla olması,
- İnşaat sırasında dolgunun nem içeriğinin istenilen sınırlar içerisinde olmaması.

Hiçbir baraj deformasyon açısından birbirinin aynısı değildir. Bu nedenle bir barajın performansına bakılarak yapılan yorumlar diğer baraja uygun olmayabilir. Bu nedenle her barajın çeşitli cihazlarla düzenli olarak izlenmesi gerekir (Kürklü ve Zorluer, 2007).

Deformasyonlar, oluşan şekil değiştirmelerin niteliğine göre kalıcı ve elastik deformasyon olmak üzere iki gruba ayrılır. Elastik deformasyonlara eğilme ve burulma, kalıcı deformasyonlara çökme, ötelenme ve dönme örnek verilebilir (Taşçı ve ark., 2004).

Detaylı oturma analizleri yapılarak oluşması muhtemel oturma miktarlarının belirlenmesi gerekmektedir. Aşırı oturmaların olabileceği durumlardan bazıları şunlardır (Mısırlıoğlu ve ark., 2012):

- Çok yüksek dolgular,
- Sıkışması fazla olan dolgu malzemeleri kullanılarak yapılan dolgular,
- Sıkışması fazla olan zayıf temellerde inşa edilen dolgular,
- Sıkışması fazla olan zayıf temeller üzerine oturan baraj gövdesinde beton ve çelik sanat yapıları bulunması.

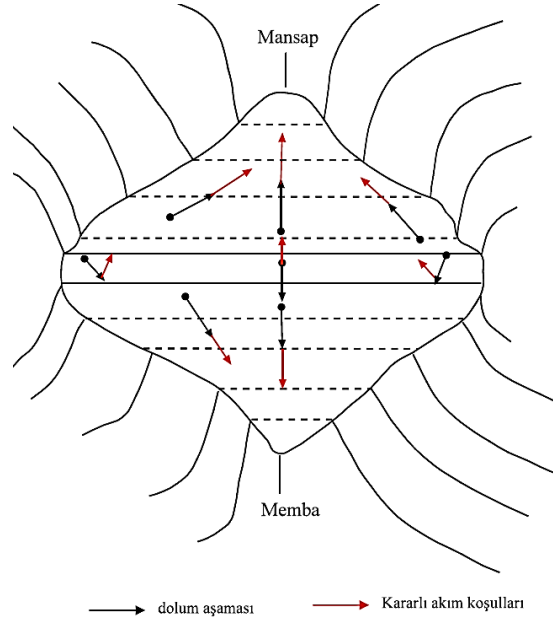
Barajların deformasyon mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için yük ve deplasman arasındaki ilişkinin bulunması gerekmektedir (Taşçı ve ark., 2004).

Dolgudaki deformasyonların büyüklüğü ve yönü çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerin planlama aşamasında yapılacak geoteknik çalışmalarla belirlenerek, tanımlanan temel koşullarına ve malzeme özelliklerine göre tasarlanması gerekmektedir. Bir proje planlanırken tüm bu faktörler özenle dikkate alınmalıdır. Bu faktörler USBR (1992) tarafından aşağıdaki gibi özetlemiştir (Tosun ve ark., 2007b):

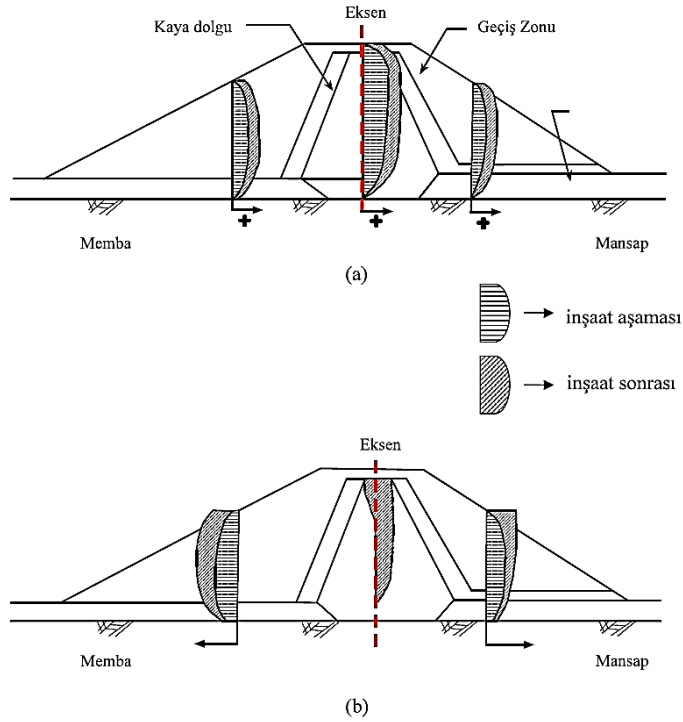
- Temel zemininin ve kullanılacak olan dolgu malzemelerinin özellikleri,
- Gövde dolgusunun yerleştirilme aşamaları ve sıkıştırılması,
- Baraj sahasındaki yamaçların ve gövde dolgusunun geometrisi,
- Temel zemini ve gövde dolgusunu oluşturan zonların ve tabakaların gerilme dağılımı,
- Rezervuar su seviyesinden kaynaklı gövdede oluşan yükleme koşulları.

Gövde dolgularında meydana gelen oturmalar; rezervuarın su dolumu aşamasında farklı şekilde oluşur. Baraj gövdesinde oluşan yatay deformasyonların plan üzerindeki genel dağılımı Şekil 3.4' te görülmektedir (Tosun ve ark., 2007b). Buna göre bir dolgu baraj haznesinin ilk dolumu sırasında oluşan yatay deformasyonlar, memba ve mansap şevlerinin eğimi yönünde ve kretten membaya doğru olmaktadır. Rezervuarda kararlı akım koşullarının oluşmaya başlamasıyla, memba ve mansap şevlerinde oluşan yatay deplasmanlar aynı yönde gelişirken, krette ise mansap yönünde gelişmektedir (Tosun ve ark., 2007b).

Şekil 3.5' te, bir dolgu barajdaki en büyük kesitte oluşacak olan oturmaların ve yanal yönde oluşacak olan deformasyonların inşaat sırasındaki ve inşaat sonrasındaki aşamaları için dağılımı görülmektedir.



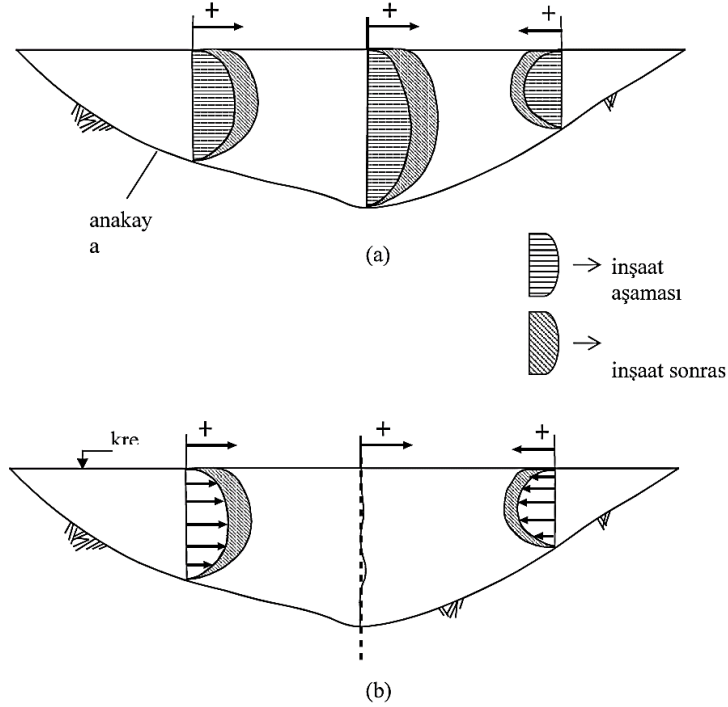
Şekil 3.4. Dolgu barajlarda yatay deformasyonların genel dağılımı (Tosun ve ark., 2007b).



Şekil 3.5. Bir dolgu barajda en büyük kesit boyunca oluşan hareketler, (a) oturmalar (b) yanal deformasyonlar (Tosun ve ark., 2007b).

Şekil 3.5' te görüldüğü gibi barajın en büyük kesitinde oluşacak oturmaların dağılımı parabolik bir şekil göstermekte olup, oturmaların büyük bir bölümü, inşaat aşamasında oluşmaktadır. Yanal yönde oluşacak deformasyonların neredeyse tamamı inşaat sonunda oluşmakta ve gövde dolgusunun memba ve mansap kısımlarında kendi yönlerinde, krette ise büyük oranda mansap yönündedir (Tosun ve ark., 2007b).

USBR (1992)' de, barajın boy kesiti boyunca meydana gelecek oturmaların ve yanıl yönde deformasyonların, vadi geometrisi ile ilgili olduğu belirtilmiştir (Tosun ve ark., 2007b). Baraj eksenini boyunca oluşun hareketler Şekil 3.6' da verilmiştir.



Şekil 3.6. Baraj eksenini boyunca oluşun hareketler, (a) oturmalar (b) yanıl deformasyonlar (Tosun ve ark., 2007b).

Şekil 3.5' de görüldüğü gibi, en büyük dolgu kesitinde düşey yönde en büyük oturma oluşmakta, boy eksenini boyunca meydana gelecek olan oturma ve yatay yöndeki deformasyonların yönsel bir büyüklüğü olmamaktadır. Ayrıca talveg boyunca vadinin en derin kısmındaki yatay yöndeki deplasmanlar oldukça azdır (Tosun ve ark., 2007b).

İnşaat sonrasında meydana gelecek olan oturmalar barajın kretinde farklı bir dağılıma neden olmakta ve büyük ölçüde inşaat sırasında dolguda oluşun aşırı boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesinden kaynaklanmaktadır. İnşaat sonrası yatay yönde oluşacak hareketteki değişim esas olarak dolgu elemanlarının özelliklerine bağlıdır. Aslında ortaya çıkan yatay deformasyonların büyüklüğü düşey değerlerle karşılaştırıldığında oldukça küçüktür. Ancak yatay ve düşey deformasyon büyüklükleri arasındaki ilişkinin; baraj geometrisinin durumuna, barajın zonlarına ve kullanılan malzemelerin özelliklerine göre değişiklik gösterdiğini belirtmek gerekir. Uygulamalarda öncelikle düşey yöndeki oturma analizi yapılır. Sonuçların kabul edilebilir sınırlar içerisinde olması durumunda yatay yöndeki deplasmanların da kabul edilebilir sınırlar içerisinde olacağı varsayılmaktadır (Tosun ve ark., 2007b).

Dolguda meydana gelecek deformasyonları sınırlamak amacıyla beş ana önlem alınabilir. Bunlar (Tosun ve ark., 2007b);

- (1) Uygun olmayan temel zemini malzemesinin kazılarak uygun malzeme ile değiştirilmesi,
- (2) Dolgu için kullanıma uygun olmayan malzemenin kullanılmaması,
- (3) Uygun olmayan ve dolgu ile birlikte kullanılabileceği düşünülen temel zemininin kazılmayarak iyileştirilmesi,
- (4) Zayıf malzemelerin stabilite dolguları ile yüklenmesi,
- (5) Zayıf malzemelerin zemin donatıları ile güçlendirilmesi.

Önyüzü beton kaplı kaya dolgu barajlarda, dolgudaki deplasmanlar önyüz betonunun uzun vadeli stabilitesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle inşaat aşamasında oluşan deplasman ve gerilmelerin detaylı olarak ölçülüp değerlendirilmesi gerekmektedir (Türköz ve ark., 2009).

Beton yapılar; boşluk suyu basıncı, iklim koşulları, beton üzerindeki alkali agregaların etkisi gibi iç kuvvetler ile rezervuarın su seviyesi ve sıcaklığı, suyun kaldırma kuvveti, deprem, rüzgâr, kil şişmesi, oyulma, buz, baraj üstünden su aşması ve baraj temelinin oturması gibi dış kuvvetler etkisiyle şekil değiştirirler ve bu yüklerin belirli sınırlar içinde kalması koşuluyla, bu yükler sonucu oluşan hareketler normal kabul edilebilir ve yapıyı tehlikeye sokmazlar. Dolguların beton yapılara oranla daha az kırılğan olması sebebiyle dolgular daha büyük hareketlere tehlikesiz bir şekilde dayanabilirler. Bu nedenle dolgu barajlar için yapılan yüzey hareketi ölçümleri genellikle beton yapılar için yapılan yüzey hareketi ölçümlerine göre daha az hassasiyete sahiptir. Yüzey hareketlerindeki ani veya beklenmedik yön, büyüklük gibi değişiklikler sorunlara işaret edebilmektedir (Ağırlioğlu, 2011).

Baraj gövdesi ve çevresinde yapılan deformasyon ölçümlerinin amacı şunlardır (Gülal ve Hoşbaş, 2000):

- (1) Baraj gövdesi ve çevresinde oluşabilecek olağan dışı deformasyonların önceden tespit edilmesi,
- (2) Projedeki hesapların kontrolü için beklenen hareketlerle, gerçek zamanlı hareketlerin karşılaştırılması ve
- (3) Gerçek zamanlı hareketler göz önüne alınarak hesaplama modelinin kalibrasyonu.

Barajlarda deformasyon izleme yöntemleri

Bir yapının kendisinde ve çevresindeki deformasyonların belirlenmesi ve izlenmesi amacıyla yapılan ölçümlere deformasyon ölçümleri, farklı zamanlarda yapılan ölçümlerin yorumlanarak yer, zaman ve büyüklük parametreleri açısından değişmelerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesine deformasyon analizi denir (Taşçı ve ark., 2004).

Baraj gövdesi ve çevresindeki deformasyonların tespit edilmesi amacıyla jeodezik ve jeodezik olmayan birçok yöntem kullanılmaktadır (Kalkan, 2014).

Jeodezik deformasyon ölçümleri ile baraj üzerinde belirlenen noktaların konumlarındaki değişimler, ölçme tekniği yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir (Gülal ve Hoşbaş, 2000).

Jeodezik yöntemlerle deformasyonların ölçülmesinin genel işleyişi, deformasyonun beklendiği yerde nesneyi temsil etmek üzere oluşturulan hedef noktaların, belirli sağlam noktalar üzerinde tanımlanmış sabit referans noktalarından belirli zaman aralıklarında gözlemlenmesi ve sabit referans noktaların konumunda değişiklik olup olmadığının tespit edilmesidir. Tek bir ölçüm ile deformasyonların tespit edilmesi mümkün olmayıp, en az iki farklı zamanda ölçülmüş veriye ihtiyaç duyulmaktadır (Taşçı ve ark., 2004).

Beton barajlarda izin verilebilecek eğilme miktarının (1–5 cm) küçük, dolgu barajlarda ise izin verilebilecek oturma miktarlarının (5–100 cm) büyük olması sebebiyle, seçilmesi gereken deformasyon ölçü sistemleri baraj tipine göre farklı olmaktadır (Taşçı ve ark., 2004).

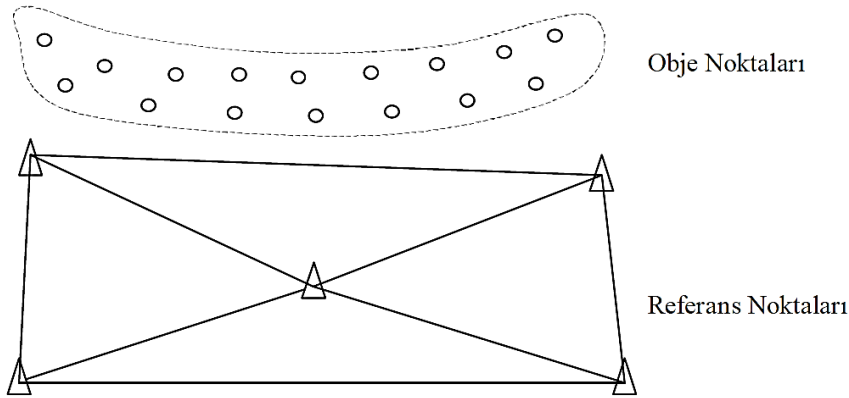
Barajlarda yer değiştirme miktarlarının hassas bir şekilde belirlenmesi gerektiğinden, baraj alanı ve çevresini kapsayan, amaca uygun ölçüm aletleri ile jeodezik deformasyon ağı kurulmalı ve sonuçlar yorumlanırken uygun analiz yöntemleri tercih edilmelidir (Taşçı ve ark., 2004).

Jeodezik deformasyon izleme yöntemleri ile bu yöntemlerde kullanılan alet ve donanımlar Tablo 3.4' te verilmiştir.

Tablo 3.4. Jeodezik yöntemler ve kullanılan alet ve donanımlar (Kalkan, 2009).

Jeodezik Yöntemler	Kullanılan Alet ve Donanımlar
Aliynman Ölçmeleri	Teodolit, Laser Optik, İnvar Tel vb.
Klasik Konum Ölçmeleri	Total Station, Teodolit ve Uzaklık Ölçer
Uydu Bazlı Konum Ölçmeleri	GNSS Alıcıları (GPS, GLONAS ve GALILO Alıcıları)
Presizyonlu (Hassas) Trigonometrik Nivelman Ölçmeleri	Presizyonlu (Hassas) Total Station, Teodolit ve Uzaklık Ölçer
Presizyonlu (Hassas) Geometrik Nivelman Ölçmeleri	Presizyonlu (Hassas) Nivelman Donanımı
Laser Tarama (Scaner) Tekniği	Laser Tarayıcı (Scaner)
İnterferometrik SAR Görüntü Tekniği	SAR Uydu Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Yatay ve düşey yöndeki deformasyonlar en genel haliyle, bu amaçla oluşturulan deformasyon ağlarında periyodik şekilde yapılan klasik ve uydu bazlı ölçümlerle izlenmektedir. Burada amaç, alan dışından seçilen referans noktalarına göre baraj gövdesinin ve yakın çevresinin konumlarındaki değişikliklerin oransal olarak belirlenmesidir. Beklenen deformasyona sahip nesnelere, nesne noktaları (deformasyon noktaları) ile temsil edilmektedirler (Kalkan, 2009). Jeodezik yöntemle deformasyon izleme ağına ait görsel Şekil 3.7’ de verilmiştir.



Şekil 3.7. Jeodezik yöntemle deformasyon izleme ağı (Kalkan, 2009).

Kullanılacak olan jeodezik yöntemin ve ölçüm periyodunun seçimi ile bu ölçümlerin standartları, izlenen barajın tipine, beklenen deformasyonların türüne ve barajın aşamasına göre değişmektedir. Tablo 3.5’ te beton kemer ve kaya dolgu barajlardaki deformasyon ölçmelerinde uygulanması önerilen bazı doğruluk kriterleri verilmiştir (Kalkan, 2009).

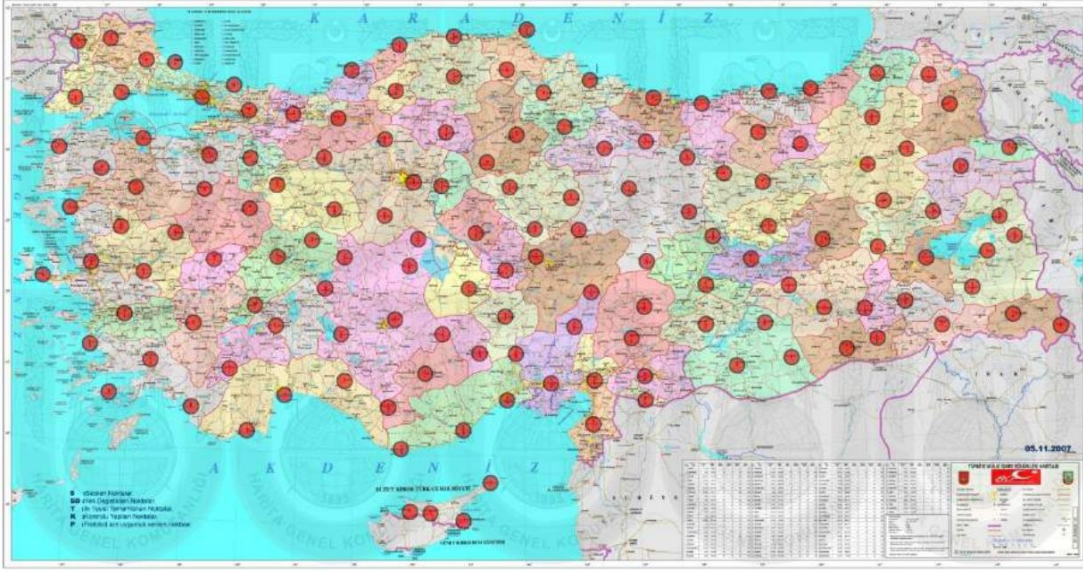
Tablo 3.5. Barajlardaki deformasyon ölçmelerinde uygulanan bazı doğruluk kriterleri (Kalkan, 2009).

Baraj Tipi	Beton Kemer	Kaya Dolgu
İzleme Doğruluğu	<i>Uzun Periyotlu Ölçmelerde</i>	<i>Uzun Periyotlu Ölçmelerde</i>
	• Yatay Yer Değiştirme: $\pm 5-10$ mm • Düşey Yer Değiştirme: ± 2 mm	• Yatay Yer Değiştirme: $\pm 20-30$ mm • Düşey Yer Değiştirme: ± 10 mm
	<i>Kısa Periyotlu Ölçmelerde</i> Derz ve Çatlak Ölçmelerinde: 0,2 mm	<i>Kontrol Yapılarında</i> Oyulma/Erezyon/Dolma: $\pm 20-30$ mm

GNSS (Global Navigation Satellite System-Küresel Navigasyon Uydu Sistemi), LIDAR (Light Detection and Ranging-Işık Algılama ve Mesafe Belirleme) vb. yeni ölçme/konum belirleme teknolojileri ve GIS (GeoInformation Systems-Coğrafi Bilgi Sistemleri) gibi bilgi teknolojileri, özellikle barajların teknik bakımdan durumlarının sürekli saptanarak tüm bilgilerin bir veri tabanında toplanıp devamlı izlenmesini sağlamakta, böylece barajların güvenlikleri için çok etkili denetim ve yönetim olanakları sunmaktadırlar (Uzel ve ark., 2012).

GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri), GPS (ABD), GLONASS (Rusya), Galileo (AB), Compas (Çin), vb. tarafından geliştirilen uyduları kullanarak küresel ölçüm/konum belirleme sistemleridir. GNSS sistemleri dünyanın her noktasından kesintisiz olarak ölçüm/konum belirleyebilmektedir. CORS (Sürekli Çalışan GPS Referans İstasyonları) sistemi sürekli çalışmakta ve her saniye milimetrik hassasiyetle konum belirlemekte, ayrıca çevresinde belirli bir alan içerisinde bulunan GPS cihazlarının konumlarını santimetre hassasiyetine kadar belirleyebilmeleri için düzeltme değerleri yayınlamaktadır (Uzel ve ark., 2012).

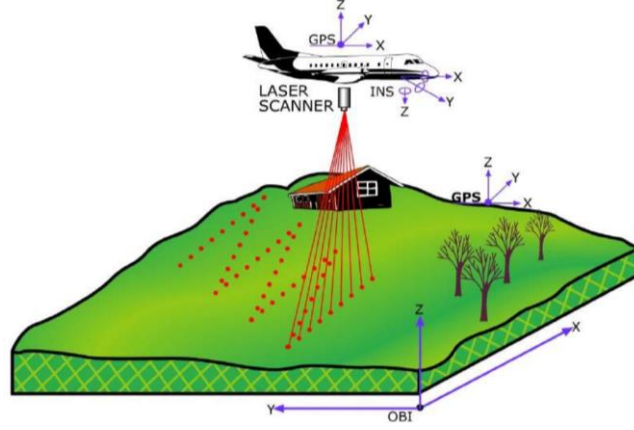
İstanbul Kültür Üniversitesi akademisyenleri tarafından 2006 yılında “Ulusal CORS Sisteminin Kurulması ve Hücresel Dönüşüm Parametrelerinin Hesaplanması Projesi” hazırlanmış, proje 2009 yılında tamamlanarak Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü ve Harita Genel Komutanlığı’na işletilmek üzere devredilmiştir. Proje kapsamında 147 adet sabit GPS istasyonu kurulmuştur (Uzel ve ark., 2012). Şekil 3.8’ de söz konusu proje kapsamında kurulmuş olan GPS istasyonlarının yerlerini gösteren görsel verilmiştir.



Şekil 3.8. CORS-TR istasyonları (Uzel ve ark., 2012).

CORS-TR olarak adlandırılan bu sistem kurulduğu günden bu yana Türkiye genelinde ve KKTC sınırlarında kesintisiz olarak çalışıp 2-3 cm hassasiyetle konum belirleyebilmektedir. Baraj deformasyonlarının izlenmesi bu sistem sayesinde oldukça kolaylaşmaktadır. Barajdaki kritik noktalara ve baraj çevresine yerleştirilen GPS cihazları ve iletişim sistemleri, koordinat değerlerini sürekli hesaplayarak merkeze iletebilmektedir. Merkezde oluşturulan CBS bünyesindeki baraj güvenliğini izleme ve değerlendirme, erken afet uyarı sistemleri; gelen verileri değerlendirerek gerekli analizleri gerçekleştirir ve ilgili kişi ve kurumları uyararak alınabilecek tedbirler konusunda bilgilendirme yapar (Uzel ve ark., 2012).

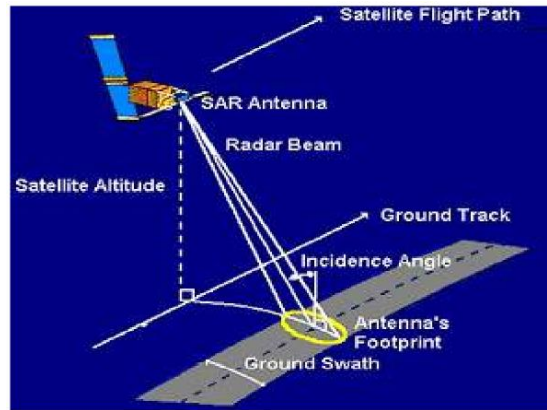
Baraj gövdesi ve çevresinde oluşan deformasyonları milimetre ölçeğinde belirlemek için kullanılacak bir diğer teknik ise LIDAR (Işık Algılama ve Uzaklık Belirleme)'dir. LIDAR teknolojisinde, cihazdan gönderilen lazer ışınlarının gönderildikleri yüzeye çarparak geri yansıması sonucu, ışının gidiş geliş süresi hesaplanarak yüzeyin konumu belirlenmektedir. Böylelikle tüm yüzey LIDAR teknolojisiyle hızlı bir şekilde taranabilmektedir (Uzel ve ark., 2012). LIDAR teknolojisini gösteren görsel Şekil 3.9' da verilmiştir.



Şekil 3.9. LIDAR teknolojisi (Uzel ve ark., 2012).

LIDAR teknolojisi ile alınan ilk ölçüm referans kabul edilerek, sonraki tüm ölçümler ile referans ölçümleri arasındaki farklar deformasyonları göstermektedir (Uzel ve ark., 2012).

İki farklı elektromanyetik dalganın (ışık vb.) üst üste binmesiyle bazı noktalarda sönme, bazı noktalarda kuvvetlenme etkisi meydana gelir ve sonuçta enterferans (girişim) franjları oluşur. Farklı zamanlarda aynı noktaya ait iki görüntü üst üste bindirildiğinde, noktalarda zaman içerisinde yer değiştirme olduysa görüntüde enterferans franjları oluşacaktır. Oluşan bu franjların değişimleri ölçülerek o noktaya ait deplasman/deformasyon değerleri elde edilebilir (Uzel ve ark., 2012). InSAR teknolojisini gösteren görsel Şekil 3.10' da verilmiştir.



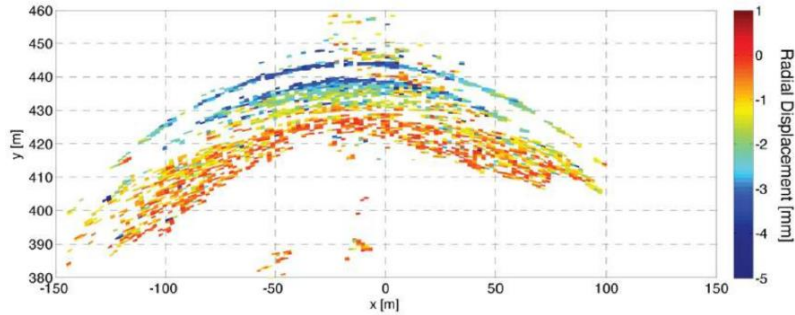
Şekil 3.10. InSAR teknolojisi (Uzel ve ark., 2012).

InSAR yöntemiyle, yüzey deformasyonları ve özellikle oluşacak olan düşey hareketler, milimetre ölçeğinde tespit edilebilmektedir. InSAR verilerinin GPS ile kullanılması sonucu GPS' in yüksek yatay konum tespit duyarlılığından kaynaklı olarak noktaların deformasyonları yatay ve düşey yönde çok hassas olarak ölçülebilmektedir (Uzel ve ark., 2012).

Son yıllarda kullanılmaya başlanan yersel InSAR yöntemi ile havadan InSAR yöntemi arasında çok benzerlikler bulunmaktadır. Barajı cepheden görecek şekilde yerleştirilen yersel InSAR cihazının baraj gövdesini taraması ile bulunan enterferans franjlarının değerlendirilmesi sonucu baraj gövdesinde oluşan deformasyonlar milimetre hassasiyetinde tespit edilebilmektedir (Uzel ve ark., 2012). InSAR yöntemi ile baraj gövdesinin taranmasına ait görsel Şekil 3.11’de, örnek bir baraj gövdesinde oluşan deformasyonların InSAR yöntemi ile elde edilmiş hali Şekil 3.12’ de görülmektedir.



Şekil 3.11. Yersel InSAR ile baraj gövdesinin taranması (Uzel ve ark., 2012).



Şekil 3.12. Baraj gövdesindeki deformasyonlar (Uzel ve ark., 2012).

Jeodezik olmayan yöntemlerde, baraj gövdesinin farklı derinliklerdeki yatay-düşey hareketlerinin yanı sıra, baraj ve çevresinin deformasyonuna neden olan yük değişiklikleri, yeraltı suyu seviyesindeki değişiklikler, gerilmeler, ana kaya stabilitesi, sıcaklık değişiklikleri gibi çeşitli faktörlerin büyüklüğü ve değişimleri de dikkate alınır ve özel ölçüm sistemleriyle periyodik olarak ölçülerek izlenir (Kalkan, 2014).

Jeodezik olmayan yöntemler ve kullanılan ölçüm aletleri Tablo 3.6’ da verilmiştir.

Tablo 3.6. Jeodezik olmayan yöntemler ve ölçme donanımları (Kalkan, 2009).

Jeodezik Olmayan Yöntemler	Kullanılan Alet ve Donanımlar
Eğim Ölçmeleri	İnclinometreler
Düşey Yer Değiştirme (Deplasman) Ölçmeleri	Oturma Kolonları (Settlement Tubes)
Uzunluk Değişim Ölçmeleri	Extensometreler
Boşluk Suyu Basıncı Ölçmeleri	Piezometreler
Düşeyden Ayrılma Ölçmeleri	Reversed Pendulum
Derz Ölçmeleri	Jointmetreler
Çatlak Ölçmeleri	Crackmetreler

Bu aletlerin büyük bir bölümü, kablolu ve borulu aletler olarak bilinmekte ve otomatik olarak izleme ve kayıt yaparak verileri belirlenen merkezlerde toplayabilmektedir (Kalkan, 2014).

3.2.1.4. Sızma

Suyun baraj, temel veya şevlerdeki zemin dokuları arasındaki hareketi sızma olarak tanımlanmaktadır. Kaçak ise suyun deliklerden veya çatlaklardan akmasıdır. Barajların memba ve mansap kısmındaki su seviyeleri çeşitli sızmalara ve kaçaklara neden olmaktadır. Oluşacak olan sızma ve kaçak miktarı, zeminlerin geçirimsizliği ve su basıncıyla doğru orantılıdır (Ağırlioğlu, 2011).

Günümüzde baraj güvenliği açısından en önemli husus, oluşabilecek hidrolik çatlama sonucu meydana gelebilecek olan sızıntı ve yıkanmanın dikkate alınmasıdır. Aşırı deformasyon sonucu çekme gerilmesinin arttığı bölgelerde çatlaklar oluşabilir. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, çekme kuvvetlerinden kaynaklanan birim deformasyonun fazla olabileceği noktalar tahmin edilebilmektedir. Ancak sonlu elemanlar analizinde zemin özellikleri ve inşaat süreci çeşitli kabullere dayanabildiğinden, oluşacak gerçek gerilmeler ve şekil değiştirmeler hakkında her zaman belirsizlik bulunmaktadır. Bundan dolayı filtre ve drenler gibi elemanlar sızma kontrolü açısından önemini korumaktadır (Yıldız, 2007).

Sızıntının barajın farklı bölgelerinde oluşabilmesi mümkün olduğundan mansap tarafında, yamaçlarda, drenlerde veya topuk drenlerinde sızma ölçümleri yapılır. Kullanılacak olan sızma ölçüm cihazları barajın proje aşamasında belirlenmelidir. Drenlerde toplanan suların sızma ölçümlerinin ve tahkiklerinin yapılması gerekmektedir. Sızma ölçümlerinde eşeller ve hızölçerler (velocitymeter) kullanılmaktadır. Sızma ölçümleri sızan suyun debisinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Sızma miktarındaki kararlı ve yavaş bir artış, problemlerin ortaya

çıkabileceğinin bir işaretidir. Ayrıca sızan sudan numune alınarak su kalitesi analizi yapılmalı, sızan suyun malzeme taşıyıp taşımadığına bakılmalı ve taşınan malzeme varsa bu malzemenin askı maddesi mi yoksa çözüntü maddesi mi olduğu belirlenmelidir. Çünkü alçı gibi çözünme özelliği olan temeller üzerinde inşa edilmiş barajlarda sızma zamanla artabilmektedir (Ağırlioğlu, 2011).

Filtreler, sızma sularının toplanarak tahliye edilmesi amacıyla, baraj gövde dolgusunun içerisine veya barajın temel zeminine yerleştirilirler. Sızma sularının toplanarak tahliye edilmesi sonucu boşluk suyu basıncını azaltır ve sızıntıdan kaynaklı erozyon ve borulanma önlenir.

Mansap filtrelerinin, barajda bulunan diğer filtrelere göre daha önemli olmasının temel nedeni kabul görmüş literatüre göre projelendirildiklerinde, dolgu barajların hasar görme oranını önemli ölçüde azaltmalarındadır (Özoral, 2009).

ABD Su İşleri Teşkilatı tarafından 1960'lı yıllara kadar yapılan çalışmalar sonucu; toprak dolgu barajların bazılarında filtre ve dren zonlarının ince daneler ile tıkanması sebebiyle istenildiği şekilde çalışmadığı ve sonuçta deşarj kapasitelerinin ihtiyaç duyulandan çok altında olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde ülkemizdeki barajlarda bulunan filtre zonlarının işlevlerini istenildiği şekilde yerine getirmemesi sonucu freatik hattın yükselmesi ile mansaptaki kabuk dolgusunun kısmi doygun hale geldiği ve barajın stabilitesini bozarak baraj güvenliğini riske soktuğu bazı örnekler bulunmaktadır (Tosun ve ark., 2007c).

Sızma ve oluşan kaçak su miktarlarına etki eden faktörlerden rezervuar su seviyesi dışındaki diğer faktörlerin birçoğu barajın ömrü süresince değişmemektedir. Sızma ve oluşan kaçak suyun hacmi direkt olarak rezervuardaki suyun seviyesi ile ilgili olduğundan rezervuardaki suyun seviyesinden kaynaklanmayan sızma ve kaçak su hacmindeki değişiklikler tespit edildiği anda değerlendirilmelidir. Sızma ve oluşan kaçak su miktarındaki artışlar borulanmanın göstergesi olabileceğinden, rezervuardaki su seviyesinden kaynaklı hızlı değişimler incelenmeli ve değerlendirilmelidir. Sızma ve kaçak su miktarındaki azalma filtre ve dren zonlarında oluşan bir tıkanıklığı işaret etmekte ve sonrasında ölçüm yerinden farklı bir noktada borulanma sonucu sızıntı artışına neden olabilmektedir (Ağırlioğlu, 2011).

Yeni yapılan bir barajda sızma veya kaçak su miktarını etkileyen bir diğer değişken ise zamandan bağımsız olan freatik hattın (sızma çizgisi) değişmesidir. Zamandan

bağımsız olan freatik hattın oluşması yılları bulabilmekte, yıllar içerisinde sızma ve kaçak su miktarında zamanla artış meydana gelebilmektedir (Ağırlioğlu, 2011).

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlardaki kaya dolgu zonu sayesinde açık bir sızma hattı oluştuğundan bu durum, baraj gövdesinde iç su basıncına ve iç erozyona neden olmamaktadır. Dolayısıyla ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlarda oluşan sızma normal kabul edilir. Aynı durumu kum-çakıl dolgu barajlar için söylemek mümkün değildir (Yenigün ve Yüzgöl, 2013).

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlardaki beton plak ile alttaki dolgu zonu arasında meydana gelen ayrılma sonucu beton plak üzerinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklara bağlı olarak sızma riski artmaktadır (Türköz ve ark., 2009).

Toprak dolgu barajlardaki göçmenin önemli nedenlerinden biri de içsel erozyondur. İçsel erozyon, dolguda kullanılan zemine göre farklı şekillerde meydana gelmektedir. İçsel erozyon göçmesinin oluşmasında, dolguda kullanılan kilin dispersif olup olmamasının etkisi büyüktür. Dispersif killer, suyun yavaş hareket etmesi ile dahi suyun içerisinde dağılarak kolayca erozyona uğrayabilen killer olarak tanımlanmaktadır. Dispersif killer içerisinde bulunan koloidal kil mineralleri, dispersif olmayan killerden farklı olarak su ile birlikte solüsyon haline gelmektedir. Suyun akış halinde olması durumunda dispersif killer, su ile birlikte taşınarak kil zonu dağılmasına ve ayrışmasına neden olmaktadır. Dolgu barajlarda meydana gelen bu tip erozyonlar genellikle oturma, hidrolik çatlak ve kuruma oluşan bölgeler ile dolgu zonu içerisinde göreceli olarak yüksek permeabilitenin meydana geldiği yerlerde görülmektedir (Savaş ve ark., 2007).

3.2.1.5. Sismik yükler

Barajların projelendirilmesindeki en önemli aşamalar arasında barajın sismik tehlike ve riskinin belirlenmesi bulunmaktadır. Sismik tehlike hesaplarında temel hedef olan yer hareketinin tahmin edilmesi işlemi; jeofizik, jeoloji, sismoloji, geoteknik ve yapı mühendisliği gibi birçok farklı disiplinlerin ortaya koyduğu bilgi ve verilerin değerlendirilmesi ile mümkün olabilmektedir (Seyrek ve ark., 2009).

Deprem sonucu ortaya çıkan güçlü yer hareketleri, barajda büyük atalet kuvvetleri oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yüksek deprenselliğe sahip yerlerde, deprem etkilerinin emniyetli bir şekilde karşılanabilmesi önemli bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Deprem sonrasında dolgu baraj yıkılmalarına çok rastlanmamakla birlikte, deprem etkisi ile meydana gelen; oturmalar, baraj eksenine paralel ve dik yönlerde oluşan çatlaklar, sızdırmalar, göbeklenmeler, şevlerde meydana gelen kayma veya çökmeler, kaplamalarda oluşan çatlama veya yer değiştirmeler gibi hasarlar dolgu barajlarda daha sık görülmektedir. Bu nedenle; barajın deprem esnasındaki davranışını tespit ederek barajı depreme dayanıklı hale getirebilmek için dinamik analiz yöntemleri kullanılmakta ve projelendirme ve inşaa sırasında dikkat edilmesi gereken noktalar belirlenmektedir (Aydın, 2007).

Baraj yapıları, sıvı-yapı etkileşimi altında olan yapı grubunda yer almaktadır. Deprem sonucu oluşan dinamik etkiler sonrası yapı ile sıvı birbirlerinin dinamik davranışına önemli ölçüde etki etmektedir. Sıvıdan kaynaklı oluşan hidrodinamik basınçlar, barajda ilave yükler oluşmasına neden olmaktadır. Sıvı ile yapının birbiri ile olan etkileşiminin modellenmesinde Lagrange, Euler ve Kütle Ekleme yöntemlerinden herhangi biri kullanılabilir (Karaton ve Calayır, 2009).

Deprem sırasında ortaya çıkan dinamik etkiler sonucu barajda oluşacak deformasyonları etkileyen kritik faktörlerden biri inşaatın kalitesidir. Sıkıştırması iyi yapılmamış olan dolgu barajlar, depremler sonucu büyük zararlar görebilmektedir (Al-Jassani ve Konuk, 2021).

Kuvvetli hareket sismografları deprem sarsıntısının ivmesini kaydederler. Deprem sonucu barajlarda meydana gelen dinamik davranışların değerlendirilmesinde deprem sarsıntılarının ivmesini kaydeden kuvvetli hareket ivme ölçerlerinin kaydettiği veriler kullanılmaktadır (Ağırlioğlu, 2011).

Sismik aktivitesi yüksek olan bölgelerde kapaklı dolusavağa sahip bir dolgu barajın tercih edilmesi, oluşacak yer sarsıntıları sonucu beton dolusavak yapısında dolgu baraj gövdesine göre daha büyük problemler oluşması nedeniyle riskli bir seçim olacaktır (Yıldız, 1992).

Dolgu barajlardaki sismik performans, dolguda kullanılan malzeme ve temel zemininin özelliklerine bağlıdır. Deprem sonucu oluşan salınımlardan kaynaklı olarak dolgu barajın stabilitesinde problem oluşabilmektedir. Deprem sonucu oluşan güçlü yer hareketleri, temel zemininde dayanım kaybı oluşturabilmekte ve baraj dolgusunda beklenmedik deformasyonların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Tosun ve ark., 2007b).

Teorik ve gözlemsel çalışmalar, deprem yükleri altında dolgu barajların yıkılmasının stabilitenin korunamayarak baraj şevlerinin ve destek yapılarının yenilmesi, baraj dolgusu ve temel zemini malzemelerinin sıvılaşması ve dispersif killerdeki dinamik etkiler ile borulanma mekanizmasının oluşması gibi temel nedenlerden kaynaklı olduğunu göstermiştir. Genellikle dolguda kullanılan dolgu malzemelerinin deprem yükleri altında mukavim davranış göstermeleri ve şev eğimleri projelendirilirken güvenli tarafta kalınması sebebi ile depremden kaynaklı baraj yıkılmaları ile sıklıkla karşılaşılmasa da, dolgu barajlarda depremler sonucu dolguda oturmalar, baraj eksenine paralel ve dik yönde oluşan çatlaklar, sızmalar, göbekenme, şevlerde kaymalar ya da çökmeler, geçirimsiz beton kaplamalarında çatlamlar ya da yer değiştirmeler gibi hasarlar oluşabilmektedir. Sıvılaşma sebebiyle ise daha çok suya doygun olan memba filtre zonlarında ve temel alüvyonlarında hasarlar görülmektedir. Sıvılaşmanın başlaması sonrası baraj stabilitesinin korunması çok zordur (Unutmaz ve Çetin, 2007).

Şiddetli bir deprem sonrası barajda ölçülmüş olan periyot değişimi, deprem etkisi sonrası barajın rijitliğinin azalmış olduğunu ya da hasar gördüğünü gösterebilmektedir. Barajda hasar belirtisi görülmeden, ölçülmüş olan periyot artışları barajın taşıma gücündeki bir azalma olarak yorumlanamamakta, ancak barajın rijitliğinde azalma olduğu anlamına gelmektedir. Bu durumda ileriki zamanlarda oluşacak depremler sonucu barajda daha çok ötelenmeler meydana gelecek ve baraj daha büyük genliğe sahip salınımlar yapacaktır (Gürbüz ve ark., 2009).

Dolgu barajların deprem davranışlarının belirlenmesinde karmaşık problemler karşımıza çıkmaktadır. Dolgu barajda kullanılan farklı dolgu malzemelerinin sahip oldukları gerilme-şekil değiştirme davranışlarının farklılık göstermesi, sismik yükler altında barajın linner olmayan davranış göstermesine neden olmaktadır. Dolgu barajın sismik yükler altında liner olmayan davranışının doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için, Eşdeğer Lineer Analiz adı verilen analiz yönteminde kullanılan modelin her bir noktasında oluşacak olan şekil değiştirmelerle uyumlu rijitlik ve sönüm parametrelerinin doğru seçilerek analizlerin yapılması gerekmektedir (Aydın ve Aydın, 2014).

Önyüzü beton kaplı kaya dolgu barajlarda suyun baraj içerisine sızması memba kısmındaki önyüz betonu sayesinde engellenmekte, böylelikle kil çekirdekli kaya dolgu barajlara göre deprem etkisinde daha stabil davranışlar elde edilmektedir.

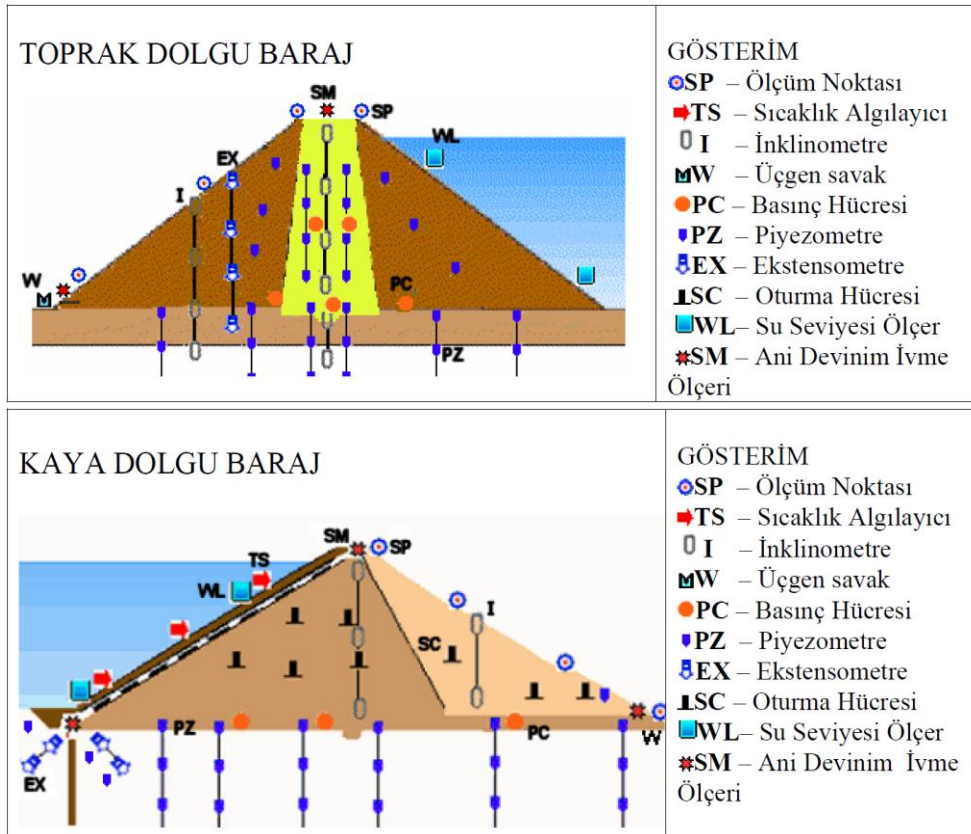
Ancak, şiddetli depremlerin etkisiyle önyüz beton plağında ezilme ve çatlama oluşmasıyla su barajın içerisine sızarak barajın stabilitesini azaltabilmektedir (Bayraktar ve ark., 2007).

Dolgu barajlarda deprem güvenliği açısından yapılacak analizler; boşluk suyu basıncı etkisiyle dolguda ve temel zemininde meydana gelecek olan dayanım kayıplarını veya barajın çökmesi, oturması, çatlama, şev göçmesi gibi deformasyonların oluşumunu içermelidir (Tosun, 2009).

3.2.2. Kil çekirdekli toprak dolgu, homojen toprak dolgu ve kil çekirdekli kaya dolgu baraj tiplerinde kullanılan ölçüm aletleri

Kullanılacak olan ölçüm sistemleri yüksekliği en az 50 m olan barajlar için geçerli olup, 50 m' den daha az yüksekliğe sahip barajlarda kullanılacak olan cihazlara İdare tarafından karar verilmektedir (DSİ, 2014).

Toprak dolgu ve kaya dolgu barajların gözlemlenmesinde temel olarak kullanılan aletler ve bu aletlerin konumları Şekil 3.13' te verilmiştir.



Şekil 3.13. Toprak ve kaya dolgu barajlarda ölçüm aletleri (Baykan ve ark., 2007).

3.2.2.1. Piyezometreler

Piyezometreler baraj gövdesinde ve temelinde oluşan sızıntı ve sıkışma kaynaklı su basıncının gözlemlenmesi, barajın su tutması sırasında drenaj zonlarının verimi ve barajın yapımı sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarının tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Piyezometreler, aşırı boşluk suyu basıncı oluşan ve sızıntı sonucu oluşan basınç modelini oluşturmaya imkân tanıyacak yatay ve düşey doğrultudaki en kritik noktalara yerleştirilmektedir (Yücer, 2012). Temel altına yerleştirilen temel tipi piyezometreler, baraj temelindeki sızmanın, varsa enjeksiyon perdesinin etkinliğinin ve yeraltı su seviyesinin kontrolü amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 3.14'te örnek bir piyezometre verilmiştir.



Şekil 3.14. Piyezometre (Baykan ve ark., 2007).

DSİ tarafından oluşturulmuş olan örnek bir piyezometre okuma formu Şekil 3.15'te verilmiştir.

KESİT NO		Barajın Adı :	Tarih:			
KESİT NO		Rezervuar Su Seviyesi:	Kuyruk Suyu seviyesi:			
KESİT NO		Ölçümü Yapan:	$P=(L^2 \times A)+(L \times B)+C$ (kPa)			
Uç No	Yerleştirilme Kotu	Kalibrasyon Sabiti A-B-C	İlk Okuma (Hz)	Son Okuma (Hz)	Basınç Değeri P (mPa)	m/SS
a	b	c	d	e	f	g = b+f

Şekil 3.15. Piyezometre okuma formu (DSİ, 2014).

3.2.2.2. Toplam basınçölçerler

Toplam basınçölçerler, barajlardaki zemindeki bileşik basınç ve boşluk suyu basınçlarından oluşan toplam basıncı ölçerler. Baraj gövdesi ile temel zemini seviyesindeki yüzeye yerleştirilerek basınç direkt olarak ölçülmektedir. Zemin içerisinde ve özellikle zemin ile beton yapılar arasındaki yüzeyde oluşan gerilmelerin gözlemlenmesinde kullanılırlar. Zemin basınç hücrelerinin, oluşabilecek kemerlenme nedeni ile sahada oluşan gerilmelerin yanlış ölçülmesini önlemek amacıyla toplam basınç hücreleri, çevrelerinde bulunan zeminlerin rijitliğine yakın bir rijitliğe sahip olacak şekilde seçilmelidirler (Yücer, 2012). Şekil 3.16' da örnek bir basınç hücresi verilmiştir.

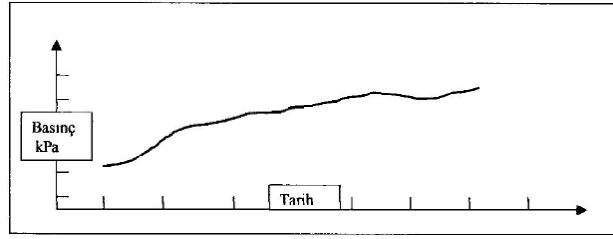


Şekil 3.16. Basınç hücresi (Baykan ve ark., 2007).

Toplam basınçölçerler, piyezometreler ile birlikte kil dolgu zonu içerisine yerleştirilerek, inşa aşamasında dolgu hızını kontrol etmek amacıyla da kullanılmaktadırlar. Buradaki kontrolün amacı, inşa aşamasındaki boşluk su basıncı ile toplam basınç arasındaki oranın 0,60 olmasının sağlanabilmesidir. Kaya dolgu barajlarda toplam basınçölçerler kullanılarak dolgu ağırlığından kaynaklı oluşan basınçlar ve kemerleşmeler tespit edilebilmektedir (Ulusoy, 2015). DSİ tarafından oluşturulmuş olan örnek bir basınçölçer okuma formu ve okuma sonuçlarına ait örnek bir grafik Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de verilmiştir.

Uç No	Yerleştirilme Kotu	İlk Okuma L_0	Son Okuma L_1	Kaibrasyon Değerleri				P kPa
				A	B	C	T^0	

Şekil 3.17. Toplam basınçölçer okuma formu (DSİ, 2014).



Şekil 3.18. Toplam basınçölçer okuma sonuçlarına ait örnek grafik (DSİ, 2014).

3.2.2.3. Ekstensometreler

Ekstensometreler, belirli yüksekliklerdeki zeminlerde oluşan yer değiştirmeleri ölçerler. Baraj gövdesinin tabanında veya temel zemini tabanında oluşan düşey hareketlerin (çökme, kabarma vb.) gözlemlenmesinde kullanılırlar (Kürklü ve Zorluer, 2007). Zeminlerde kaç farklı noktadan ölçüm alınmak isteniyorsa, bu duruma uygun ekstensometre başlığı ve kuyu çapı seçilmelidir. Ekstensometre, projesine uygun şekilde kuyuya yerleştirilir ve ekstensometre ile kuyu cidarı arası enjeksiyon ile doldurulur. Enjeksiyonun prizini almasından sonraki hafta ilk ölçüm (sıfır ölçüm) alınır. İlk ölçümden sonra yapılacak olan tüm ölçümler, sıfır ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak sıfır ölçüm ile arasındaki farklar tespit edilerek değerlendirilir. Örnek bir ekstensometreye ait fotoğraf Şekil 3.19’ da, DSİ tarafından oluşturulmuş olan örnek bir ekstensometre okuma formu Şekil 3.20’ de verilmiştir.



Şekil 3.19. Ekstensometre (Baykan ve ark., 2007).

Barajın Adı		Ölçüm Tarihi / Rez.S.S			
Ölçümü Yapan		Notlar			
Kol No:	İlk Okuma	Kollar arasındaki fark	Son Okuma fark	Kollar arasındaki fark	Düşey Hareket
a	b	c	d	f	g=c-f
Datum					

Şekil 3.20. Ekstensometre okuma formu (DSİ, 2014).

3.2.2.4. Su basıncı ölçerler

Su basıncı ölçerler, barajın mansap tarafındaki filtre zonunun tabanına yerleştirilerek, dolgu barajlardaki rasat kuyularına benzer işlev yürütür. Piyezometreden farklı olarak filtre üniteleri bulunmamaktadır (DSİ, 2014). DSİ tarafından oluşturulmuş olan örnek bir su basınç ölçer okuma formu Şekil 3.21’ de verilmiştir.

Barajın Adı:			Ölçümü Yapan:		
Tarih / Rez.S.S		$P(kPa)=(L \times A)+(L \times B)+C$			
Kesit No	İlk Okuma P ₀	Son Okuma P ₁	Fark	Cih.Yer.Kotu	Kuyu S.S

Şekil 3.21. Su basınçölçer okuma formu (DSİ, 2014).

3.2.2.5. İnklinometreler

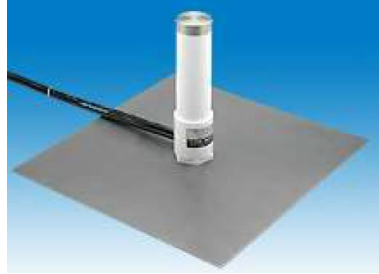
İnklinometreler, barajlardaki ilgili kesit ve derinlikte mm boyutunda oluşacak yatay hareketleri (deplasmanları) ölçmek amacıyla kullanılırlar. İnşaat aşamasında ve genellikle gövdede, temelde ve payandalarda açılan sondaj deliklerine yerleştirilirler. İnklinometreler kullanılarak sondaj deliğindeki eksenin dik yönünde oluşmuş olan hareketlerin izlenerek, hareketin yeri, yönü ve büyüklüğü belirlenebilmektedir. Ayrıca bu ölçüm yöntemiyle, zeminde oluşmuş olan hareketlerin üçüncü boyutları da izlenebilmektedir (Yücer, 2012). Örnek bir inklinometreye ait fotoğraf Şekil 3.22’de verilmiştir.



Şekil 3.22. İnklinometre (Baykan ve ark., 2007).

3.2.2.6. Oturma ölçerler

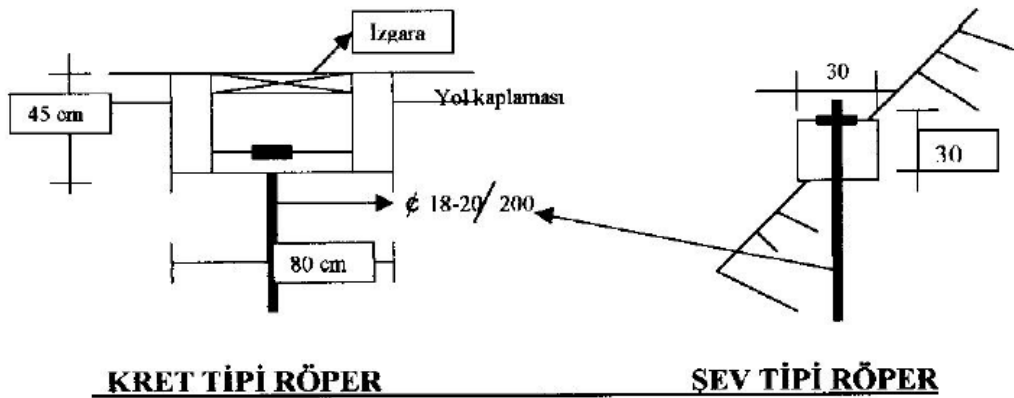
Oturma ölçerler, değişik derinliklerde oluşacak oturmaların miktarı ve hızının belirlenmesinde kullanılmaktadır (Yücer, 2012). Örnek bir oturma hücresine ait fotoğraf Şekil 3.23' te verilmiştir.



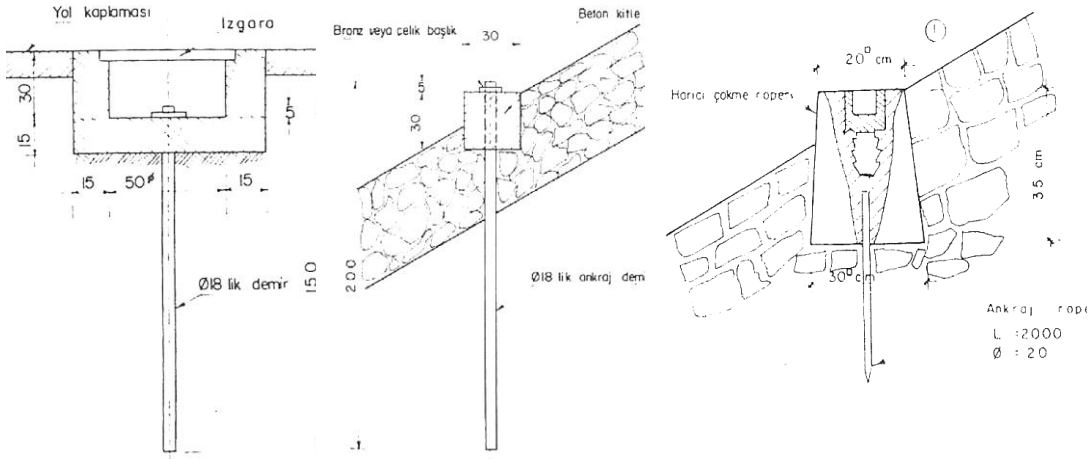
Şekil 3.23. Oturma hücresi (Baykan ve ark., 2007).

3.2.2.7. Harici çökme röperleri

Dolguda oluşacak olan yatay ve düşey yer değiştirmelerin izlenmesi amacıyla barajın kreti ve mansap şevi üzerine yerleştirilen ölçüm sistemleridir. Baraj dolgusu tamamlanır tamamlanmaz röperler projedeki yerlerine yerleştirilmeli ve ilk değerleri tespit edilmelidir. Baraj gövdesi üzerine yerleştirilmiş olan harici çökme röperleri, gövde dışında ve sağlam bir zemine tesis edilmiş olan Sigorta Referans Röperleri (SRR) ve Alet Merkezleme Röperlerine (AMR) bağlanmıştır. Röperler, 20 / 30 / 35 cm boyutlarında 300 doz betondan imal edilmiş koniler içerisine Ø18-20 mm çapında ve en az 2 m boyunda demir çubuklar yerleştirilerek demir çubuklar üzerinde pirinç veya bakırdan 16.5 mm çapında ve 22.5 mm genişliğinde röper noktası bulunacak şekilde imal edilmelidirler (DSİ, 2014). Harici çökme röperlerine ait görseller Şekil 3.24' te, DSİ tarafından kullanılan röperlere ait görseller Şekil 3.25' te verilmiştir.

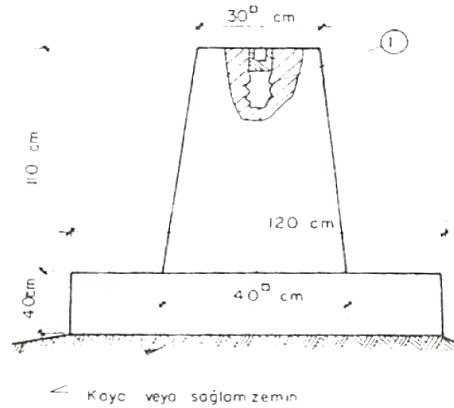


Şekil 3.24. Harici çökme röperi (DSİ, 2014).



Kret Tipi Röper

Şev Tipi Röperler



Referans Röperi

Şekil 3.25. DSİ röper tipleri (DSİ, 2014).

3.2.2.8. İvmeölçerler

Kuvvetli yer hareketi algılayıcılar, şiddetli sismik titreşimleri ve depremin yapıda oluşturduğu zorlamaları izlemek amacıyla kullanılmaktadır (Kürklü ve Zorluer, 2007). Ölçümler sonucu elde edilen veriler kullanılarak baraj gövdesi ve baraj temelinin sismik davranışının belirlenebilmesi amacıyla kullanılan analitik analiz metotları geliştirilebilmektedir. İvme ölçümlerinin en az baraj kretinde, ana kayada ve baraj topuğunda yapılması tavsiye edilmektedir (Yücer, 2012).

3.2.2.9. Sıcaklık ölçerler

Sıcaklık sensörleri izin verilen mesafelerden okumalar alarak veri kaydı yapmaktadırlar. Sıcaklık değişimleri izlenerek, barajlarda oluşabilecek hacim değişimleri ve gerilmelerin ilişkisi belirlenebilmektedir (Kürklü ve Zorluer, 2007).

3.2.2.10. Su seviyesi ölçerler

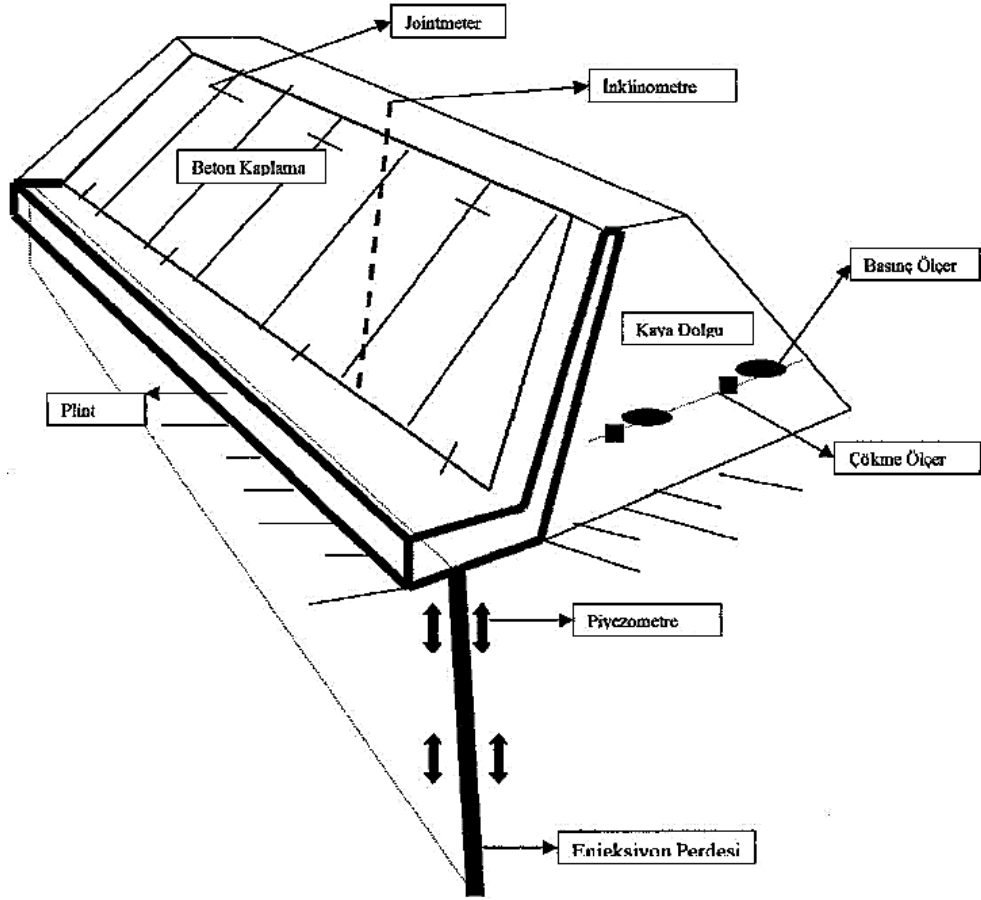
Su seviyesi ölçerler, barajın memba kısmında oluşacak basınç değişimlerini belirlemek için kullanılmaktadırlar (Kürklü ve Zorluer, 2007).

3.2.2.11. Sızıntı debisi ölçerler

Sızıntı debisi ölçerler, meydana gelen su sızıntılarını ölçmek amacıyla kullanılmaktadırlar (Kürklü ve Zorluer, 2007).

3.2.3. Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu baraj tiplerinde kullanılan ölçüm aletleri

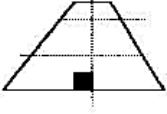
Toprak ve kaya dolgu barajlarda kullanılan ölçüm sistemlerine ilave olarak önyüzü beton kaplı kaya dolgu barajlarda kullanılan ölçüm sistemleri Şekil 3.26' da verilmiştir (DSİ, 2014).



Şekil 3.26. Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu baraj tipinde kullanılan ölçüm aletleri (DSİ, 2014).

3.2.3.1. Hidrolik çökme ölçerler

Hidrolik çökme ölçerler, baraj gövdesinde oluşan çökmeleri izlemeye yarayan cihazlardır. Cihaz okumaları, aletin yerleştirilme kotunun 5-15 m. yukarısındaki referans hücreğine göre yapılmaktadır (Ulusoy, 2015). DSİ tarafından oluşturulmuş olan örnek bir hidrolik çökme ölçer okuma formu Şekil 3.27' de verilmiştir.

		Barajın Adı:			Tarih:			
		Ölçümü Yapan:			Sıcaklık:		Basınç:	
Uç No	Okuma	A	B	C	T°	Yerleştirme Kotu	Şandiki Kot	Çökme (mm)

Şekil 3.27. Hidrolik çökme ölçer okuma formu (DSİ, 2014).

3.2.3.2. Derz ölçerler (Joint meter)

Derz ölçerler, yatayda oluşan 25 mm açılma ve 5 mm kapanmaları %0,5 hassasiyet ile izlemeye yarayan cihazlardır.

3.2.4. Ölçüm aletlerinin yerleştirilme yerleri

Dolgu barajlarda kullanılan ölçüm aletlerinin yerleştirilme yerleri Tablo 3.7' de verilmiştir.

Tablo 3.7. Ölçüm aletlerinin yerleştirilme yerleri (Baykan ve ark., 2007).

İstenen Ölçüm	Ölçüm Bölgesi	Ölçüm Cihazı
Yüzeysel Şekil Değişirme	Baraj Tepesi ve Mansap Şevi	Dış Çökme Röperi
İçsel Devinim	Kil Çekirdek İçi	Çapraz Kollu, Ekstensometre, İnklinometre
Su Basıncı	Gövde İçi	Piyezometre, Gözlem Kuyusu
Gerilme	Temel	Piyezometre, Gözlem Kuyusu
Sızma Niceliği	Dolgu ya da Temel	Toplam Basınç Ölçer
Sızma Niteliği	Gerekli Yerlerde	Savaklar, Su Basıncı Ölçerler
Depresiyon	Gerekli Yerlerde	Bulanıklık Ölçerler
Devinimler	Baraj Tepesinde ve Gerekli Yerlerde	İvme Ölçerler

3.2.5. Barajlarda denetim ve ölçüm periyodu

Barajlardaki denetim ve gözlemler bir takım faktörler dikkate alınarak düzenli aralıklarla yapılmaktadır. Yapılacak olan denetim ve gözlemlerin aralıkları ve sıklıkları aşağıdaki faktörlere göre belirlenir (Aşık, 2016).

- Barajın özellikleri (tipi, yüksekliği, boyutları)
- Farklı risk ortamlarında barajın sergilediği performans
- Rezervuarın kapasitesi ve rezervuardaki suyun miktarı
- Rezervuardaki su seviyesinin değişimi ve değişimin frekansı
- Barajın yaşı

Bu faktörlerden her biri yapılacak olan denetim ve gözlemlerin aralıkları ve sıklıklarına etki etmektedir. Baraj su tutmaya başladığında, ölçümler sık aralıklarla (hatta günlük) yapılmaktadır. Barajdaki su seviyesinin maksimum seviyede olduğu durumda, çok şiddetli yağışların olduğu havalarda ve deprem sonrasında ölçmeler sık aralıklarla yapılmaktadır (Aşık, 2016).

Genel kural olarak; görsel gözlemler barajın her ziyaret edilmesinde, günlük ve haftalık okumalar barajın ilk dolun aşamasında, olağanüstü (acil) okumalar şiddetli fırtınalı hava, deprem vb. durumlarda ve diğer okumalar en az 1 aylık periyotlarla yapılmaktadır (Aşık, 2016).

Barajdaki ekipmanların bakım, onarım ve revizyon ihtiyaçları, günlük, haftalık, aylık, 3 aylık, 6 aylık ve yıllık periyotlarla yapılan muayene ve kontrollerde tespit edilmektedir. Muayene periyotları ve muayene ile görevli kişiler Tablo 3.8' de verilmiştir.

Tablo 3.8. Muayene ve kontrol periyotları ve görevli kişiler.

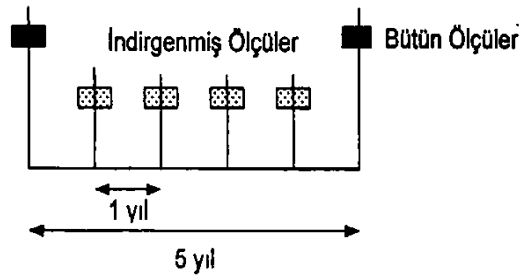
Muayene ve Kontrol Periyodu	Görevli Kişi
Günlük ve Haftalık Muayene	Sorumlu Kontrol Personeli
Aylık Muayene	İşletme Teknisyeni
3 Aylık Muayene	İşletme ve Bakım / Makine İkmal Görevlileri
6 Aylık Muayene	İşletme ve Bakım / Makine İkmal Görevlileri
Yıllık Muayene	Bölge Müdürünün Onayladığı Muayene Heyeti

Teknik elemanlardan oluşan muayene heyetince yapılan yıllık muayenelerde, periyodik muayeneler sonrası tespit edilen bakım, onarım ve revizyon ihtiyaçlarının ne ölçüde karşılandığı, tespit edilen bakım, onarım ve revizyon ihtiyaçlarının tekrar edip etmediği, tekrar ediyorsa nedenleri, tesisin görevini tam ve kusursuz bir şekilde

yapmasına engel olan eksik ve yetersizlikler, işletme sırasında oluşan hasarlar, can ve mal güvenliği amacıyla gerekli emniyet önlemlerinin olup olmadığı, uyarı, ihbar ve tanıtım levhalarının durumları vb. incelenmeli ve tespitler rapor altına alınmalıdır.

Ölçüm periyodunun belirlenmesinde barajda oluşan deformasyon ve deplasmanların zamanla değişimi önemli bir husustur. Oluşan deformasyonlar ile zaman arasındaki ilişki kısa ve uzun vadeli periyotlarda ortaya çıkmaktadır. Barajda bir gün içerisindeki sıcaklık değişimi nedeniyle ortaya çıkan yapısal hareketler kısa periyotlu değişim iken yıllık su seviyesindeki ve sıcaklık değerlerindeki değişimler nedeniyle ortaya çıkan yapısal hareketler uzun periyotlu değişimlerdir (Gülal ve Hoşbaş, 2000).

Barajın ilk dolun aşamasındaki şekil değişiklikleri hızlı şekilde meydana gelmektedir. Bundan dolayı, ilk dolun aşamasında yapılacak olan bağıl ölçümler belirli su seviyelerinde (baraj boşken, %25, %50, %75 ve %100 doluluk seviyelerinde) ve mutlak ölçümler günlük olarak yapılmalıdır. Baraj işletmeye alındıktan sonraki 2-3 yıllık ilk evresinde yapılacak olan bağıl ölçümler ilkbaharda yüksek su seviyesinde ve sonbaharda düşük su seviyesinde olmak üzere iki kez, mutlak ölçümler haftalık olarak yapılmalıdır. Barajın normal işletme zamanında ise bağıl ölçümler için aşağıda verilmiş olan zaman aralıkları tavsiye edilmektedir (Gülal ve Hoşbaş, 2000). İşletme evresinde bağıl ölçüler için ölçü programı Şekil 3.28’ de verilmiştir.



Şekil 3.28. İşletme evresinde bağıl ölçüler için ölçü programı (Gülal ve Hoşbaş, 2000).

Şekil 3.28’ de belirtilmiş olan bütün ölçüler ifadesi, nirengi ve nivelman ağında, gövde içinde ve gövde üzerinde mutlak ölçü yöntemleri kullanılarak alınan ölçümleri ifade etmekte iken, indirgenmiş ölçüler ifadesi, ölçüm programı kapsamında gerçekleştirilen veya barajın olağan dışı bir davranış göstermesi sonucu bu davranışın sebebinin tespiti için yapılan ölçümleri ifade etmektedir. İndirgenmiş ölçümler, barajın yatay ve düşey doğrultusunda meydana gelen değişimlerin tespiti için indirgenmiş nirengi ve nivelman ağından alınan ölçümlerden oluşmaktadır. Barajın normal işletme evresindeki mutlak ölçümlerin aylık alınması tavsiye edilmektedir (Gülal ve Hoşbaş,

2000). Barajlarda tavsiye edilen bağıl ve mutlak ölçü periyotları Tablo 3.9’ da verilmiştir.

Tablo 3.9. Barajlarda ölçü periyotları (Gülal ve Hoşbaş, 2000).

Ölçüm Yöntemi	İlk Dolum Süreci	İşletme Sürecinin İlk Evresi (İlk 2-3 yıl)	Normal İşletme Süreci
Bağıl Ölçü Yöntemi	Belirli Su Seviyelerinde	Yılda İki Kez	<ul style="list-style-type: none"> • 5 Yılda Bir • Her Yıl
Mutlak Ölçü Yöntemi	Günlük	Haftalık	Aylık

Barajlar için önerilen minimum denetim aralıkları ve baraj güvenliğinin izlenmesine yönelik gereksinimler Tablo 3.10’ da verilmektedir.

Tablo 3.10. Minimum denetim aralıkları ve baraj güvenliğinin izlenmesine yönelik gereksinimler (Baykan ve ark., 2007).

İşlem	Baraj Risk Sınıfı			
	Çok Önemli	Önemli	Az Önemli	Çok Az Önemli
Arazi Gözlemi	Haftalık	Haftalık	Aylık	Dört ayda bir
Resmi Denetleme	Yılda iki kez	Yılda iki ya da bir kez	Yılda bir kez	Yılda bir kez
Aygıt Yerleştirme	Şartnameye göre	Şartnameye göre	Şartnameye göre	Gerekli değil
Çıkış Yapıları, Dolusavak Kapakları ve Diğer Mekanik Öğelerin Test İşlemleri	Yılda bir kez	Yılda bir kez	Yılda bir kez	Yılda bir kez
Acil Hazırlık Planı	İletişim yönergelerinin altı ayda bir güncellenmesi	İletişim yönergelerinin altı ayda bir güncellenmesi	İletişim yönergelerinin yılda bir güncellenmesi	Gerekli değil
Operasyon, Bakım ve Gözlem Planı	Her 7 – 10 yılda bir gözden geçirilmesi	Her 10 yılda bir gözden geçirilmesi	Her 10 yılda bir gözden geçirilmesi	Her 10 yılda bir gözden geçirilmesi
Baraj Güvenliğinin Gözden Geçirilmesi	Her 7 – 10 yılda bir gözden geçirilmesi	Her 10 yılda bir gözden geçirilmesi	Gerekli değil	Gerekli değil

Dolgu barajlardaki ölçüm cihazlarının izlenme periyotları Tablo 3.11’de verilmiştir.

Tablo 3.11. Dolgu barajlarda kullanılan ölçüm cihazlarının izlenme periyotları (Ağralıoğlu, 2011).

Ölçüm	İnşaat Sırasında		İlk Doldurma Sırasında		İşletme Sırasında	
	En Çok	En Az	En Çok	En Az	En Çok	En Az
Piyezometreler	1 hafta	1 ay	1 gün	1 hafta	1 hafta	2 yıl
Boşluk Basınç Hücreleri	2 ay		1 gün	1 hafta	5 ay	1 yıl
Toplam Basınç Hücreleri	1 hafta	1 ay	1 hafta	2 ay	3 ay	1 yıl
Sızma Ölçümleri	1 gün	1 ay	1 gün	1 hafta	1 gün	1 ay
Gözlem Kuyuları	1-2 hafta	2 ay	2 hafta		1 hafta	1 ay
İç Düşey Hareketler	Sıkça		1 hafta	1 ay	3 ay	1-6 yıl
Temel Oturması	1 hafta		1 gün	1 ay	2 ay	1 yıl
İç Oturma Sensörü	1-2 hafta	1 ay	1 hafta	1 ay	2 ay	1 yıl
Eğimölçer	1-2 hafta	1 ay	1 hafta	1 ay	6 ay	1 yıl
Uzamaölçer	2 hafta	1 ay	2 hafta	1 ay	3 ay	1-2 ay
Düşey Eğimölçer	1-2 hafta	1 ay	1 hafta	1 ay	6 ay	4 yıl
Ölçme Noktaları	1-2 hafta	1 ay	2 hafta	1 ay	3 ay	1-3 yıl
Su Kalitesi	1-2 hafta	1 ay	1 gün	1 ay	6 ay	2 yıl
Deprem Hareketi	Sürekli		Sürekli		Sürekli	
Jeodezik Ölçmeler	1 ay		1 hafta	1 ay	4 ay	1 yıl
Gözle Muayene	1 ay		1 gün		1 gün	1 ay

3.2.6. Barajlara ait işletme ve bakım talimatlarının hazırlanması

Barajların en uygun işletme düzeyinde olabilmesi için yapılması gereken bakım, onarım ve revizyon çalışmaları üç aşamada gerçekleştirilmektedir (Aksu ve Ağca, 2007).

Bakım ve onarım çalışmalarının aşamaları Şekil 3.29'da verilmiştir.



Şekil 3.29. Bakım ve onarım çalışmalarının aşamaları.

Ayrıca en uygun işletme düzeyindeki sürekliliğin sağlanabilmesi amacıyla yapılması gereken faaliyetler üç aşamada yürütülmektedir (Aksu ve Ağca, 2007).

- 1) İşletme ve bakım talimatlarının hazırlanması ve uygulanması,

- 2) Muayene sonrası ve bakım-onarım ihtiyacı olan tesis ve ekipmanlar için muayene raporlarının hazırlanması,
- 3) Yıllık programda bulunan bakım ve onarım çalışmalarının gerçekleştirilmesi.

Barajın belirli kurallar çerçevesinde işletilmesi, statik davranışının izlenmesi ve bakım-onarım hizmetlerinin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için işletme ve bakım talimatı hazırlanmaktadır. Bu talimatın titizlikle uygulandığının takip edilmesi de önemli bir husustur. Söz konusu talimat; baraj tesis ve ünitelerine (baraj gölü, dolu savak, su alma ağızı, cebri boru, tehlike vanası, sulama ve dip savak vanaları, elektromekanik teçhizat vb.) ait karakteristikleri, ünitelerin işletme, bakım-onarım prosedürleri, ölçüm tesisleri gibi bir çok önemli bilgiyi içermektedir (Kasalak ve ark., 2012).

Dünyadaki su miktarı sabit olmasına rağmen, artan su ihtiyacını karşılamak amacıyla farklı depolama tesislerinin inşa edilerek işletmeye alınması, hidrolojik işletme çalışmalarının öneminin her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı, verilerin toplanması, değerlendirilmesi, karar verme ve simülasyon gibi konularda, uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) gibi yeni teknolojik yöntemler kullanılarak, oluşması muhtemel taşkın debilerinin, oluşum zamanlarının ve büyüklüklerinin havzaya ve rezervuara olan etkilerinin kısa sürede belirlenmesi suretiyle merkez ve taşra birimlerinin işbirliği ile baraj işletme programları hazırlanmakta ve yürütülmektedir. Ayrıca belirli periyotlarla yapılan hidrografik etütler sonucu sedimantasyondan kaynaklı rezervuarda oluşan yeni topografik durumun değerlendirilmesi ile rezervuardaki hacim-satış değerlerindeki değişikliklerin göz önüne alındığı yeni baraj işletme programları hazırlanmaktadır (Kasalak ve ark., 2012).

3.2.7. Acil durum hazırlık ve eylem planlaması

Acil durum eylem planı (AEP), barajın güvenliğini etkileyen acil veya beklenmedik durum ortaya çıktığında kimin, ne zaman, nerede ne yapacağını ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Baraj için veya barajdan kaynaklı acil bir durum ortaya çıktığında, önceden hazırlanmış olan acil durum eylem planı derhal devreye sokulmalıdır. Acil durum eylem planında, alınması gereken önlemlerin önceden belirlenmesi, gerekli hazırlıkların yapılması ve gerekli denemelerin yapılması çok önemlidir. Ayrıca acil durum eylem planlarının etkili olabilmesi için etkilenecek olan vatandaşlar da planlamaya dahil edilmeli ve acil durum esnasında nasıl davranacağı konusunda

bilgilendirilmelidir. Acil durum eylem planları, barajın güvenliğini etkileyen acil ve beklenmedik durumların ardından ve düzenli olarak güncellenmelidirler (Caner, 2021). Acil durumda haberleşme çok önemli bir konudur.

Acil durum eylem planının 6 temel unsuru bulunmaktadır (Ağırlioğlu, 2011):

- (1) Bilgilendirme akış şeması
- (2) Acil durumu belirleme, değerlendirme ve sınıflama
- (3) Sorumlular
- (4) Acil duruma hazırlık
- (5) Taşkın haritaları
- (6) Acil durum eylem planı ekleri

3.2.7.1. Bilgilendirme akış şeması

Acil eylemlerde sorumlu kişilere zamanında bilgi verebilmek amacıyla bilgilendirme akış şeması hazırlanmaktadır. Bilgilendirme akış şemasında kimin bilgi vereceği, kime bilgi verileceği ve hangi öncelikle insanlara bilgi verileceği gibi bilgiler yer almaktadır (Ağırlioğlu, 2011).

3.2.7.2. Acil durumu belirleme, değerlendirme ve sınıflama

Acil duruma neden olan olaylar belirlenerek, en uygun eyleme geçebilmek için güvenilir ve zamanlamaya uygun bir eylem planı durumu kurulmaktadır (Ağırlioğlu, 2011).

3.2.7.3. Sorumlular

Baraj sorumluları, ortaya çıkacak problemlerden, yapıların bakımından ve acil durum eylem planının yürütülmesinden, merkezi ve mahalli idarelerin acil durum eylem yöneticileri etkilenecek alanların uyarılmasından ve boşaltılmasından sorumludurlar. Acil durum eylem planı, etkili ve zamanında müdahale edebilecek şekilde baraj sorumlularını yönlendirmelidir (Ağırlioğlu, 2011).

3.2.7.4. Acil duruma hazırlık

Acil durumda etkili bir çözüm üretmek için acil durum eylem planında belirtilmiş olan yapılacak işlemlerin çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle, acil bir durum ortaya çıkmadan önce acil durum eylem planlarının bu kısmında acil eylemler belirlenmiş olmalıdır (Ağırlioğlu, 2011).

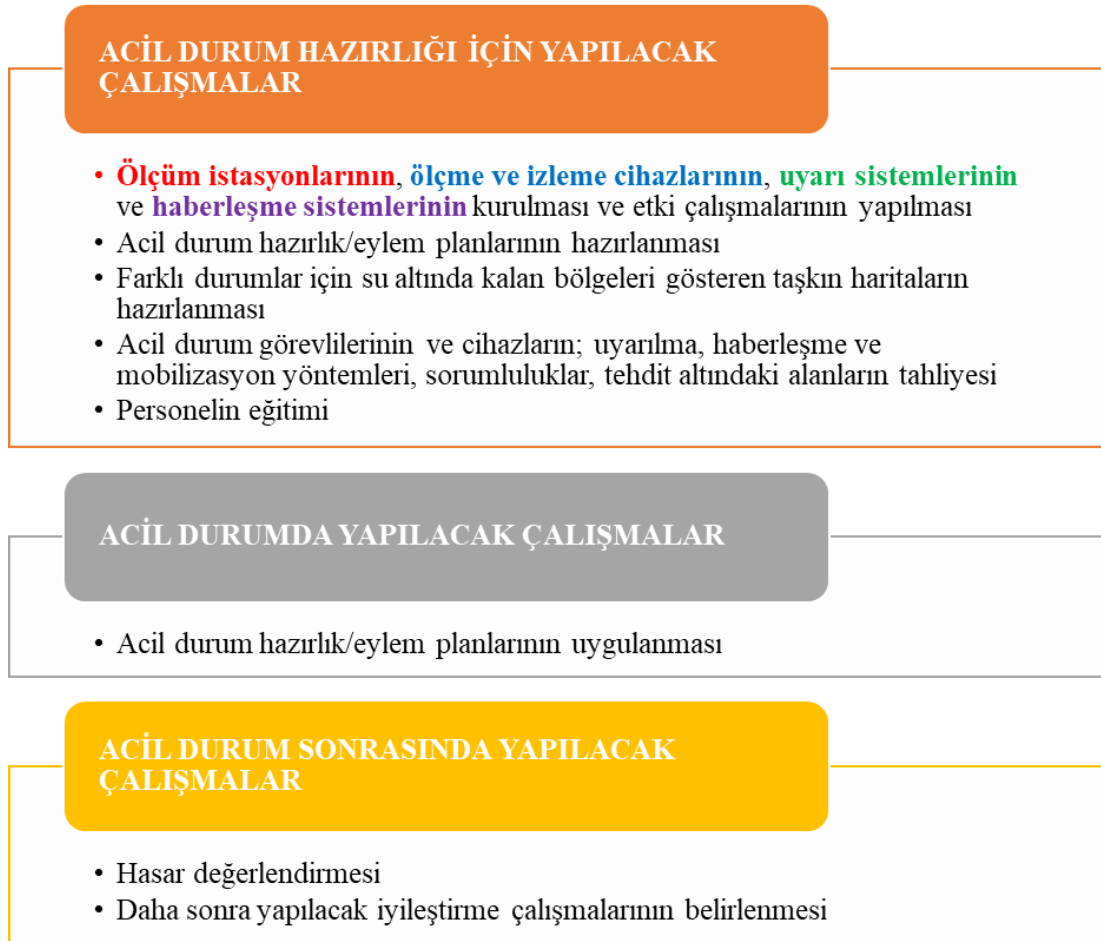
3.2.7.5. Taşkın haritaları

Bir barajın yıkılması sonucu su altında kalacak alanları tespit etmek taşkın haritaları hazırlanmaktadır. Hazırlanan bu haritalar, vatandaşın zamanında bilgilendirilmesi ve selden etkilenecek alanların boşaltılması amacıyla kullanılmaktadır (Ağırlioğlu, 2011).

3.2.7.6. Acil durum eylem planı ekleri

Acil durum eylem planı, bu planın bakımı ve uygulanması ile ilgili bütün belge, bilgi ve şekilleri ek halinde içermelidir (Ağırlioğlu, 2011).

Acil durum hazırlığı aşaması 3 adımdan oluşur. Acil durum hazırlık aşamaları Şekil 3.30' da verilmiştir.



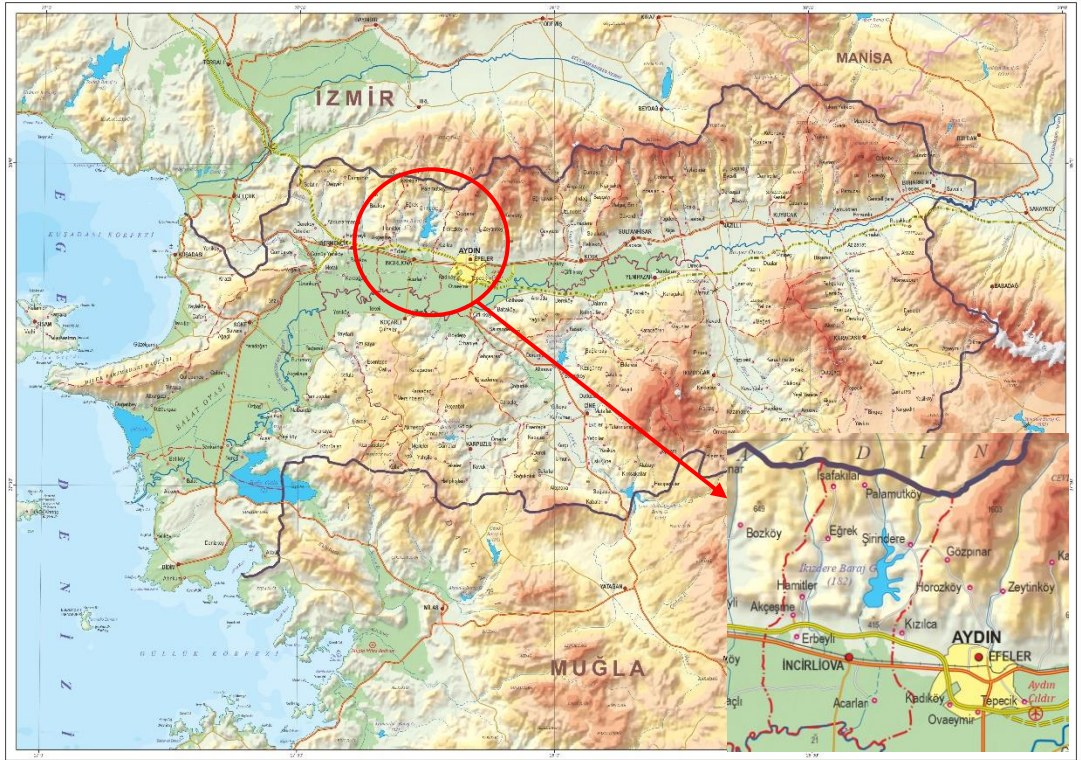
Şekil 3.30. Acil durum hazırlığı (ENCON, 2006).

4. KULLANILAN YÖNTEM VE UYGULAMA

4.1. İkizdere Barajının Özellikleri

Aydın ilinin, İncirliova ilçesinin 4,6 km kadar kuzeyinde, Büyük Menderes Nehrinin bir kolu olan İkizdere Çayının üzerinde, içme ve sulama suyu elde edebilmek amacıyla planlanmış olan İkizdere Barajının inşaatına 1999 yılında başlanılmış ve baraj 2010 yılında tamamlanarak işletmeye alınmıştır. Baraj her ne kadar içme ve sulama suyu elde edebilmek amacıyla yapılsa da işletmeye alındığı ilk günden itibaren sadece içmesuyu temini için kullanılmaktadır.

İkizdere Barajının harita üzerindeki yeri Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. İkizdere Barajının yeri (Harita, Harita Genel Müdürlüğünün sayfasından alınmıştır. <https://www.harita.gov.tr/urunler/indirilebilir-il-haritalari/18#>).

DSİ Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Dairesi Başkanlığı tarafından hazırlanmış olan U-2 nolu Baraj Yerinin Türkiye Deprem Bölgeleri ve Sismik Zon Haritasındaki Yeri ve Rezervuar Sahası Haritası paftasında verilmiş bazı teknik veriler aşağıda sunulmuştur.

4.1.1. Genel bilgiler

Akarsuyun Adı : İkizdere Çayı

Amacı : İçmesuyu ve Sulama

4.1.2. Baraj gövdesine ait bilgiler

Gövde Tipi : Merkezi Kil Çekirdek, Memba Yüzü Kum-Çakıl,
Mansap Yüzü Kaya Dolgu

Kret Kotu : 182,00 m

Kret Uzunluğu : 399,275 m

Kret Genişliği : 10,00 m

Talvegden Yüksekliği : 101,00 m

Temelden Yüksekliği : 108,00 m

Memba Şevi : 1 / 3,25

Mansap Şevi : 1 / 2

Mansap Batardosu Kret Kotu: 105,00 m

İkizdere Barajına ait gövde fotoğrafı Şekil 4.2' de verilmiştir.



Şekil 4.2. İkizdere Barajına ait fotoğraf.

4.1.3. Baraj rezervuarına ait bilgiler

Maksimum Su Seviyesi : 180,14 m

Normal Su Seviyesi : 176,80 m

Minimum Su Seviyesi : 100,00 m

Maksimum Su Kotunda Göl Hacmi	: 213,22 hm ³
Maksimum Su Kotunda Göl Alanı	: 6,0753 km ²
Normal Su Kotunda Göl Hacmi	: 194,958 hm ³
Normal Su Kotunda Göl Alanı	: 5,645 km ²
Minimum Su Kotunda Göl Hacmi	: 2,417 hm ³
Minimum Su Kotunda Göl Alanı	: 0,408 km ²

İkizdere Barajına ait rezervuarın 30.01.2023 tarihli fotoğrafı Şekil 4.3' de verilmiştir.



Şekil 4.3. Rezervuar alanına ait 30.01.2023 tarihli fotoğraf.

4.1.4. Baraj dolusavağına ait bilgiler

Yeri	: Sağ Sahil
Tipi	: Karşıdan Alışlı, Serbest Akışlı (Kapaksız)
Deşarj Kapasitesi	: 619,60 m ³ /s
Hesap Yüğü	: 3,34 m
Yaklaşım Kanalı Kotu	: 175,80 m
Eşik Kret Kotu	: 176,80 m
Boşaltım Kanalı Tipi	: Dikdörtgen Kesitli
Boşaltım Kanalı Uzunluğu	: 255,86 m
Boşaltım Kanalı Genişliği	: 50 - 30 m
Boşaltım Kanalı Eğimi	: %47 - %20

Enerji Kırıcı Tesis Tipi : Tip III

Enerji Kırıcı Tesis Genişliği : 30 m

Enerji Kırıcı Tesis Uzunluğu : 30 m

İkizdere Barajının dolusavağına ait fotoğraf Şekil 4.4' de verilmiştir.



Şekil 4.4. İkizdere Barajının dolusavağı.

4.1.5. Baraj derivasyon tüneline ait bilgiler

Yeri : Sol Sahil

Tipi : Dairesel Kesitli

Deşarj Kapasitesi : 103,01 m³/s

Tünel İç Çapı : 4,50 m

Giriş Taban Kotu : 89,50 m

ıkış Taban Kotu : 78,93 m

Uzunluğu : 621,971 m

Eğimi : 0,017

4.1.6. Baraj dipsavak tüneline ait bilgiler

Yeri : Sol Sahil (Derivasyon Tüneli İçi)

Tipi : Dairesel Kesitli

İç Çapı : 4,50 m

Su Alma Ağzı Giriş Kotu : 96,25 m

Dereye Deşarj

Tünel Uzunluğu : 621,971 m

Tünel İç Çapı : 4,50 m

Eğimi : 0,017

Normal Su Seviyesinde Deşarj : 35,04 m³/s

Minimum Su Seviyesinde Deşarj : 15,47 m³/s

Sulamaya Deşarj

Tünel Uzunluğu : 36,88 m

Tünel İç Çapı : 4,50 m

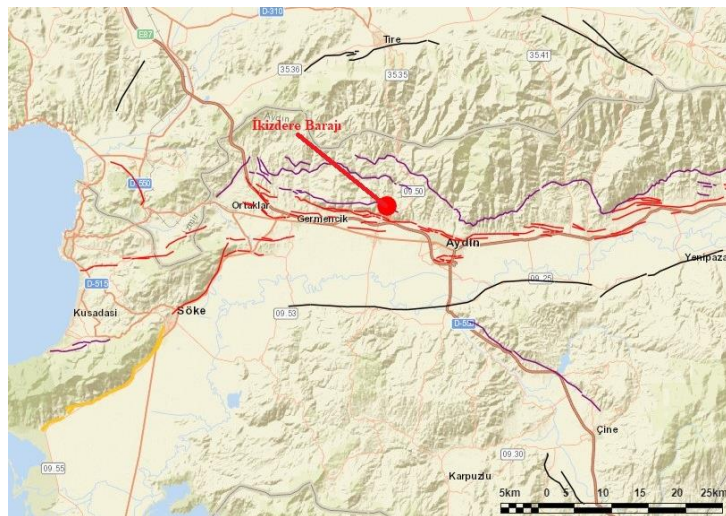
Tünel Eğimi : 0,15

Normal Su Seviyesinde Deşarj : 26,53 m³/s

Minimum Su Seviyesinde Deşarj : 4,43 m³/s

4.2. İkizdere Barajının Sismik Tehlike Analizi

Aydın ilinde, aletsel dönemde meydana gelmiş ve kent merkezinde yüzey faylanmasına neden olan bir deprem gözlenmemesine rağmen, il merkezi ve çevresinde bulunan fayların büyük depremler üretme kapasitelerinin olduğu bilinmektedir (JMO, 2023). İkizdere Barajının çevresinde bulunan faylar Şekil 4.5' te görülmektedir.



Şekil 4.5. İkizdere Barajı ve çevresindeki faylar (23.06.2023 tarihinde <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> adresinden alınmıştır).

İkizdere Barajı, Batı Anadolu'nun en önemli jeolojik yapılarından biri olan Büyük Menderes Grabeni içerisinde yer almaktadır. Büyük Menderes Grabeninde tarihsel dönemde çok sayıda yıkıcı büyüklükte deprem meydana gelmiştir. Aydın ili, aletsel dönem öncesi (1900 yılı öncesi) meydana gelmiş olan çok sayıda depremden etkilenmiştir. MÖ 31, 27, 26, MS 17, 1645, 1653, 1702, 1847, 1848, 1851, 1859, 1861, 1896, 1896 ve 1899 yıllarında meydana gelmiş olan depremler bu depremlerin en önemlileri arasında yer almaktadır. Ancak bölgede çok sayıda diri fayın olması ve bu fayların sık sık deprem üretmiş olması sebebiyle Aydın ilinde bulunan fayların hangi tarihlerde ve hangi büyüklüklerde deprem ürettiği çok net bilinmemektedir. Aletsel dönem içerisinde (1900 yılı sonrası) Aydın ili ve çevresinde çok sayıda irili ve ufaklı depremler meydana gelmiştir. Bu depremler arasında 1908 yılında meydana gelen 5.0 büyüklüğündeki, 1966 yılında meydana gelen 5.0 büyüklüğündeki ve 1955 yılında meydana gelen 6.8 büyüklüğündeki depremler sayılabilir (JMO, 2023).

İkizdere Barajı için yapılan sismik tehlike analizi çalışmaları kapsamında Microsoft Office Excel, Google Earth Map ve Yeni Nesil Azalım İlişkilerinin hesabı için Excel tabanlı NGAW2_GMPE_Spreadsheets programları kullanılmıştır. Analizlerde, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Sorgulama Sisteminden alınan, baraj sahasını merkez alan 150 km yarıçapında bölgede 1900 yılından 24.07.2023 yılına kadar meydana gelmiş 4 ve üzeri büyüklükteki deprem verileri kullanılmıştır. Çalışmada The 2020 European Seismic Hazard Model (ESHM20) çalışması kapsamında oluşturulan ve baraj sahasını merkez alan 150 km yarıçapında bölge içerisine giren alan kaynaklar kullanılmıştır.

Baraj sahasında önceden jeofizik çalışmalar yapılmadığında, spektral ivme değerleri ve çalışma kapsamında yapılan ivme hesaplamaları, baraj yerindeki birimlerin V_{s30} değerinin belli olmaması sebebiyle, NEHRP, 2003 kriterlerine ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 kriterlerine göre kayma dalgası hızı $V_s=760$ m/s olan, C (NEHRP, 2003) ve ZC (TBDY, 2018) sınıfı zemin sınıfı için hazırlanmıştır. Şekil 4.6' da NEHRP (2003) kriterlerine göre, Şekil 4.7'de ise TBDY 2018 kriterlerine göre zemin sınıflandırma tablosu verilmiştir.

NEHRP - Uniform Building Code (UBC)		
Zemin Sınıfı	Tanım	Özellikler
A	Sert Kaya	$V_{s1} > 1500$
B	Kaya	$760 < V_{s1} \leq 1500$
C	Çok Sıkı/Sert Zemin ya da Yumuşak Kaya	$360 < V_{s1} \leq 760$
D	Sert/Sıkı Zemin	$180 < V_{s1} \leq 360$
E	Zayıf Zemin	$V_{s1} < 180$

Şekil 4.6. NEHRP (2003) kriterlerine göre $(V_s)_{30}$ kayma dalgası hızına bağlı olarak zeminlerin sınıflandırılması.

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ [m/s]	$(N_{60})_{30}$ [darbe /30 cm]	$(c_u)_{30}$ [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500	–	–
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 – 1500	–	–
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 – 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 – 360	15 – 50	70 – 250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer.			

Şekil 4.7. TBDY 2018 kriterlerine göre $(V_s)_{30}$ kayma dalgası hızına bağlı olarak zeminlerin sınıflandırılması.

4.2.1. Azalım ilişkileri

Yerli ve yabancı araştırmacılar tarafından geliştirilen çok sayıda azalım bağıntıları bulunmaktadır. İkizdere Barajının bulunduğu noktada meydana gelmesi beklenen en büyük yer ivmelerinin (PGA) hesaplanmasında benzeri çalışmalarda yaygın olarak dikkate alınan Yeni Nesil Azalım İlişkileri (NGA) arasından kaya ortamlar için hazırlanan ilişkiler içerisinde seçilen beş ayrı azalım bağıntısı kullanılmıştır.

- (1) Abrahamson-Silva-Kamai NGA (2014)
- (2) Boore-Stewart-Seyhan-Atikson NGA (2014)
- (3) Campbell-Bozorgnia NGA (2014)
- (4) Chiou-Youngs NGA (2014)
- (5) Idriss NGA (2014)

Yukarıda belirtilmiş olan beş adet azalım ilişkisinin hesaplanmasında kullanılan Excel tabanlı programdaki parametre sınırları Tablo 4.2' de verilmiştir. Analizlerde bu parametre sınırları göz önünde bulundurularak uygun olan bağıntılar kullanılmıştır.

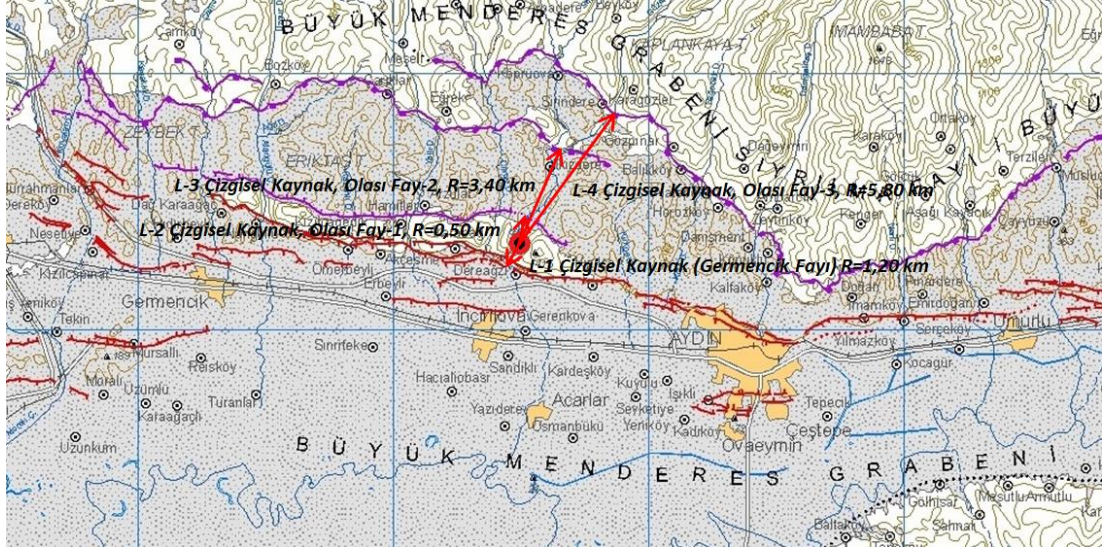
Tablo 4.1. Azalım ilişkilerine ait parametre sınırları.

Azalım İlişkisi	Parametre	Sınırlar
Abrahamson-Silva-Kamai (2014)	M_w (All FM)	$3.0 \leq M_w \leq 8.5$
	R	$0 \leq R \leq 300$
	V_{S30}	$180 \leq V_{S30} \leq 1000$
Boore-Stewart-Seyhan- Atikson (2014)	M_w (SS)	$3.0 \leq M_w \leq 8.5$
	M_w (RS)	$3.0 \leq M_w \leq 8.5$
	M_w (NM)	$3.0 \leq M_w \leq 7.0$
	R_{jb}	$0 \leq R \leq 400$
	V_{S30}	$150 \leq V_{S30} \leq 1500$
	$Z_{1.0}$	$0 \leq Z_{1.0} \leq 3$
	M_w (SS)	$3.3 \leq M_w \leq 8.5$
	M_w (RS)	$3.3 \leq M_w \leq 8.0$
Campbell-Bozorgnia (2014)	M_w (NM)	$3.3 \leq M_w \leq 7.5$
	R_{rup}	$0 \leq R_{rup} \leq 300$
	V_{S30}	$150 \leq V_{S30} \leq 1500$
	$Z_{2.5}$	$0 \leq Z_{2.5} \leq 10$
	Z_{hyp}	$0 \leq Z_{hyp} \leq 20$
	Z_{tor}	$0 \leq Z_{tor} \leq 20$
	Dip	$15 \leq Dip \leq 90$
	M_w (SS)	$3.5 \leq M_w \leq 8.5$
	M_w (RS)	$3.5 \leq M_w \leq 8.0$
	M_w (NM)	$3.5 \leq M_w \leq 8.0$
Chiou-Youngs (2014)	R_{rup}	$0 \leq R_{rup} \leq 300$
	V_{S30}	$180 \leq V_{S30} \leq 1500$
	$Z_{1.0}$	$0 \leq Z_{1.0} \leq 20$
	Z_{tor}	$0 \leq Z_{tor} \leq 10$
	M_w (All FM)	$5.0 \leq M_w$
Idriss (2014)	R	$150 \leq R$
	V_{S30}	$450 \leq V_{S30}$

4.2.2. Deterministik yöntem

Proje yerinin sismik riski deterministik yöntem ile belirlenirken hesaplarda aşağıdaki yeni nesil azalım ilişkileri kullanılmıştır. Fayların üretebilecekleri maksimum deprem magnitüdüleri fayın uzunluğuna ve fay türüne bağlı olarak Wells ve Coppersmith tarafından 1994 yılında yayınlanmış olan denklemlerden MTA tarafından belirtilmiş olan fay türüne uygun denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

Barajı etkileyebilecek büyüklükte deprem üretme kapasitesine sahip olduğu düşünülen dört adet fayın özellikleri ve deterministik hesap sonuçları aşağıda verilmiştir. Şekil 4.8' de İkizdere Barajının faylara olan mesafeleri verilmiştir.



Şekil 4.8. Deterministik yöntemde İkizdere Barajının faylara olan mesafeleri (MTA Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Aydın (NJ 35-11) Paftasından alınmıştır).

L-1 Çizgisel Kaynağının (Germencik Fayı) baraja olan mesafesi 1.20 km olarak ölçülmüş olup fayın üretebileceği deprem magnitüdü 6.8 olarak bulunmuştur. L-1 çizgisel kaynağına ait deterministik hesap sonuçları Tablo 4.2’ de verilmiştir.

Tablo 4.2. L-1 çizgisel kaynağı deterministik hesap sonuçları.

Azalım İlişkisi	PGA (g)
Abrahamson-Silva-Kamai NGA (2014)	0,484
Boore-Stewart-Seyhan-Atikson NGA (2014)	0,442
Campbell-Bozorgnia NGA (2014)	0,542
Chiou-Youngs NGA (2014)	0,513
Idriss NGA (2014)	0,607
ORTALAMA	0,518

L-2 Çizgisel Kaynağının (Olası Fay) baraja olan mesafesi 0.50 km olarak ölçülmüş olup fayın üretebileceği deprem magnitüdü 6.7 olarak bulunmuştur. L-2 çizgisel kaynağına ait deterministik hesap sonuçları Tablo 4.3’ te verilmiştir.

Tablo 4.3. L-2 çizgisel kaynağı deterministik hesap sonuçları.

Azalım İlişkisi	PGA (g)
Abrahamson-Silva-Kamai NGA (2014)	0,490
Boore-Stewart-Seyhan-Atikson NGA (2014)	0,446
Campbell-Bozorgnia NGA (2014)	0,549
Chiou-Youngs NGA (2014)	0,546
Idriss NGA (2014)	0,642
ORTALAMA	0,535

L-3 Çizgisel Kaynağının (Olası Fay) baraja olan mesafesi 3.40 km olarak ölçülmüş olup fayın üretebileceği deprem magnitudü 6.7 olarak bulunmuştur. L-3 çizgisel kaynağına ait deterministik hesap sonuçları Tablo 4.5’ te verilmiştir.

Tablo 4.4. L-3 çizgisel kaynağı deterministik hesap sonuçları.

Azalış İlişkisi	PGA (g)
Abrahamson-Silva-Kamai NGA (2014)	0,402
Boore-Stewart-Seyhan-Atikson NGA (2014)	0,379
Campbell-Bozorgia NGA (2014)	0,488
Chiou-Youngs NGA (2014)	0,403
Idriss NGA (2014)	0,446
ORTALAMA	0,424

L-4 Çizgisel Kaynağının (Olası Fay) baraja olan mesafesi 5.80 km olarak ölçülmüş olup fayın üretebileceği deprem magnitudü 7.2 olarak bulunmuştur. L-4 çizgisel kaynağına ait deterministik hesap sonuçları Tablo 4.5’ te verilmiştir.

Tablo 4.5. L-4 çizgisel kaynağı deterministik hesap sonuçları.

Azalış İlişkisi	PGA (g)
Abrahamson-Silva-Kamai NGA (2014)	0,347
Boore-Stewart-Seyhan-Atikson NGA (2014)	0,347
Campbell-Bozorgia NGA (2014)	0,423
Chiou-Youngs NGA (2014)	0,373
Idriss NGA (2014)	0,425
ORTALAMA	0,383

Hesabı yapılan dört adet çizgisel fayın oluşturabileceği maksimum ivmeler Tablo 4.6’ da verilmiştir.

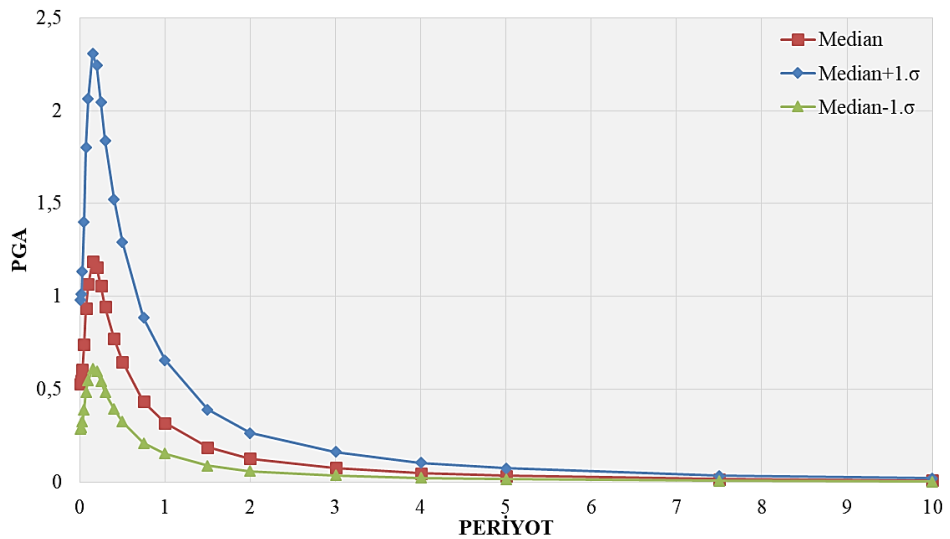
Tablo 4.6. L-1, L-2, L-3 ve L-4 çizgisel kaynaklarına ait deterministik hesap sonuçları.

Fay	PGA (g)
L-1 Çizgisel Kaynağı (Germencik Fayı)	0,518
L-2 Çizgisel Kaynağı (Olası Fay)	0,535
L-3 Çizgisel Kaynağı (Olası Fay)	0,424
L-4 Çizgisel Kaynağı (Olası Fay)	0,383

Tablo 4.6’ dan görüldüğü üzere Deterministik Yöntemde İkizdere Barajı için en kritik sismik kaynak L2 Çizgisel Kaynağıdır. L2 Çizgisel Kaynağı için hesaplanan Tasarım Spektrum Değerleri Tablo 4.7’ de ve grafiği Şekil 4.9’ da verilmiştir.

Tablo 4.7. L2 çizgisel kaynağı için hesaplanan tasarım spektrum değerleri.

T (s)	PSa Median	PSa Median + 1.σ	PSa Median - 1.σ
0,01	0,5326256	0,9828235	0,288648
0,02	0,5491328	1,0150186	0,297085
0,03	0,6093254	1,1355321	0,3269634
0,05	0,7417063	1,4011351	0,3926304
0,075	0,936138	1,7995161	0,4869944
0,1	1,0657864	2,0647713	0,5501339
0,15	1,1869499	2,3062132	0,6108932
0,2	1,156699	2,2416815	0,5968523
0,25	1,0569044	2,0443629	0,5464034
0,3	0,9451635	1,8399575	0,4855188
0,4	0,7740724	1,5210853	0,3939214
0,5	0,6495067	1,2924374	0,3264057
0,75	0,4349436	0,8869412	0,2132903
1	0,3196922	0,6587675	0,1551429
1,5	0,1890905	0,3923089	0,0911405
2	0,1283634	0,2669304	0,0617283
3	0,0787466	0,1640597	0,0377974
4	0,0510838	0,1055514	0,0247231
5	0,0370187	0,0765732	0,0178964
7,5	0,0178294	0,0367563	0,0086486
10	0,0107244	0,0219057	0,0052503
PGA	0,5305251	0,9783212	0,2876938



Şekil 4.9. L2 çizgisel kaynağı için hesaplanan tasarım spektrum grafiği.

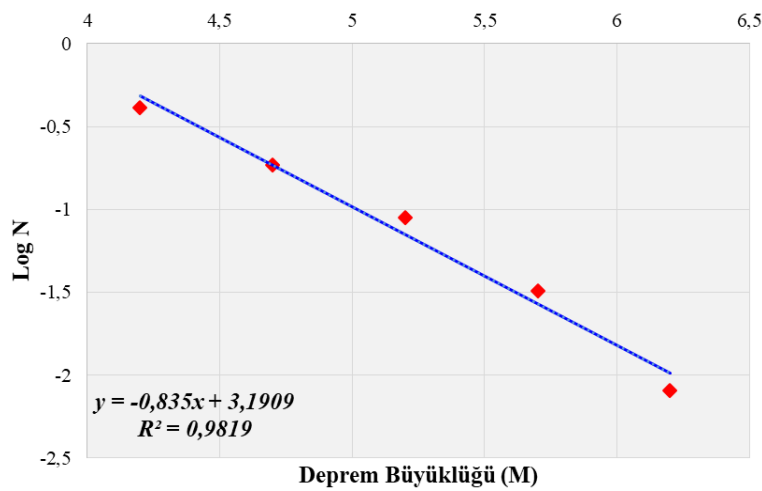
4.2.3. Olasılıksal yöntem

Olasılıksal yöntemde, belirli ekonomik ömürler içerisinde, belirli aşılma olasılıklarına göre proje sahasında deprem kaynaklarından gelmesi muhtemel maksimum yatay yer ivmeleri bulunmuştur. İkizdere Barajı için en kritik sismik kaynağın baraj sahasının da içinde bulunduğu A9 Alansal Kaynağı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.10' da olasılıksal yöntemde göz önüne alınan alansal kaynaklar verilmiştir.



Şekil 4.10. Baraj sahasını merkez alan 150 km yarıçapında bölge içerisine giren alan kaynaklar.

Şekil 4.11'de A9 alansal kaynağına ait magnitüd ile oluşum sayısına ait ilişki verilmiştir.

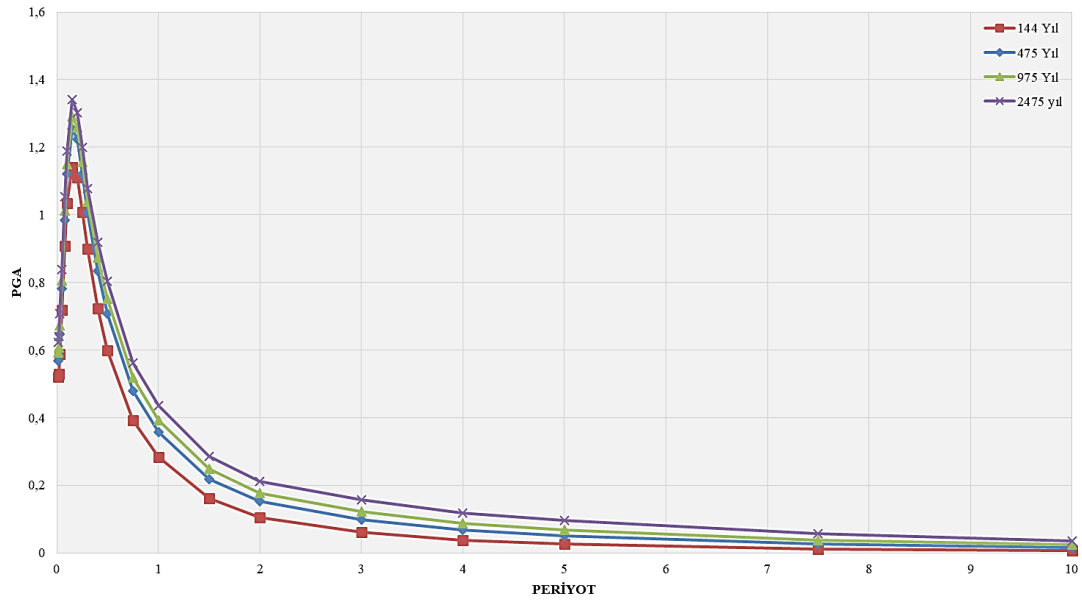


Şekil 4.11. A-9 alansal kaynağı depremlerine ait magnitüd-oluşum sayısı grafiği.

Gerri dönüş periyodu ve aşılma olasılığına göre beş farklı azalım ilişkisi kullanılarak hesaplanan maksimum ivmeler Tablo 4.8’ de, 144, 475, 975 ve 2475 yıllık periyotlarda tasarım spektrum grafiği ise Şekil 4.12’ de verilmiştir.

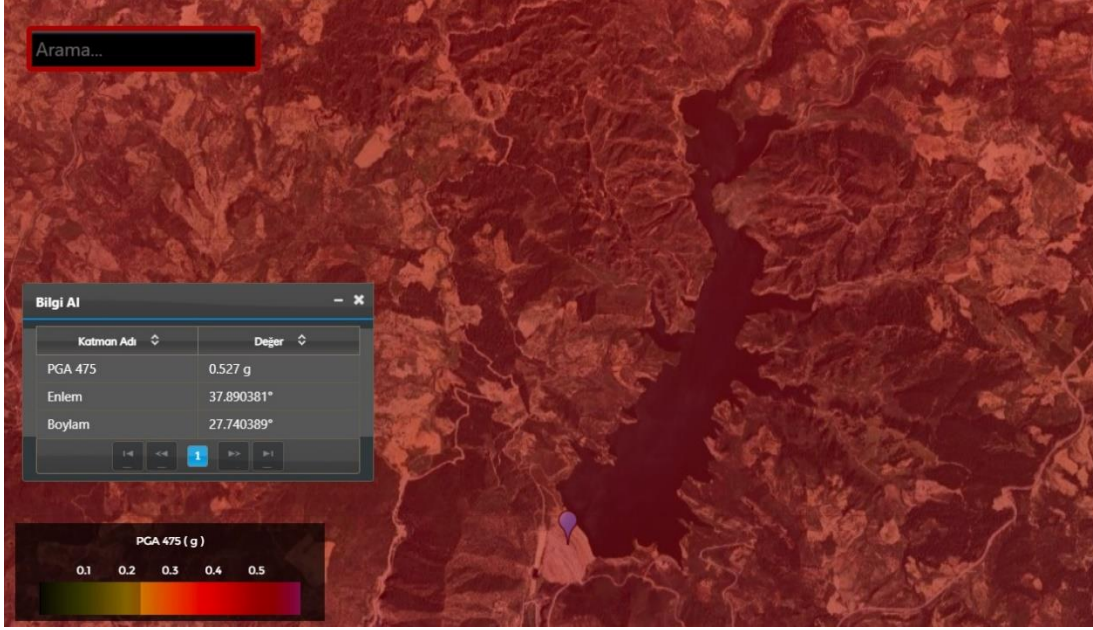
Tablo 4.8. Çeşitli aşılma olasılıklarına karşılık gelen ivme değeri.

Gerri Dönüş Periyodu	Aşılma Olasılığı	Abrahamson-Silva-Kamai NGA (2014) PGA (g)	Boore-Stewart-Seyhan-Atikson NGA (2014) PGA (g)	Campbell-Bozorgnia NGA (2014) PGA (g)	Chiou-Youngs NGA (2014) PGA (g)	Idriss NGA (2014) PGA (g)	Ortalama PGA (g)
144	100 yılda %50	0,457	0,432	0,531	0,562	0,593	0,515
475	50 yılda %10	0,500	0,465	0,551	0,592	0,755	0,573
975	50 yılda %5	0,505	0,488	0,551	0,608	0,849	0,600
2475	50 yılda %2	0,512	0,519	0,551	0,624	1,010	0,643



Şekil 4.12. İki dere barajı için 144, 475, 975 ve 2475 yıllık periyotlarda tasarım spektrum grafiği.

AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasından baraj yeri için 475 yıllık PGA değeri 0,527 g, 2475 yıllık PGA değeri 0,966 g olarak bulunmuştur. 475 yıllık PGA değeri için görsel Şekil 4.13’ te, 2475 yıllık PGA değeri için görsel Şekil 4.14’ te verilmiştir.



Şekil 4.13. AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından 475 yıllık geri dönüş periyodu için elde edilen PGA değeri.



Şekil 4.14. AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından 2475 yıllık geri dönüş periyodu için elde edilen PGA değeri.

DSİ tarafından 2012 yılında yayımlanmış olan Baraj Tasarımında Sismik Parametre Seçimi Rehberi doğrultusunda İkizdere Barajının tasarımı ve performans değerlendirmesinde kullanılacak PGA değerleri şu şekildedir:

İkizdere Barajı için işletme esaslı deprem (İED) seviyesinde PGA değeri 0,515 olarak hesaplanmıştır.

İkizdere Barajı için emniyet esaslı deprem (EED) seviyesinde PGA değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır:

İkizdere Barajının risk sınıfı ICOLD ve DSİ yöntemlerine göre en yüksek olarak tespit edilmiştir. Buna göre;

Deterministik hesap sonucu elde edilen Medyan+1.σ değeri olan $PGA=0,978$

2475 yıl için Yönetmelik değeri olan $PGA=1,5*0,966=1,449$

Deterministik hesap sonucu elde edilen $PGA=0,978$ ile yönetmelik değeri $PGA=1,449$ arasından büyük olan $PGA=1,449$

2475 yıl için olasılıksal hesap sonucu elde edilen değer olan $PGA=0,643$

Deterministik hesap sonucu elde edilen PGA ile yönetmelik değeri PGA arasından büyük olan $PGA=1,449$ değeri ile olasılıksal hesap sonucu elde edilen $PGA=0,643$ değerinden küçük olan PGA değeri olan $PGA=0,643$ değeri EED değeri olarak seçilir.

İED için $PGA=0,515$

EED için $PGA=0,643$

ICOLD Metoduna göre İkizdere Barajının Sismik Tehlike Derecesi “Şiddetli (IV)” olarak belirlenir.

4.3. İkizdere Barajının Tehlike Sınıfının Belirlenmesi

Barajların tehlike sınıflarının belirlenmesi, barajların güvenlik planlamalarında yol gösterici olmaktadır. Düşük risk sınıfındaki barajlarda düzenli güvenlik kontrollerinin yapılması yeterli iken, orta ve yüksek tehlike sınıfındaki barajlarda detaylı güvenlik muayeneleri yapılmalı, barajlar sürekli olarak izlenmeli ve acil eylem planları hazırlanmalıdır.

4.3.1. ICOLD metoduna göre İkizdere Barajının risk sınıfı

ICOLD tarafından geliştirilmiş metot kullanılarak İkizdere Barajının risk sınıfı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

İkizdere Barajının ICOLD metoduna göre yapı etkisinin puanlaması Tablo 4.9’ da verilmiştir.

Tablo 4.9. ICOLD metoduna göre yapı etkisi puanlaması.

		Puanı
Baraj Hazne Hacmi	213,22 hm ³	6
Baraj Yüksekliği	101,00 m	6

İkizdere Barajının ICOLD metoduna göre mansap etkisinin puanlaması Tablo 4.10' da verilmiştir.

Tablo 4.10. ICOLD metoduna göre mansap etkisi puanlaması.

		Puanı
İnsan Boşaltma İhtiyacı	>1000 kişi	12
Mansapta Muhtemel Hasar	Orta	8

İkizdere Barajının ICOLD metoduna göre toplam risk katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\text{Toplam Risk Katsayısı} = 6 + 6 + 12 + 8 = 32$$

ICOLD Metodu ile hesaplanan Toplam Risk Katsayısına göre İkizdere Barajının Risk Sınıfı En Yüksek Risk Grubu (IV) olarak bulunur.

4.3.2. Bureau metoduna göre İkizdere Barajının risk sınıfı

Bureau Metodu kullanılarak İkizdere Barajının risk sınıfı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

İkizdere Barajının Bureau metoduna göre yapı etkisinin puanlaması Tablo 4.11' de verilmiştir.

Tablo 4.11. Bureau metoduna göre yapı etkisi puanlaması.

		Puanı
Baraj Hazne Hacmi	213,22 hm ³	6
Baraj Yüksekliği	101,00 m	6
Barajın Yapılış Yılı	2009	1

İkizdere Barajının Bureau metoduna göre mansap etkisinin puanlaması Tablo 4.12' de verilmiştir.

Tablo 4.12. Bureau metoduna göre mansap etkisi puanlaması.

		Puanı
İnsan Boşaltma İhtiyacı	>1000 kişi	12
Mansapta Ekonomik Hasar	Orta	8

Bureau Metoduna göre İkizdere Barajının depremde hasar görebilirliği şu şekilde hesaplanır:

$$D\dot{S}\dot{I} = DY\dot{I} \times (M - 4,5)^3 \rightarrow D\dot{S}\dot{I} = 0,643 \times (7,0 - 4,5)^3 = 10,05$$

$$\ddot{O}H\dot{I} = 0,1994 \times \ln(10,05)^{1,3249} = 0,604$$

$$\ddot{O}HK = 2,5 \times 0,604 = 1,51$$

İkizdere Barajının Bureau metoduna göre toplam risk katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\text{Toplam Risk Katsayısı} = [(6 + 6 + 1) - (12 + 8)] \times 1,51 = 10,57$$

Bureau Metodu ile hesaplanan Toplam Risk Katsayısına göre İkizdere Barajının Risk Sınıfı “Düşük (I)” olarak bulunur.

4.3.3. İkizdere Barajının risk sınıfının DSİ baraj emniyeti rehberi (2012)’ de belirtilen yöntem kullanılarak belirlenmesi

Barajların tehlike sınıflarının belirlenmesi, barajların güvenlik planlamalarında yol gösterici olmaktadır. Düşük risk sınıfındaki barajlarda düzenli güvenlik kontrollerinin yapılması yeterli iken, orta ve yüksek tehlike sınıfındaki barajlarda detaylı güvenlik muayeneleri yapılmalı, barajlar sürekli olarak izlenmeli ve acil eylem planları hazırlanmalıdır.

İkizdere Barajının yapı etkisinden kaynaklı risk puanlaması Tablo 4.13’te verilmiştir.

Tablo 4.13. DSİ Baraj Emniyeti Rehberi (2012)’ de belirtilen yöntem kullanılarak yapı etkisinin puanlaması.

		Puanı
Rezervuar Kapasitesi	213,22 hm ³	6
Baraj Yüksekliği	101,00 m	6

İkizdere Barajının mansap etkisinden kaynaklı risk puanlaması Tablo 4.14’te verilmiştir.

Tablo 4.14. DSİ Baraj Emniyeti Rehberi (2012)’ de belirtilen yöntem kullanılarak mansap etkisinin puanlaması.

		Puanı
İnsan Boşaltma İhtiyacı	>1000 kişi	12
Potansiyel Mansap Zararı	Orta	8

İkizdere Barajının DSİ Baraj Emniyeti Rehberi (2012)’ de belirtilen yöntem kullanılarak toplam risk katsayısı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\text{Toplam Risk Katsayısı} = 6 + 6 + 12 + 8 = 32$$

DSİ Baraj Emniyeti Rehberi (2012)' de belirtilen yöntem kullanılarak hesaplanan Toplam Risk Katsayısına göre İkizdere Barajının Risk Sınıfı “En Yüksek Risk Grubu (IV)” olarak bulunur.

İkizdere Barajının üç farklı yöntemle göre belirlenmiş olan risk sınıfı Tablo 4.15' te verilmiştir.

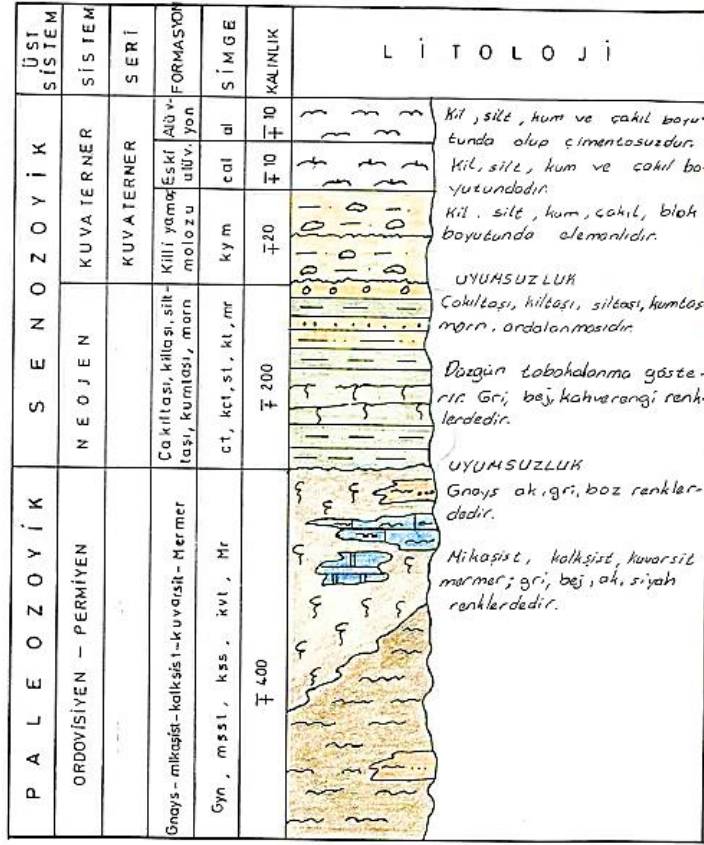
Tablo 4.15. İkizdere Barajının risk sınıfları.

Yöntem	Risk Sınıfı
ICOLD Metodu	En Yüksek (IV)
Bureau Metodu	Düşük (I)
DSİ Baraj Emniyeti Rehberi (2012)	En Yüksek (IV)

Görüldüğü üzere İkizdere Barajı ICOLD Metoduna göre “En Yüksek (IV)” risk sınıfında, Bureau Metoduna göre “Düşük (I)” risk sınıfında, DSİ Metoduna göre “En Yüksek (IV)” risk sınıfındadır. Bu nedenle İkizdere Barajında detaylı güvenlik muayeneleri yapılmalı, baraj sürekli olarak izlenmeli ve acil eylem planları hazırlanmalıdır.

4.4. Baraj Yerine Ait Jeolojik Özellikler

İkizdere Barajına ait jeolojik planlama raporuna göre baraj yeri ve göl alanı çökel kayalar ve metamorfik kayalardan meydana gelmiştir. Çökel kayalar Neojen yaşlı kumtaşı, marn, silttaşı, kiltası, çakıltası ile Kuvaterner yaşlı eski alüvyon, killi yamaç molozu ve alüvyon şeklindedir. Metamorfik kayalar Paleozoyik yaşlı mikaşist, kalkışist, kuvarsit, mermer ile gnays şeklindedir. Planlama aşamasında baraj yerinde 17 adet olmak üzere toplamda 942,5 m uzunlukta temel sondajı yapılmıştır. Açılmış olan sondaj kuyularından 10 adedi baraj ekseninde, 3 adedi dolusavak yerinde ve 4 adedi derivasyon tüneli güzergâhı üzerindedir. Baraj yerinde ana kaya durumunda mikaşist, kalkışist, gnays var olup kuvarsit ve mermer merccekler şeklindedir. İkizdere Barajı baraj yeri ve dolayının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti Şekil 4.15' te verilmiştir.



Şekil 4.15. İkizdere Barajı baraj yeri ve dolayının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti.

İkizdere Barajına ait jeolojik planlama raporunda baraj gövdesi altında yapılan sondajlarda basınçlı su tecrübesi sonucu elde edilen geçirimsizlik değerleri Tablo 4.16' da verilmiştir.

Tablo 4.16. Jeolojik planlama raporuna göre sondajlara ait geçirimsizlik katsayıları.

Sondaj Kuyusu	Kuyu Derinliği (m)	Yeraltı Su Seviyesi (m)	Basınçlı Su Tecrübesi Sonuçları (cm/s)	
SK-1	80,5	41,88	0 - 70 m	10^{-5}
			70 - 80,5 m	$10^{-5}-10^{-7}$
SK-2	60,5	14,1	0 - 16 m	10^{-4}
			16 - 60,5 m	10^{-5}
SK-3	50	Yüzeyde	0 - 50 m	$10^{-4}-10^{-5}-10^{-6}$
SK-4	51	2	0 - 51 m	$10^{-5}-10^{-6}$
SK-5	50,5	14,75	0 - 16 m	$10^{-4}-10^{-5}$
			16 - 50,5 m	$10^{-6}-10^{-7}$
SK-6	50	33,7	0 - 12 m	10^{-4}
			12 - 44 m	$10^{-3}-10^{-5}$
SK-7	60	48	44 - 50 m	$10^{-6}-10^{-7}$
			0 - 60 m	$10^{-4}-10^{-5}$
SK-8	60	49,95	0 - 26 m	$10^{-4}-10^{-5}$
			26 - 60 m	10^{-5}
SK-9	80	18,1	0 - 14 m	10^{-4}
			14 - 80 m	$10^{-5}-10^{-6}$
SK-10	80	20	0 - 7 m	10^{-4}
			7 - 80 m	10^{-5}

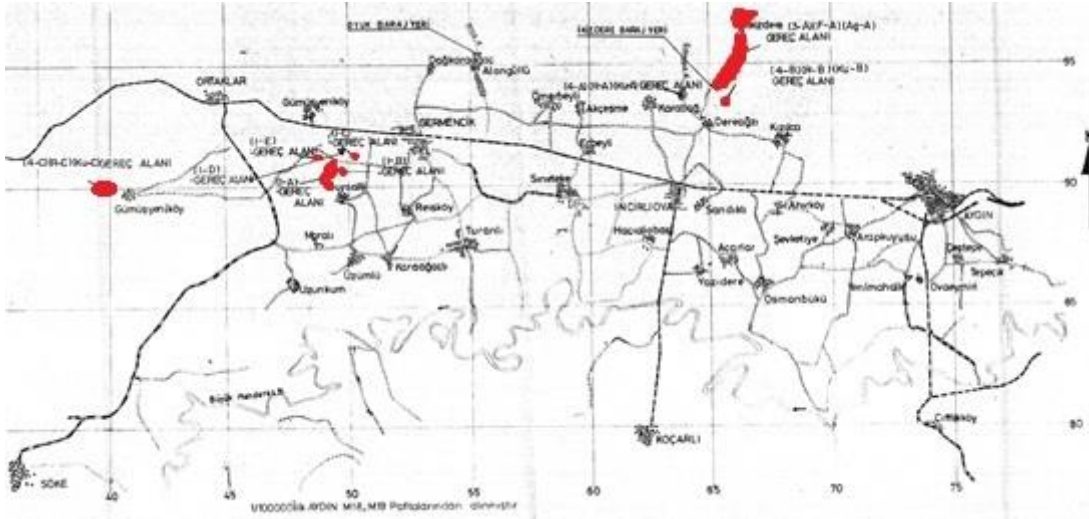
4.5. Baraj Dolgusunda Kullanılan Malzemelere Ait Mühendislik Özellikleri

Baraj gövdesinde kullanılan dolgu malzemeleri ve kullanıldıkları zonlar Tablo 4.17’ de verilmiş olup ve bu sahalardan alınan numunelerin laboratuvarında elde edilen deney sonuçları EK A’da tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 4.17. Dolguda kullanılan malzeme zonları ve temin edildikleri sahalara.

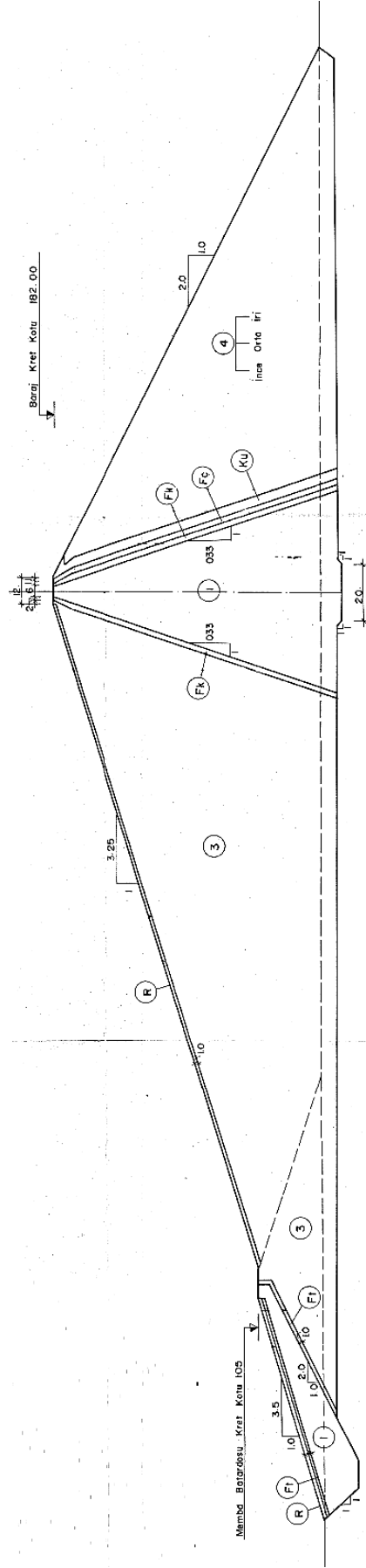
Zon	Malzeme	Temin Edildiği Sahalar
1	Geçirimsiz Kil Çekirdek	(1-A) (1-B) (1-C) (1-D) (1-E)
3	Geçirimli Kum-Çakıl	(3-A) (F-A) (A _g -A)
F _k	Kum Filtre	(3-A) (F-A) (A _g -A)
F _ç	Çakıl Filtre	(3-A) (F-A) (A _g -A)
F _t	Tuvenan Filtre	(3-A) (F-A) (A _g -A)
4	Sağlam Kaya	(4-A) (R-A) (K _u -A) (4-B) (R-B) (K _u -B) (4-C) (R-C) (K _u -C)
R	Riprap	(4-A) (R-A) (K _u -A) (4-B) (R-B) (K _u -B) (4-C) (R-C) (K _u -C)
K _u	Kaya Ufağı	(4-A) (R-A) (K _u -A) (4-B) (R-B) (K _u -B) (4-C) (R-C) (K _u -C)

Dolguda kullanılan malzemelerin temin edildiği sahalara ait bulduru haritası Şekil 4.16’ da verilmiştir.



Şekil 4.16. Dolguda kullanılan malzemelerin temin edildiği sahalara ait bulduru haritası.

İkizdere Barajında kullanılan malzemeler ve kullanıldıkları kısımlar Şekil 4.17’de görülmektedir.



Şekil 4.17. İkizdere Barajında kullanılan malzemeler ve kullanıldıkları kısımlar.

4.6. Baraj Dolgusunda Yapılan Ölçümler ve Ölçüm Aletleri

Analizlerde hem piyezometre ölçümleri hem de röper ölçümleri olan B3, B4 ve B5 en kesitleri modellenmiş, söz konusu en kesitlere ait modeller oluşturulurken İkizdere Barajına ait Gövde Enkesitleri As-Built projelerinden faydalanılmıştır.

4.6.1. Basınç ölçümleri

İkizdere Barajında oluşacak olan su basınçlarını ölçmek amacıyla B3, B4 ve B5 kesitleri olmak üzere 3 farklı kesitte, farklı kot ve noktalarda toplamda 44 adet dolgu tipi piyezometre (P), 6 adet temel tipi piyezometre (T) ve 3 adet su basınçölçer (W) yerleştirilmiştir. Söz konusu ölçüm aletlerinin baraj eksenine olan uzaklıkları ile yerleşim kotları Tablo 4.18’ de verilmiştir.

Tablo 4.18. İkizdere Barajına su basıncı ölçümü amacıyla yerleştirilmiş olan ölçüm aletlerinin yerleşim kotu ve baraj eksenine olan mesafeleri.

Kesit No (KM)	Ölçüm Aleti	Yerleşim Kotu	Baraj Eksenine Olan Uzaklık		
			Memba	Mansap	
Kesit: B3 KM: 0+184,595	Dolgu Tipi Piyezometre	P1	85	Eksende	-
		P2	100	20	-
		P3	100	Eksende	-
		P4	100	-	20
		P5	115	15	-
		P6	115	-	15
		P7	130	10	-
		P8	130	Eksende	-
		P9	130	-	10
		P10	145	10	-
		P11	145	-	10
		P12	160	5	-
		P13	160	-	5
		P14	175	Eksende	-
Kesit: B4 KM: 0+235,00	Temel Tipi Piyezometre Su Basınç Ölçer	T1	65	15	-
		T2	65	-	15
		W1	100	-	35
		P15	78	Eksende	-
		P16	100	20	-
		P17	100	Eksende	-
		P18	100	-	20
		P19	115	15	-
		P20	115	-	15
		P21	130	10	-
		P22	130	Eksende	-
		P23	130	-	10
		P24	145	10	-
		P25	145	-	10
P26	160	5	-		
P27	160	-	5		
P28	175	Eksende	-		
Temel Tipi Piyezometre Su Basınç Ölçer	T3	55	15	-	
	T4	55	-	15	
	W2	100	-	35	

Tablo 4.18. (Devamı) İkizdere Barajına su basıncı ölçümü amacıyla yerleştirilmiş olan ölçüm aletlerinin yerleşim kotu ve baraj eksenine olan mesafeleri.

Kesit No (KM)	Ölçüm Aleti	Yerleşim Kotu	Baraj Eksenine Olan Uzaklık			
			Memba	Mansap		
Kesit: B5 KM: 0+295,00	Dolgu Tipi Piyezometre	P29	76	Eksende	-	
		P30	85	20	-	
		P31	85	-	20	
		P32	100	20	-	
		P33	100	-	Eksende	
		P34	100	-	20	
		P35	115	15	-	
		P36	115	-	15	
		P37	130	15	-	
		P38	130	-	Eksende	
		P39	130	-	15	
		P40	145	10	-	
		P41	145	-	10	
		P42	160	5	-	
		P43	160	-	5	
		P44	175	-	Eksende	
		Temel Tipi Piyezometre	T5	55	15	-
		T6	55	-	15	
		Su Basınc Ölçer	W3	78	-	40

Piyezometre okumaları için yapılan analizlerde, 15.04.2010 tarihi ile 01.03.2023 tarihleri arasında olan toplam 24 farklı zamandaki okumalar kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan bu okuma zamanları genel itibariyle su seviyelerinin artıştan azalışa ya da azalıştan artışa geçtiği ve minimum-maksimum işletme su seviyelerinin olduğu zamanlar olacak şekilde seçilmiştir. Şekil 4.18’de İkizdere Barajına ait baraj emniyeti ve ölçüm tesisi odasına, Şekil 4.19’ de 01.03.2023 tarihli piyezometre ölçümlerine ait fotoğraflar verilmiştir.

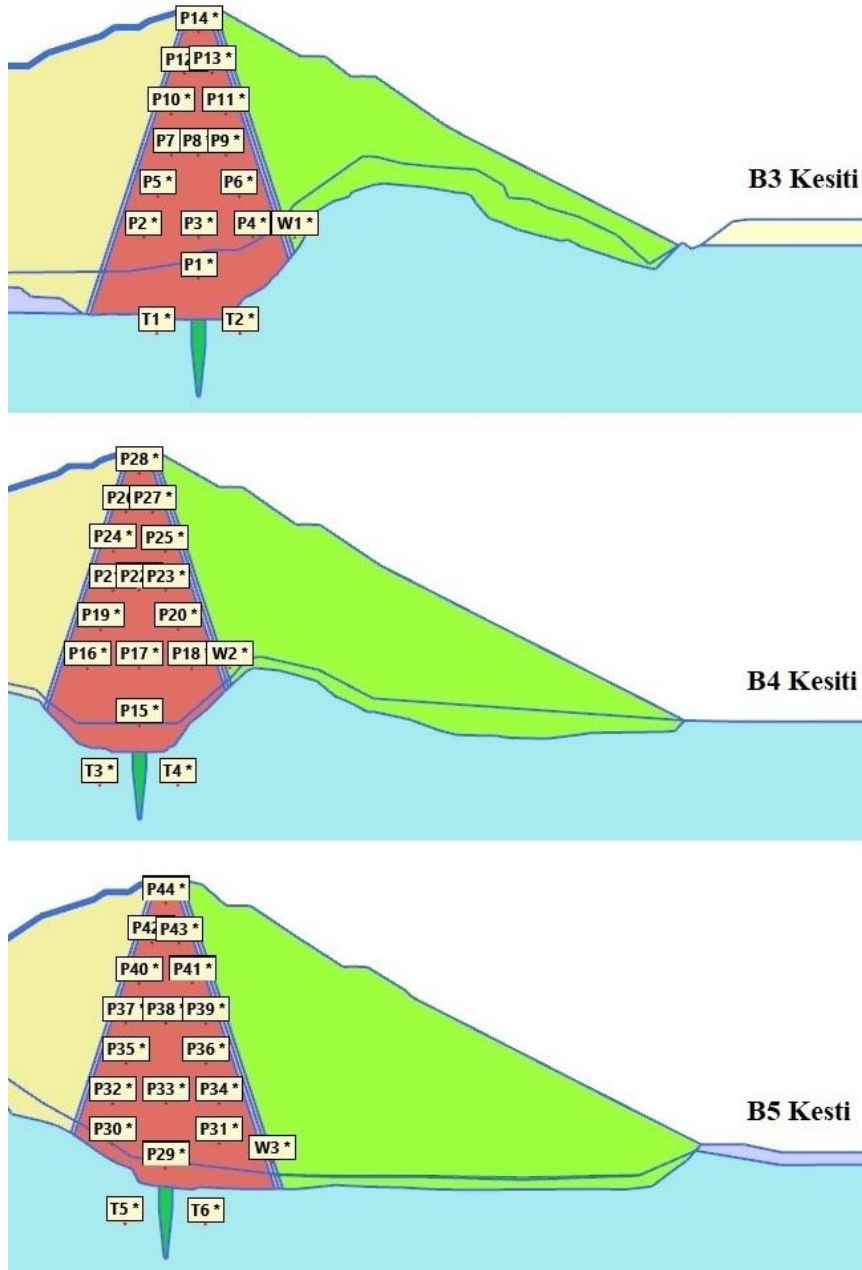


Şekil 4.18. İkizdere Barajına ait baraj emniyeti ve ölçüm tesisi odası.



Şekil 4.19. 01.03.2023 tarihli piyezometre ölçümleri.

Piyezometrelerin baraj üzerindeki konumları Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20. Piyezometrelerin baraj üzerindeki konumları.

4.6.2. Deplasman ölçümleri

Röper okumaları için yapılan analizlerde, 30.09.2009 tarihindeki ilk röper okumalarından 09.11.2022 tarihindeki röper okumalarına kadar DSİ Bölge Müdürlüğü tarafından alınmış olan toplam 13 farklı zamandaki okumalar kullanılmıştır. Baraj en kesitinde modellenen röperlere ait referans kot ve koordinatlar 30.09.2009 tarihinde yapılmış olan ilk röper okuma değerleri olarak göz önüne alınmıştır. Söz konusu röperlere ait kot ve baraj eksenine olan mesafeler Tablo 4.19’ da verilmiştir.

Tablo 4.19. İkizdere Barajına yerleştirilmiş olan röperlere ait yerleşim kotu ve baraj eksenine olan mesafeleri.

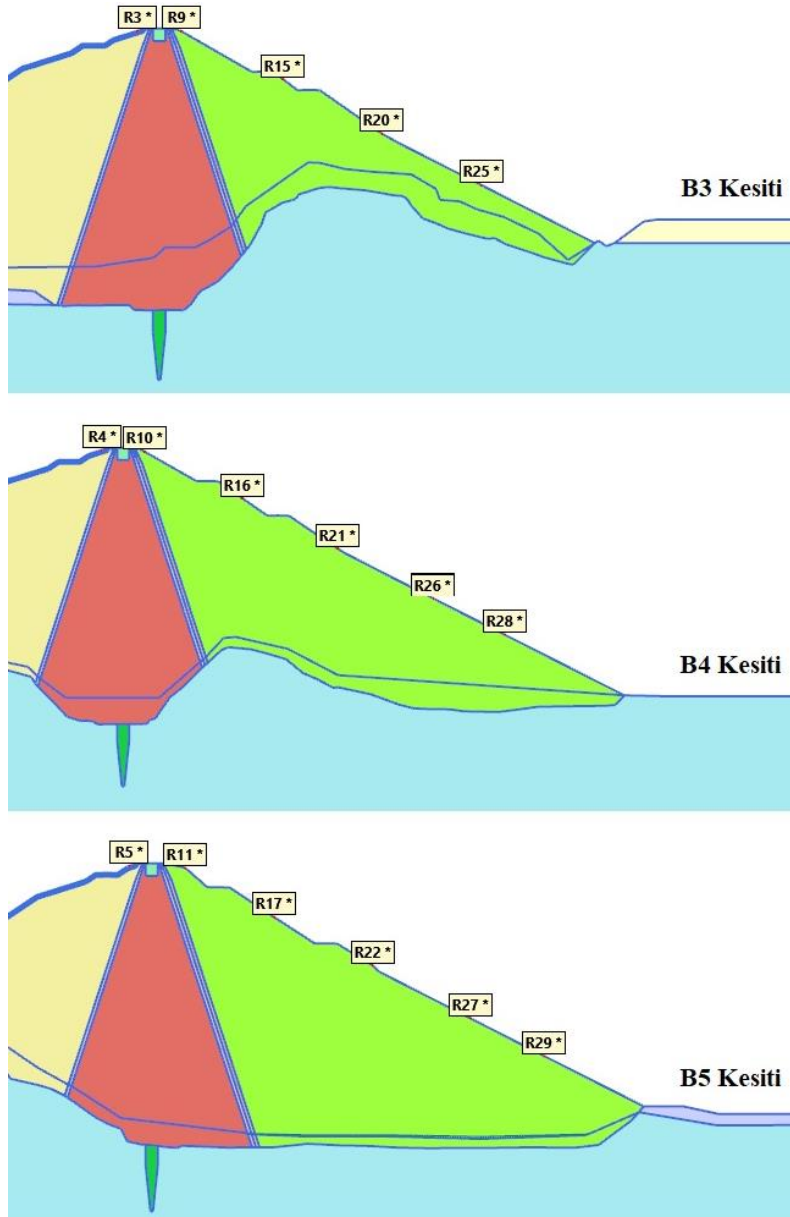
Kesit No (KM)	Röper No	Röperin Kotu (m)	Röperin Baraj Eksenine Olan Mesafesi (m)
Kesit: B3 KM: 0+184,595	R3	182,572	8,94
	R9	182,520	8,85
	R15	163,222	49,89
	R20	141,202	89,89
	R25	120,532	129,92
Kesit: B4 KM: 0+235,00	R4	182,632	9,05
	R10	182,002	8,98
	R16	162,482	49,89
	R21	141,442	89,91
	R26	120,592	129,92
Kesit: B5 KM: 0+295,00	R28	105,432	159,83
	R5	182,592	9,06
	R11	181,782	13,67
	R17	161,662	49,99
	R22	142,122	90,00
0+295,00	R27	120,552	129,96
	R29	105,202	159,97

İkizdere Baraj gövdesinin mansap tarafında bulunan R9 röperine ait fotoğraf Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. R9 röperine ait fotoğraf.

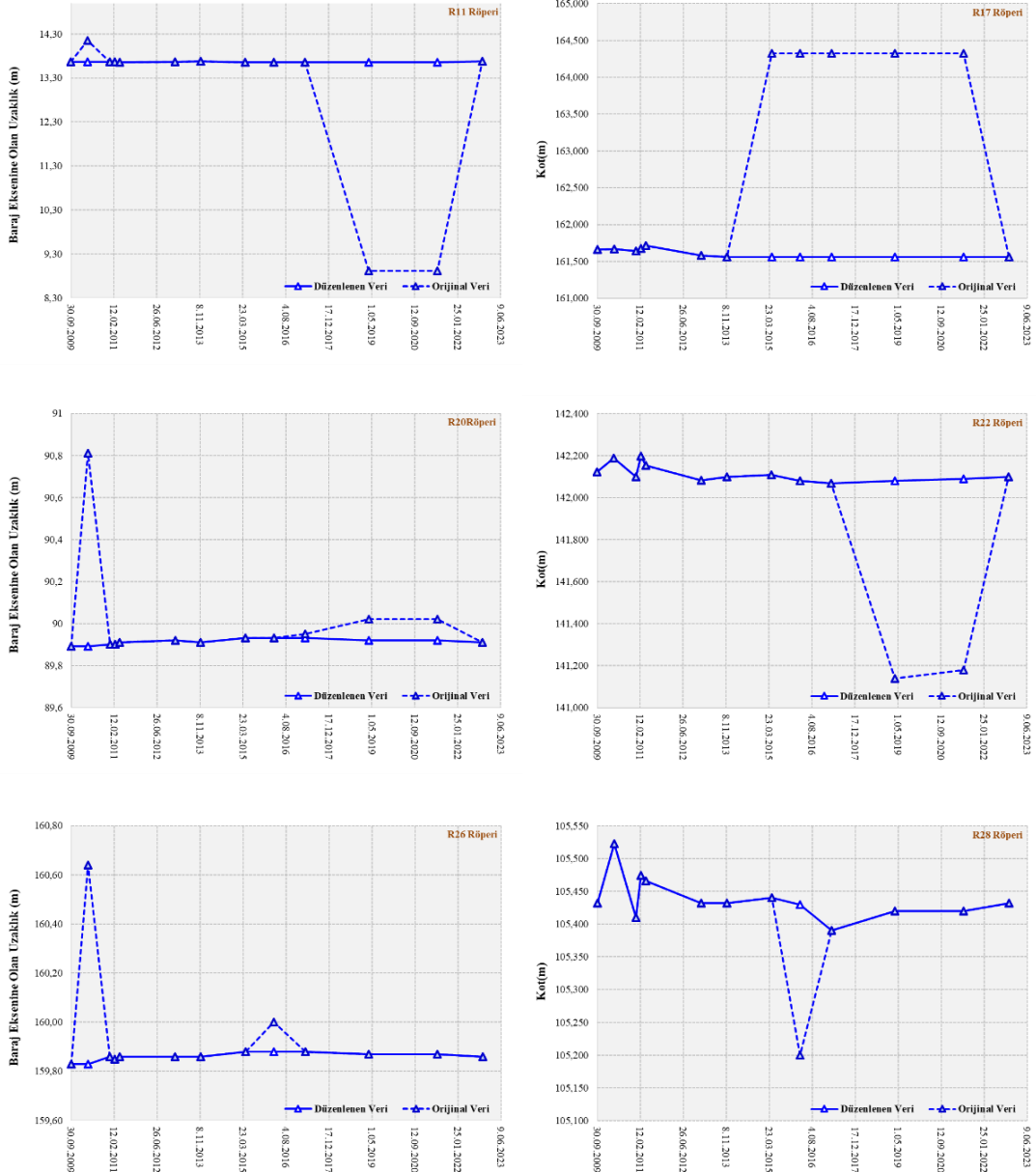
B3, B4 ve B5 kesitlerinde bulunan röperlerin baraj üzerindeki konumları Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22. Röperlerin baraj üzerindeki konumları.

Aşağıda örnekleri verilmiş olan röper ölçüm grafiklerinde belirli tarihlerde yapılmış olan düşey yer değiştirme ve baraj eksenine olan uzaklık ölçüm değerlerinde okuma hataları olduğu düşünülmektedir. Bu bariz kot ve mesafe değişimlerinin olduğu tarihlerdeki değerler su seviyesi ile önceki ve sonraki okuma değerlerine uygun olacak şekilde revize edilerek ölçüm grafiklerinin daha düzgün olması sağlanmıştır. Hatalı olduğu düşünülen ve revize edilen ölçümlere ait tüm grafikler Ek B’ de verilmiştir. Tüm orijinal ölçüm değerleri incelendiğinde genel itibariyle farklı röper noktalarına

ait aynı tarihteki okuma değerlerinde bariz farklar olduğu görülmektedir. Şekil 4.23’ te orijinal ölçüm verileri ile düzenlenmiş verilere ait bazı grafikler verilmiştir.



Şekil 4.23. R11, R17 R20, R22, R26 ve R28 röperlerinin orijinal veri ve düzenlenmiş verilerine ait grafikler.

4.7. Plaxis Sonlu Elemanlar Programı ve Baraj Sayısal Modeli

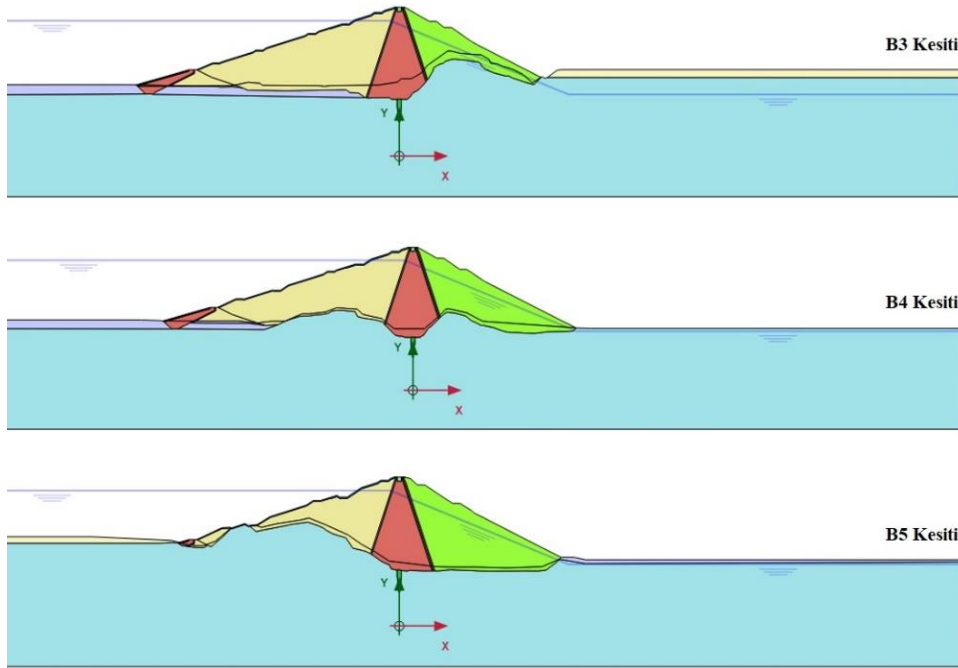
Plaxis, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak deformasyon ve stabilite analizleri yapabilen geoteknik analiz programıdır. Program, gerilme-şekil değiştirme, taşıma gücü, akım ağı ve konsolidasyon gibi karmaşık geoteknik problemlerini hızlı bir şekilde çözdüğü için sıklıkla tercih edilmektedir.

Problemlerin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlerinde aşağıdaki adımlar takip edilerek analizler gerçekleştirilmektedir:

- Probleme ait geometrinin oluşturulması
- Başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması
- Zemin bünye modeli ve zemin parametrelerinin tanımlanması
- İnşaat aşamalarının tanımlanması
- Analizin yapılması ve sonuçların görüntülenmesi

Bu çalışmadaki analizler Plaxis 2D - 2023.2.0.1059 versiyonu kullanılarak yapılmıştır.

Analizlerde hem piyezometre hem de röper okumalarının bulunduğu B3, B4 ve B5 kesitleri iki boyutlu olarak düzlem zorlanma koşullarında modellenmiştir. Barajın gerçek duruma en yakın ve detaylı şekilde modellenmesi amacıyla baraj kesitleri ve zonları inşaat sonrası hazırlanmış olan As-Built projelerinden alınmıştır. Kesitlere ait sonlu elemanlar ağı, daha hassas sonuçlar elde edebilmek amacıyla 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 4.24'te, analizleri gerçekleştirilen B3, B4 ve B5 kesitleri için oluşturulmuş olan sayısal model geometrileri görülmektedir.



Şekil 4.24. B3, B4 ve B5 kesitlerine ait geometrik modeller.

Plaxis programında zeminlerin davranışlarının modellenmesi amacıyla farklı zemin modelleri kullanılmaktadır. Aşağıda bu zemin modellerinin bir kaçından kısaca bahsedilmiştir.

4.7.1. Lineer elastik zemin modeli

Zeminin davranışının Hooke yasasına uygun olduğunun ve zeminin izotropik lineer elastik bir malzeme olduğunun kabul edildiği zemin modelidir. Lineer elastik model, zeminin davranışını sınırlı şekilde temsil ettiğinden dolayı genellikle zemin içerisindeki rijit yapıların modellenmesinde kullanılmaktadır. Lineer Elastik Zemin Modeli kullanılarak tanımlanan zeminlerde rijitlik parametresi olarak kayma modülü (G), elastisite modülü (E) ve elastik parametre olarak poisson oranı (ν) olmak üzere 3 farklı parametre programa girilmelidir (Bentley, 2023).

4.7.2. Mohr-Coulomb zemin modeli

Zeminin davranışının elasto-plastik kabul edildiği zemin modelidir. Mohr-Coulomb Zemin Modeli kullanılarak tanımlanan zeminlerde elastik parametre olarak elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν), plastik parametre olarak kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) olmak üzere 5 farklı zemin parametresi programa girilmektedir. Bu zemin modelinde, zemin katmanlarının rijitliklerinin gerilme değişimleriyle değişmesi göz önüne alınamamakta (sadece derinlikle artış verilebilmektedir), ortalama bir rijitlik parametresi ile zeminler temsil edilmektedir. Bu nedenle bu zemin modeli ile gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen deformasyon değerleri gerçeği temsil etmemekte fakat analizler diğer zemin modellerine oranla daha hızlı gerçekleşmektedir (Bentley, 2023).

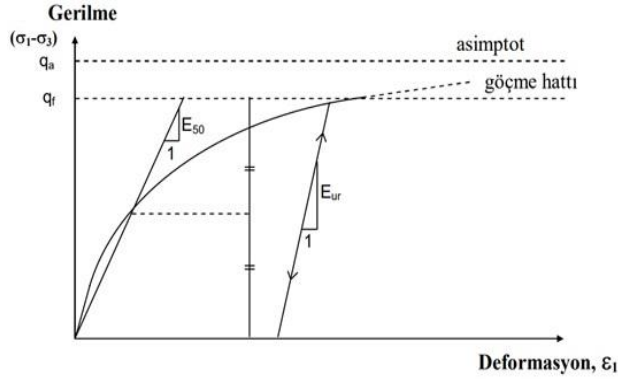
4.7.3. Soft soil zemin modeli

Normal konsolide killi, killi siltler ve turba zeminler zemin mekaniğinde yumuşak zeminler olarak kabul edilmektedirler. Bu zeminlerin yüksek sıkışabilirlik özelliğine sahip olmalarından kaynaklı farklı özellikler göstermelerinden dolayı bu zeminlerin modellenmesinde Soft Soil Zemin Modeli kullanılmaktadır. Soft Soil Zemin Modeli kullanılarak tanımlanan zeminlerde modifiye sıkışma indeksi (λ^*), modifiye şişme indeksi (κ^*), kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) olmak üzere 5 farklı zemin parametresi programa girilmektedir (Bentley, 2023).

4.7.4. Hardening soil (pekleşen) zemin modeli

Zeminin davranışını plastisite teorisini kullanarak modellemeye imkân verdiği için gelişmiş bir zemin modelidir. Hardening Soil Zemin Modeli, farklı özelliklerdeki sert ve yumuşak zeminlerin davranışını modellemek amacıyla kullanılır. Hardening Soil Zemin Modeli zemin rijitliğinin gerilmeyle birlikte değiştiğini göz önüne almaktadır.

Hardening Soil Zemin Modeli, konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi sonucu bulunan aksenal deformasyon ile gerilme arasındaki hiperbolik ilişkiyi kullanmaktadır. Hardening Soil Zemin Modeli, üç farklı rijitlik parametresi kullandığından dolayı zeminin gerçek davranışına daha yakın sonuçlar vermektedir (Bentley, 2023). Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi sonucu elde edilen hiperbolik gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 4.25’ te verilmiştir.



Şekil 4.25. Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi sonucu elde edilen hiperbolik gerilme-deformasyon ilişkisi (Bentley, 2023).

Hardening Soil (Pekleşen) Zemin Modeli kullanılarak tanımlanan zeminlerde, zemin rijitliğini tanımlamaya yarayan temel parametreler olarak drenajlı üç eksenli deney ile bulunan sekant rijitliği (E_{50}^{ref}), drenajlı odömetre deneyi ile bulunan tanjant rijitliği (E_{oed}^{ref}), drenajlı üç eksenli deney ile bulunan yeniden yükleme-boşaltma rijitliği (E_{ur}^{ref}) ve gerilmeye bağlı rijitlik değeri için girilen üs değeri (m), plastik parametreler olarak kohezyon (c), içsel sürtünme açısı (ϕ) ve dilatasyon açısı (ψ) ve diğer parametreler olarak referans gerilme (p^{ref}), yeniden yükleme-boşaltma poisson oranı (ν_{ur}) gibi birçok zemin parametresi programa girilmelidir (Bentley, 2023).

4.8. Analiz Modelinde Kullanılan Malzemelere Ait Özellikler

Sonlu elemanlar analizinde programa tanımlanacak olan malzeme parametreleri ve seçilecek olan zemin modeli analiz sonuçlarını direkt olarak etkilemektedir. Bundan dolayı analiz için seçilecek olan malzeme modeli ve programa tanımlanacak olan malzeme parametrelerinin seçimi analizlerin en önemli aşamalarındandır.

İkizdere Barajının modellenmesinde kullanılan baraj gövdesi dolgu malzemeleri inşaat sonrası hazırlanmış olan As-Built projelerinden alınmıştır. Barajın gerçeğe yakın davranışının modellenebilmesi için ihtiyaç duyulan ve baraj inşası sırasında

kullanılmış olan baraj gövdesi dolgu malzemelerine ait deney sonuçlarına ulaşılamamıştır. Bu nedenle; analizlerde planlama aşamasında yapılan laboratuvar deneylerinden ve literatürden elde edilen malzeme parametreleri kullanılmıştır. Analiz modelinde kullanılan malzemelere ait parametreler Tablo 4.20’ de verilmiştir.

Tablo 4.20. Analiz modelinde kullanılan malzemelere ait parametreler.

Malzeme	Malzeme Modeli	Drenaj Tipi	γ_{unsat} γ_{sat} (kN/m ³)	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	$k_x - k_y$ (m/day)	c'_{ref} (kN/m ²)	ϕ' (°)	ψ' (°)
E	Enjeksiyon Perdesi – Kapak Enjeksiyonu	Lineer Elastik	Non-porous	24.00	20.000	-	-	-
Al	Alüvyon	Hardening Soil	Drenajlı	19.00 20.00	5.000	3.024	5	30
Şt	Şist	Hardening Soil	Drenajlı	27.00 28.00	50.000.000	30.24	20.000	30
K _{ym}	Killi Yamaç Molozu	Hardening Soil	Drenajlı	19.00 20.00	20.000	0.0864	10	35
1	Geçirimsiz Kil Çekirdek	Hardening Soil	Drenajsız-A	18.60 19.60	25.000	0.007957	120.6	20
3	Geçirimli Kum-Çakıl	Hardening Soil	Drenajlı	16.90 17.90	30.000	8.64	0	36
F _k	Kum Filtre	Hardening Soil	Drenajlı	16.70 17.70	25.000	86.4	0	37
F _ç	Çakıl Filtre	Hardening Soil	Drenajlı	17.10 18.10	32.000	864	0	38
F _t	Tuvenan Filtre	Hardening Soil	Drenajlı	16.90 17.90	30.000	8.64	0	37
4	Sağlam Kaya	Hardening Soil	Drenajlı	26.50 27.50	200.000	864	0	42
R	Riprap	Hardening Soil	Drenajlı	26.50 27.50	200.000	8640	0	42

Barajın farklı koşullar ve su seviyeleri altındaki davranışının gerçeğe yakın olarak elde edebilmesi için, enjeksiyon perdesi ve kapak enjeksiyonu Lineer Elastik Zemin Modeli kullanılarak, baraj temeli ve zonlarındaki tüm zeminler Hardening Soil (Pekleşen) Zemin Modeli kullanılarak modellenmiştir. Hardening Soil (Pekleşen) Zemin Modeli kullanılarak modellenen zeminlerde, $p_{\text{ref}}=100$ kN/m², $\nu_{\text{ur}} = 0.2$ ve Plaxis programı tarafından kullanılması önerilen $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = E_{50}^{\text{ref}}$ ve $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 3 \cdot E_{50}^{\text{ref}}$ değerleri programa tanımlanmıştır. Zeminlere ait birim hacim ağırlık değerleri olan ($\gamma_{\text{unsat}}/\gamma_{\text{sat}}$) parametreleri planlama aşamasında kullanılan laboratuvar deney sonuçlarının

ortalama değeri olarak alınmıştır. Permeabilite değerleri olan (k_x/k_y) parametreleri geçirimsiz kil çekirdek için planlama aşamasında kullanılan laboratuvar deney sonuçlarının ortalama değeri, diğer tüm zeminler için Çelik (2014) tarafından İkizdere Barajı için yapılmış sızma çalışmasında kullanılmış olan değerler olarak alınmıştır. Aşırı konsolidasyon oranı değeri olan (OCR) parametresi Aydın (2014) tarafından yapılan çalışmada belirtildiği şekilde temel zemini için 20, diğer tüm dolgu zeminler için 3 olarak alınmıştır. Zeminde gerilmeye bağlı rijitlik değeri olan m parametresi Plaxis programında default olarak tanımlanmış olan ve çalışmada belirtildiği şekilde geçirimsiz kil çekirdek için 1, diğer tüm zeminler için 0.5 olarak göz önüne alınmıştır.

4.9. Plaxis Paket Programında Sonlu Elemanlar Ağı

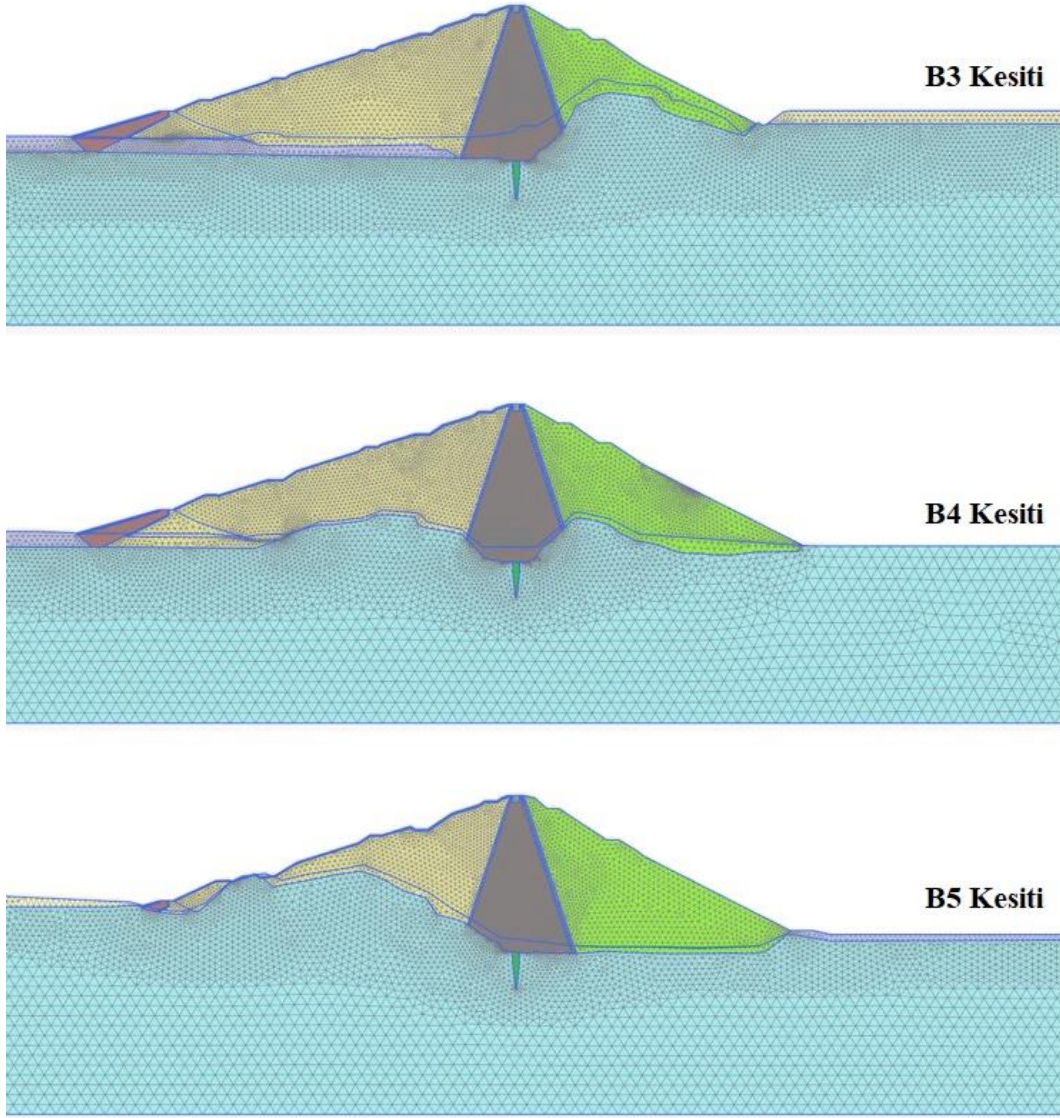
Plaxis programında oluşturulan modelin sonlu eleman ağı program tarafından sunulmuş olan mesh seçeneklerine göre otomatik olarak oluşturulmakla beraber istenilen bölgelerde kullanıcı tarafından manuel olarak eleman küçültülmesi veya büyütülmesi yapılabilmektedir. Analizlerde, sonlu eleman ağı oluşturulurken çıkan sonuçların daha hassas olabilmesi amacıyla “very fine” mesh seçeneği seçilmiş, ayrıca geçirimsiz kil çekirdek zonunda en sık olacak şekilde tüm modelde manuel olarak ağ sıklaştırması yapılmıştır. Şekil 4.26’ da B3, B4 ve B5 kesitleri için oluşturulmuş sonlu eleman ağına ait görseller verilmiştir.

4.10. Modelleme ve Analiz Aşamalarında Yaşanan Zorluklar

- Röper ölçümlerinin olduğu tarihlerde genel itibariyle su seviyesi ölçümlerinin olmaması nedeniyle bu tarihlerdeki su seviyeleri enterpolasyon yapılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.
- Anlık su seviyesi ölçümlerinin olmaması nedeniyle analiz modelinde su seviyesi değişiminin lineer olduğu kabul edilmiştir.
- İnşaat aşamasının başlamasından ilk referans röper ölçümünün alınmasına kadar geçen süreçte dolguda herhangi bir oturma ölçümü bulunmamasından dolayı ilk referans röper ölçümüne kadar geçen süreçte barajın oturma davranışı analiz edilememiştir.
- Analizlerde barajın gerçekteki davranışının elde edilebilmesi için ihtiyaç duyulan, imalat aşamasında kullanılmış olan malzemelere ait parametrelere

ulaşılamamış, modelde planlama aşamasındaki deney sonuçları ve literatürdeki değerler göz önüne alınmıştır.

- Barajın ilk gününden itibaren tamamlanmış sürecine kadar olan imalat ait kayıtlara ulaşılamamış, bu nedenle baraj kademeli olarak modellenememiştir.



Şekil 4.26. B3, B4 ve B5 kesitleri için oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı.

4.11. Analiz Sonuçları İle Baraj Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirmeler

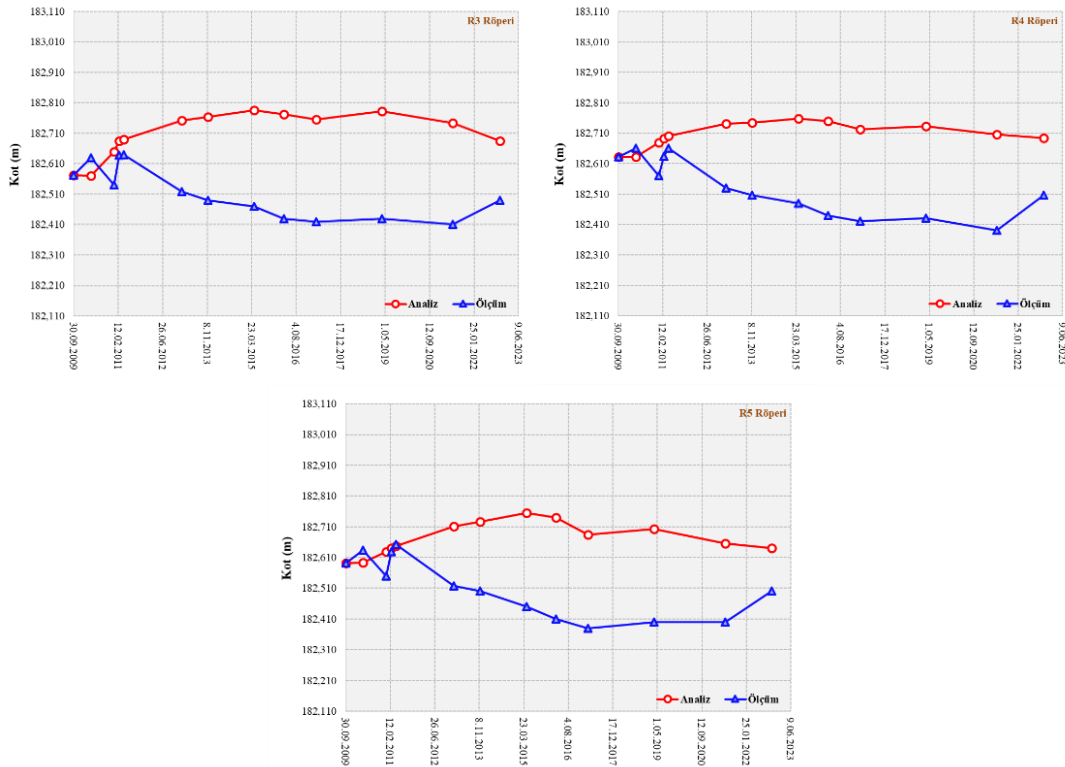
Baraja ait hem piyezometre hem de röper okumalarının bulunduğu B3, B4 ve B5 kesitleri iki boyutlu olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Analiz sonucu röper ve piyezometre noktaları için elde edilen değerler ile değerlendirmeler aşağıda ayrı başlıklar altında sunulmuş ve Plaxis programına ait bazı çıktılar EK-C' de verilmiştir.

4.11.1. Röperlere ait analiz sonuçları ile baraj ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi

Alet merkezleme röperi (AMR) 2 hattı üzerinde olan R3, R4 ve R5 röperlerine ait düşey yerdeğişirmeler için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.21’ de, grafikler Şekil 4.27’ de verilmiştir.

Tablo 4.21. R3, R4 ve R5 röperlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R3		R4		R5	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	182,572	182,572	182,632	182,632	182,592	182,592
13.04.2010	0,00	182,630	182,571	182,660	182,632	182,633	182,593
27.12.2010	108,53	182,540	182,650	182,570	182,679	182,550	182,629
22.02.2011	120,55	182,638	182,684	182,633	182,693	182,629	182,640
18.04.2011	125,55	182,639	182,689	182,660	182,700	182,653	182,648
24.01.2013	154,36	182,518	182,752	182,529	182,741	182,518	182,711
15.11.2013	158,70	182,490	182,763	182,506	182,744	182,501	182,726
21.04.2015	167,01	182,470	182,785	182,480	182,758	182,450	182,755
18.03.2016	162,00	182,430	182,772	182,440	182,749	182,410	182,739
16.03.2017	145,90	182,420	182,756	182,420	182,722	182,380	182,684
25.03.2019	152,80	182,430	182,783	182,430	182,732	182,400	182,702
1.06.2021	134,29	182,410	182,743	182,390	182,706	182,400	182,656
9.11.2022	124,81	182,490	182,685	182,506	182,694	182,501	182,641



Şekil 4.27. R3, R4 ve R5 röperlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.

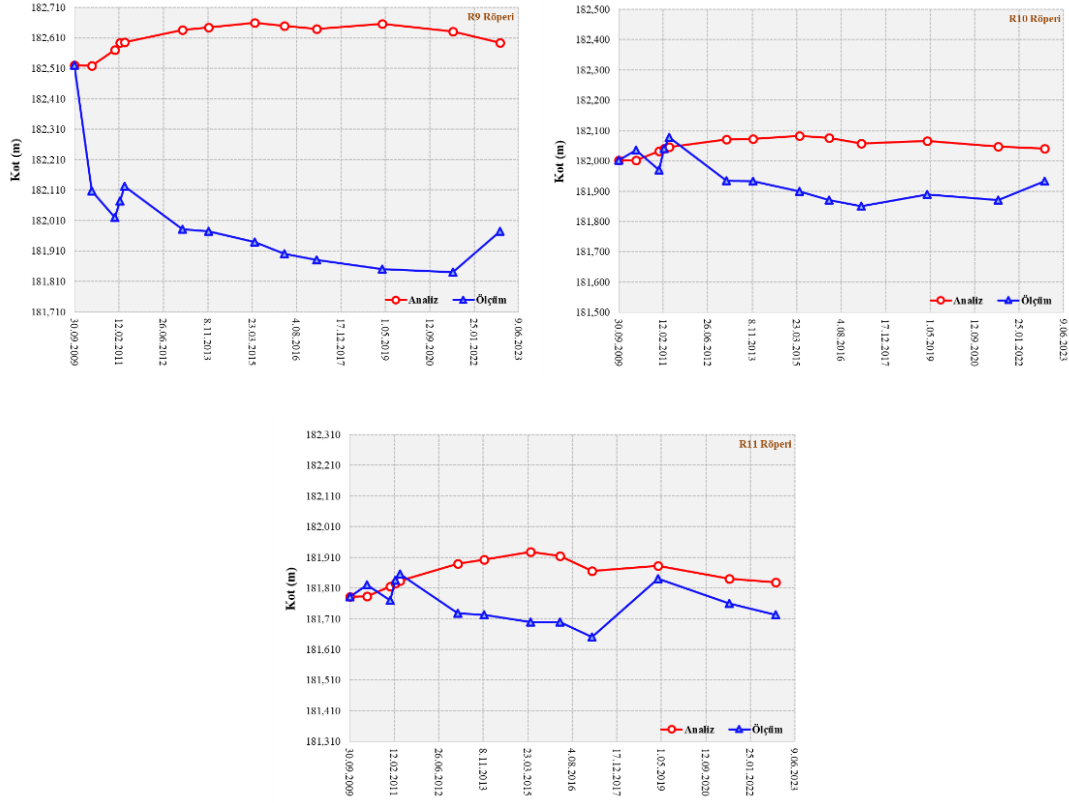
Tablo 4.21 ve Şekil 4.27’den görüldüğü üzere R3, R4 ve R5 röperlerinde 30.09.2009 tarihli ilk referans okuma tarihinden 09.11.2022 tarihine kadar düşey yer değiştirmelerin azalış şeklinde devam etmesi oturmaların devam ettiğini göstermektedir. Ölçüm değerlerinin su seviyesi ile ilişkisi oturmaların devam etmesi nedeniyle net şekilde anlaşılammış olup, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

Alet merkezleme röperi (AMR) 3 hattı üzerinde olan R9, R10 ve R11 röperlerine ait düşey yerdeğişimler için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.22’ de, grafikler Şekil 4.28’ de verilmiştir.

Tablo 4.22 ve Şekil 4.28’den görüldüğü üzere R9, R10 ve R11 röperlerinde 30.09.2009 tarihli ilk referans okuma tarihinden 09.11.2022 tarihine kadar düşey yer değiştirmelerin azalış şeklinde devam etmesi oturmaların devam ettiğini göstermektedir. Ölçüm değerlerinin su seviyesi ile ilişkisi oturmaların devam etmesi nedeniyle net şekilde anlaşılammış olup, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir. R11 röperinde 25.09.2013 tarihinde düşey kotun orantısız şekilde artması ve bu tarihten sonraki okuma değerlerinin bu kota bağlı olarak azalması nedeniyle R11 röperinde okuma hataları olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.22. R9, R10 ve R11 röperlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R9		R10		R11	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	182,520	182,520	182,002	182,002	181,782	181,782
13.04.2010	0,00	182,108	182,518	182,035	182,002	181,820	181,783
27.12.2010	108,53	182,020	182,571	181,970	182,032	181,770	181,815
22.02.2011	120,55	182,073	182,594	182,040	182,041	181,835	181,825
18.04.2011	125,55	182,123	182,596	182,077	182,045	181,855	181,833
24.01.2013	154,36	181,981	182,637	181,934	182,071	181,728	181,889
15.11.2013	158,70	181,975	182,644	181,933	182,072	181,722	181,903
21.04.2015	167,01	181,940	182,659	181,900	182,082	181,700	181,928
18.03.2016	162,00	181,900	182,650	181,870	182,076	181,700	181,915
16.03.2017	145,90	181,880	182,639	181,850	182,058	181,650	181,866
25.03.2019	152,80	181,850	182,657	181,890	182,065	181,840	181,882
1.06.2021	134,29	181,840	182,631	181,870	182,048	181,760	181,841
9.11.2022	124,81	181,975	182,593	181,933	182,041	181,722	181,828

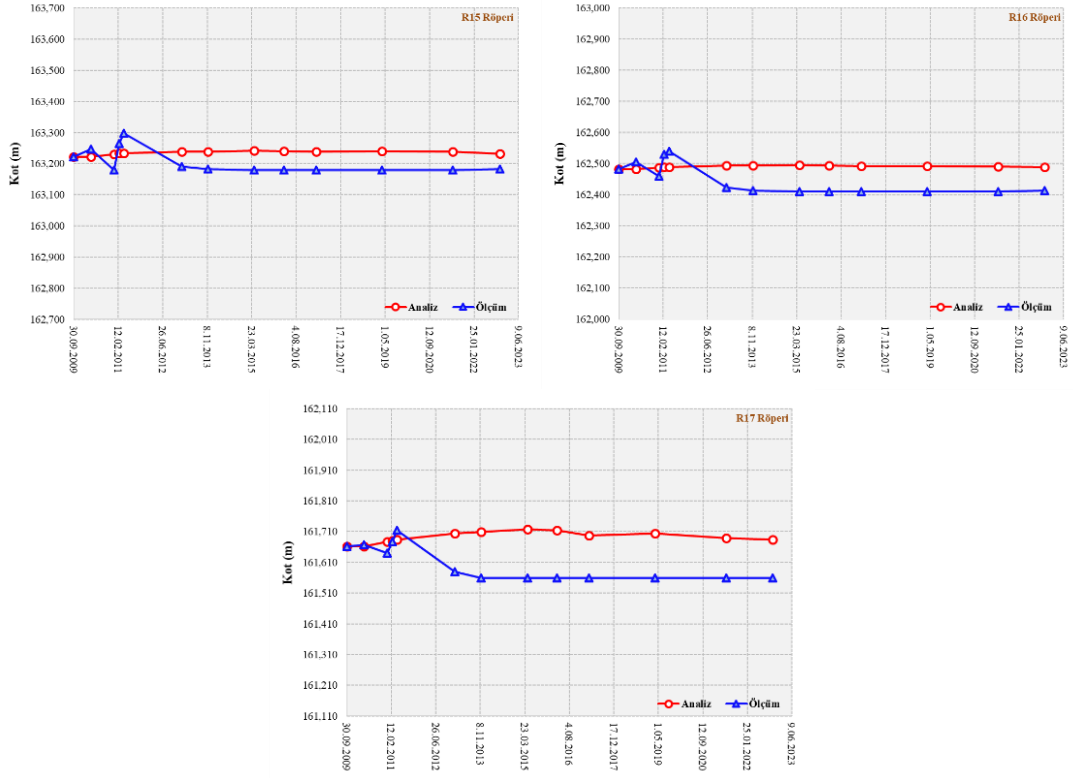


Şekil 4.28. R9, R10 ve R11 röperlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.

Alet merkezleme röperi (AMR) 4 hattı üzerinde olan R15, R16 ve R17 röperlerine ait düşey yerdeğiştirmeler için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.23' te, grafikler Şekil 4.29' da verilmiştir.

Tablo 4.23. R15, R16 ve R17 röperlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R15		R16		R17	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	163,222	163,222	162,482	162,482	161,662	161,662
13.04.2010	0,00	163,247	163,222	162,505	162,482	161,667	161,663
27.12.2010	108,53	163,180	163,230	162,460	162,487	161,640	161,677
22.02.2011	120,55	163,265	163,233	162,529	162,489	161,677	161,681
18.04.2011	125,55	163,297	163,233	162,539	162,489	161,714	161,684
24.01.2013	154,36	163,191	163,238	162,424	162,493	161,580	161,705
15.11.2013	158,70	163,182	163,239	162,414	162,493	161,560	161,710
21.04.2015	167,01	163,180	163,241	162,410	162,495	161,560	161,717
18.03.2016	162,00	163,180	163,240	162,410	162,494	161,560	161,714
16.03.2017	145,90	163,180	163,238	162,410	162,491	161,560	161,698
25.03.2019	152,80	163,180	163,241	162,410	162,492	161,560	161,704
1.06.2021	134,29	163,180	163,238	162,410	162,490	161,560	161,689
9.11.2022	124,81	163,182	163,232	162,414	162,489	161,560	161,684



Şekil 4.29. R15, R16 ve R17 röperlerine ait düşey yer değıştirme grafikleri.

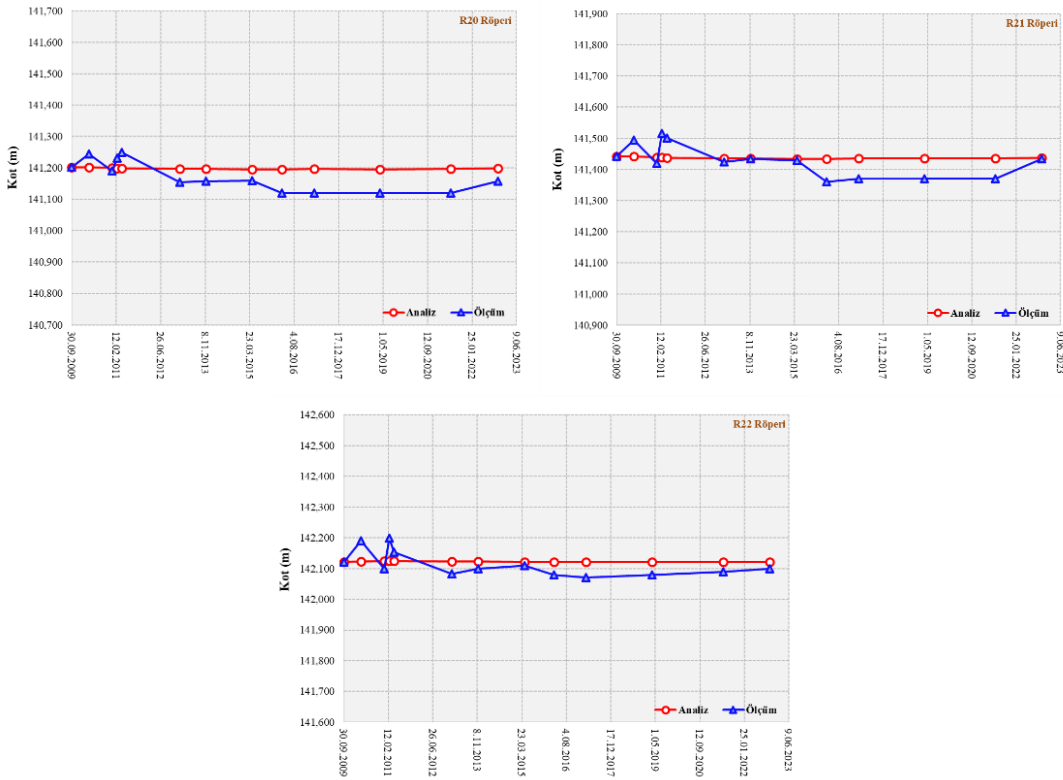
Tablo 4.23 ve Şekil 4.29'dan görüldüğü üzere R15, R16 ve R17 röperlerinde 30.09.2009 tarihli ilk referans okuma tarihinden 15.11.2013 tarihine kadar düşey yer değıştirmelerin azalış şeklinde devam düşünöldüğünden bu tarihe kadar oturmaların devam ettiğı kanaatine varılmıştır. Analiz değeri su seviyesine bağı olarak dinamik değışim göstermiştir.

Alet merkezleme röperi (AMR) 5 hattı üzerinde olan R20, R21 ve R22 röperlerine ait düşey yerdeğıştirmeler için yapılan ölçüm değeri ve analiz sonucu elde edilen değeri Tablo 4.24' te, grafikler Şekil 4.30' da verilmiştir.

Tablo 4.24 ve Şekil 4.30'dan görüldüğü üzere R20, R21 ve R22 röperlerinde 30.09.2009 tarihli ilk referans okuma tarihinden 15.11.2013 tarihine kadar düşey yer değıştirmelerin azalış şeklinde devam düşünöldüğünden bu tarihe kadar oturmaların devam ettiğı kanaatine varılmıştır. Analiz değeri su seviyesine bağı olarak dinamik değışim göstermiştir.

Tablo 4.24. R20, R21 ve R22 röperlerine ait düşey yer değıştirme değeri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R20		R21		R22	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	141,202	141,202	141,442	141,442	142,122	142,122
13.04.2010	0,00	141,245	141,202	141,494	141,442	142,190	142,122
27.12.2010	108,53	141,190	141,200	141,420	141,439	142,100	142,125
22.02.2011	120,55	141,232	141,199	141,516	141,439	142,199	142,125
18.04.2011	125,55	141,249	141,199	141,501	141,438	142,153	142,125
24.01.2013	154,36	141,154	141,197	141,424	141,435	142,082	142,124
15.11.2013	158,70	141,157	141,196	141,434	141,435	142,099	142,123
21.04.2015	167,01	141,160	141,195	141,430	141,434	142,110	142,121
18.03.2016	162,00	141,120	141,196	141,360	141,434	142,080	142,122
16.03.2017	145,90	141,120	141,197	141,370	141,436	142,070	142,122
25.03.2019	152,80	141,120	141,196	141,370	141,435	142,080	142,122
1.06.2021	134,29	141,120	141,197	141,370	141,436	142,090	142,122
9.11.2022	124,81	141,157	141,198	141,434	141,437	142,099	142,121

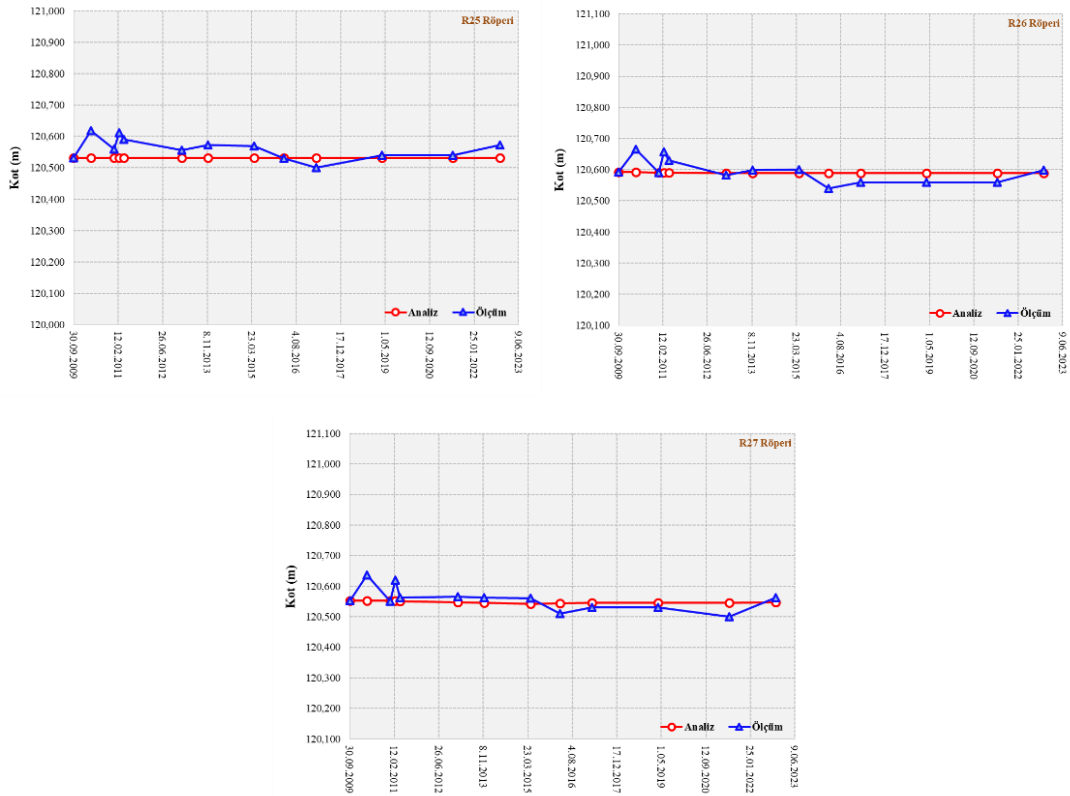


Şekil 4.30. R20, R21 ve R22 röperlerine ait düşey yer değıştirme grafikleri.

Alet merkezleme röperi (AMR) 6 hattı üzerinde olan R25, R26 ve R27 röperlerine ait düşey yerdeğıştirmeler için yapılan ölçüm değeri ve analiz sonucu elde edilen değeri Tablo 4.25' te, grafikler Şekil 4.31' de verilmiştir.

Tablo 4.25. R25, R26 ve R27 röperlerine ait düşey yer değıştirme değeri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R25		R26		R27	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	120,532	120,532	120,592	120,592	120,552	120,552
13.04.2010	0,00	120,618	120,532	120,665	120,592	120,637	120,552
27.12.2010	108,53	120,560	120,532	120,590	120,591	120,550	120,552
22.02.2011	120,55	120,612	120,532	120,657	120,590	120,620	120,552
18.04.2011	125,55	120,591	120,532	120,630	120,590	120,563	120,552
24.01.2013	154,36	120,556	120,532	120,583	120,589	120,566	120,547
15.11.2013	158,70	120,573	120,532	120,598	120,589	120,562	120,545
21.04.2015	167,01	120,570	120,532	120,600	120,588	120,560	120,543
18.03.2016	162,00	120,530	120,532	120,540	120,589	120,510	120,543
16.03.2017	145,90	120,500	120,532	120,560	120,589	120,530	120,545
25.03.2019	152,80	120,540	120,532	120,560	120,589	120,530	120,545
1.06.2021	134,29	120,540	120,532	120,560	120,589	120,500	120,546
9.11.2022	124,81	120,573	120,532	120,598	120,589	120,562	120,547



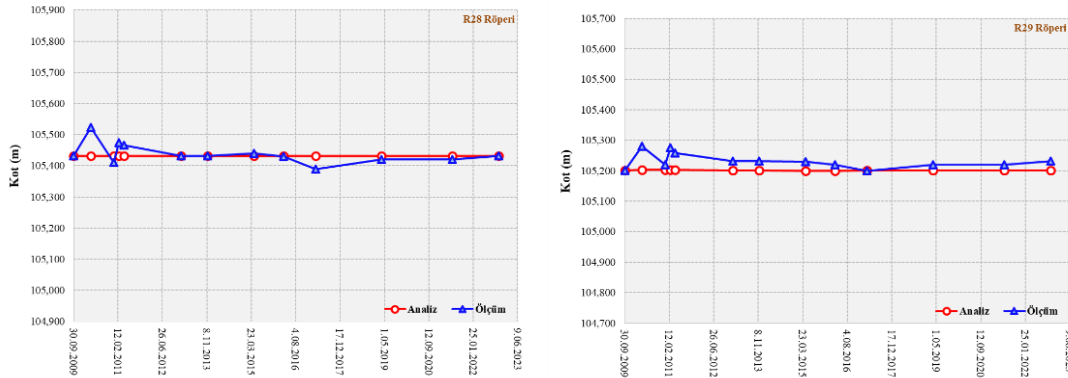
Şekil 4.31. R25, R26 ve R27 röperlerine ait düşey yer değıştirme grafikleri.

Tablo 4.25 ve Şekil 4.31'den görüldüğü üzere R25, R26 ve R27 röperlerinde 30.09.2009 tarihli ilk referans okuma tarihinden 18.03.2016 tarihine kadar olan kotların 30.09.2009 tarihindeki ilk referans okumannın üzerinde olduğu görülmektedir.

Alet merkezleme röperi (AMR) 7 hattı üzerinde olan R28 ve R29 röperlerine ait düşey yerdeğiştirmeler için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.26’ da, grafikler Şekil 4.32’ de verilmiştir.

Tablo 4.26. R28 ve R29 röperlerine ait düşey yer değiştirme değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R28		R29	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	105,432	105,432	105,202	105,202
13.04.2010	0,00	105,523	105,432	105,280	105,202
27.12.2010	108,53	105,410	105,432	105,220	105,203
22.02.2011	120,55	105,474	105,432	105,276	105,203
18.04.2011	125,55	105,466	105,432	105,259	105,203
24.01.2013	154,36	105,432	105,432	105,231	105,201
15.11.2013	158,70	105,432	105,432	105,231	105,201
21.04.2015	167,01	105,440	105,432	105,230	105,200
18.03.2016	162,00	105,430	105,432	105,220	105,200
16.03.2017	145,90	105,390	105,432	105,200	105,201
25.03.2019	152,80	105,420	105,432	105,220	105,200
1.06.2021	134,29	105,420	105,432	105,220	105,201
9.11.2022	124,81	105,432	105,432	105,231	105,201



Şekil 4.32. R28 ve R29 röperlerine ait düşey yer değiştirme grafikleri.

Tablo 4.26 ve Şekil 4.32’den görüldüğü üzere R28 ve R29 röperlerinde 30.09.2009 tarihli ilk referans okuma tarihinden 18.03.2016 tarihine kadar olan kotların 30.09.2009 tarihindeki ilk referans okumanın üzerinde olduğu görülmektedir.

Tüm düşey yer değiştirme ölçüm değerleri incelendiğinde;

Özellikle üst kotlarda bulunan röperlerin 30.09.2009 tarihli referans ilk ölçümden 09.11.2022 tarihine kadar olan düşey ölçümlerindeki kot azalışı barajda oturmaların devam ettiğini göstermektedir.

30.09.2009 tarihli referans ilk ölçüm değeri hariç 14.01.2013 tarihine kadar olan ölçümlerin ve 09.11.2022 tarihli ölçümün su seviyesi ve muhtemel baraj davranışından bağımsız olarak değişmesi, bu tarihe kadar olan okuma değerlerinin hatalı olduğu kanaatine neden olmuştur.

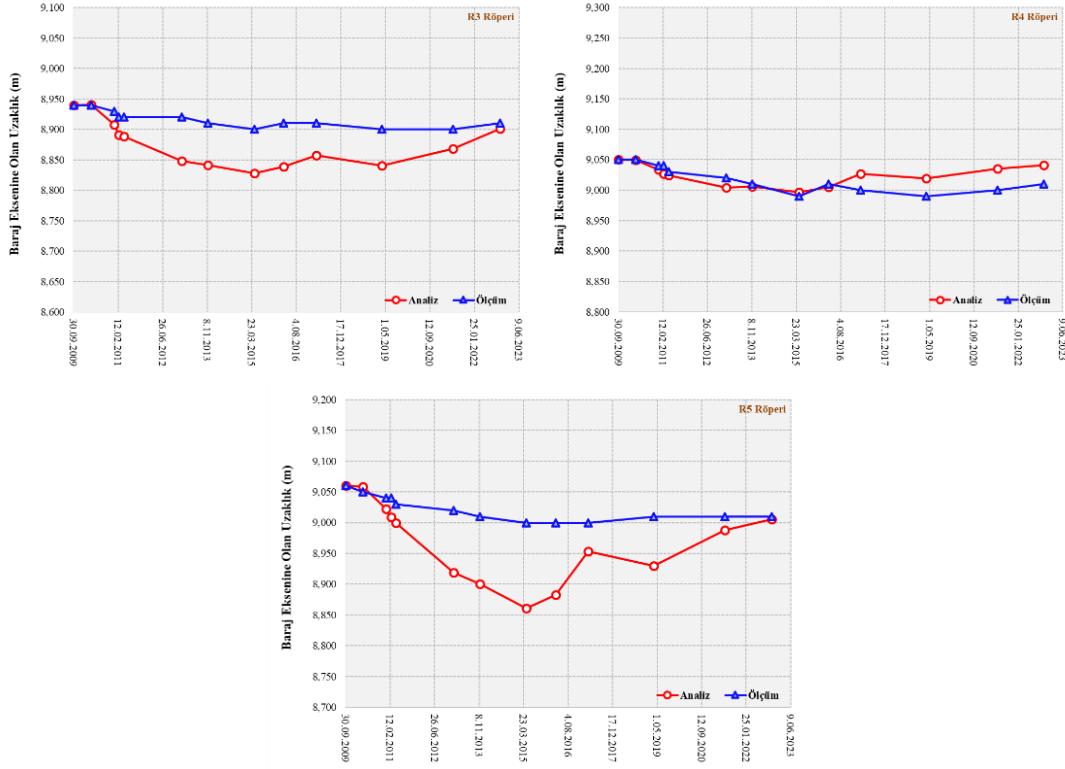
R20, R21, R22, R25, R26, R27, R28, R29 gibi alt kotlarda bulunan röperlerin ölçüm sonuçları ile analiz sonuçları birbirine yakın değerler göstermiştir.

Alet merkezleme röperi (AMR) 2 hattı üzerinde olan R3, R4 ve R5 röperlerine ait baraj eksenine olan uzaklık için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.27’ de, grafikler Şekil 4.33’ te verilmiştir.

Tablo 4.26. R3, R4 ve R5 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R3		R4		R5	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	8,94	8,940	9,05	9,050	9,06	9,060
13.04.2010	0,00	8,94	8,940	9,05	9,050	9,05	9,059
27.12.2010	108,53	8,93	8,908	9,04	9,033	9,04	9,022
22.02.2011	120,55	8,92	8,891	9,04	9,027	9,04	9,009
18.04.2011	125,55	8,92	8,888	9,03	9,025	9,03	8,999
24.01.2013	154,36	8,92	8,848	9,02	9,004	9,02	8,919
15.11.2013	158,70	8,91	8,842	9,01	9,006	9,01	8,900
21.04.2015	167,01	8,90	8,828	8,99	8,996	9,00	8,861
18.03.2016	162,00	8,91	8,839	9,01	9,005	9,00	8,883
16.03.2017	145,90	8,91	8,858	9,00	9,027	9,00	8,953
25.03.2019	152,80	8,90	8,840	8,99	9,020	9,01	8,930
1.06.2021	134,29	8,90	8,868	9,00	9,035	9,01	8,988
9.11.2022	124,81	8,91	8,901	9,01	9,041	9,01	9,006

Tablo 4.27 ve Şekil 4.33’ten görüldüğü üzere R3, R4 ve R5 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri analiz sonucu elde edilen değerlerin altında kalmıştır.



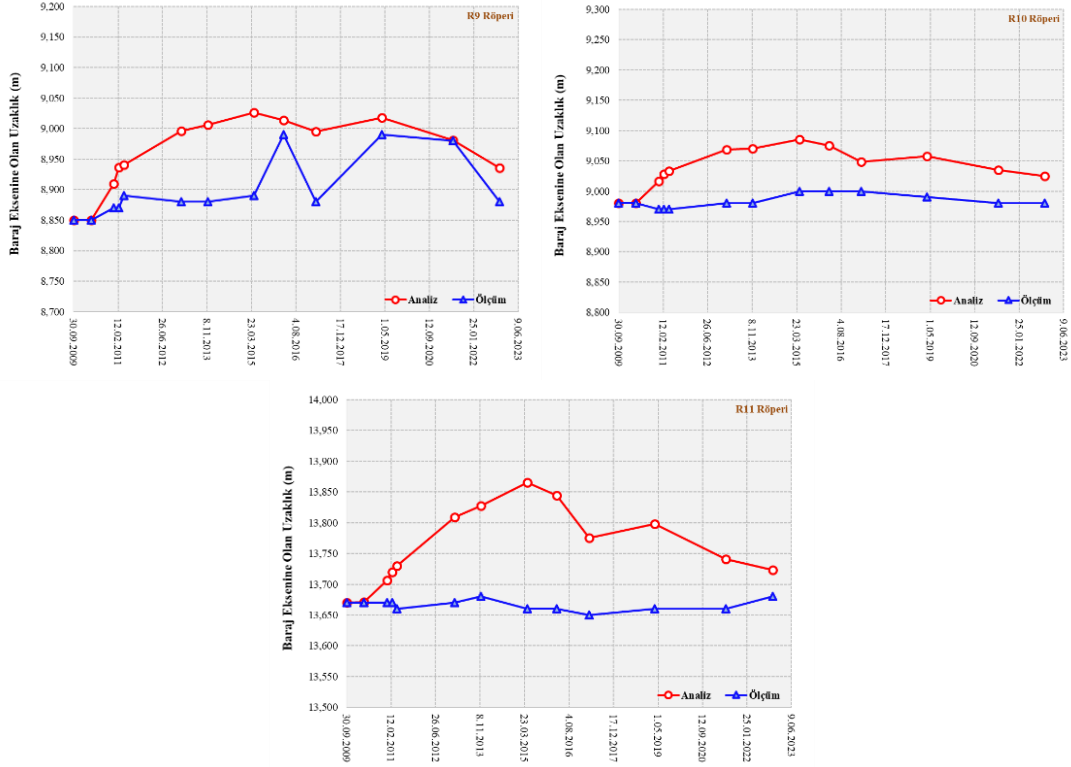
Şekil 4.33. R3, R4 ve R5 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.

Alet merkezleme röperi (AMR) 3 hattı üzerinde olan R9, R10 ve R11 röperlerine ait baraj eksenine olan uzaklık için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.28' te, grafikler Şekil 4.34' te verilmiştir.

Tablo 4.27. R9, R10 ve R11 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R9		R10		R11	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	8,85	8,850	8,98	8,980	13,67	13,670
13.04.2010	0,00	8,85	8,850	8,98	8,980	14,15	13,671
27.12.2010	108,53	8,87	8,909	8,97	9,016	13,67	13,707
22.02.2011	120,55	8,87	8,937	8,97	9,028	13,67	13,720
18.04.2011	125,55	8,89	8,940	8,97	9,033	13,66	13,730
24.01.2013	154,36	8,88	8,996	8,98	9,068	13,67	13,809
15.11.2013	158,70	8,88	9,006	8,98	9,070	13,68	13,827
21.04.2015	167,01	8,89	9,026	9,00	9,086	13,66	13,866
18.03.2016	162,00	8,99	9,013	9,00	9,076	13,66	13,844
16.03.2017	145,90	8,88	8,995	9,00	9,048	13,65	13,775
25.03.2019	152,80	8,99	9,018	8,99	9,058	8,92	13,798
1.06.2021	134,29	8,98	8,981	8,98	9,035	8,92	13,741
9.11.2022	124,81	8,88	8,935	8,98	9,025	13,68	13,724

Tablo 4.28 ve Şekil 4.34'ten görüldüğü üzere R9, R10 ve R11 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri analiz sonucu elde edilen değerlerin altında kalmıştır.



Şekil 4.34. R9, R10 ve R11 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.

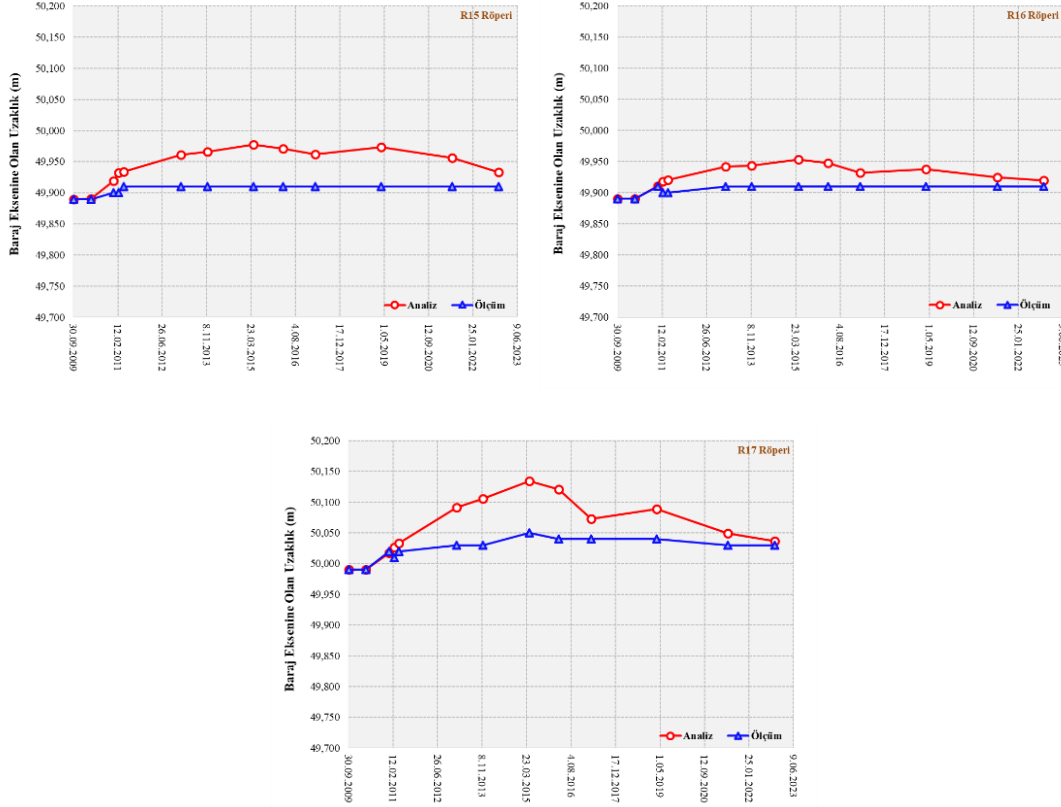
Alet merkezleme röperi (AMR) 4 hattı üzerinde olan R15, R16 ve R17 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.29' da, grafikler Şekil 4.35' te verilmiştir.

Tablo 4.28. R15, R16 ve R17 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R15		R16		R17	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	49,89	49,890	49,89	49,890	49,99	49,990
13.04.2010	0,00	49,89	49,890	49,89	49,890	49,99	49,990
27.12.2010	108,53	49,9	49,919	49,91	49,911	50,02	50,017
22.02.2011	120,55	49,9	49,933	49,90	49,918	50,01	50,026
18.04.2011	125,55	49,91	49,934	49,90	49,921	50,02	50,033
24.01.2013	154,36	49,91	49,961	49,91	49,942	50,03	50,091
15.11.2013	158,70	49,91	49,966	49,91	49,943	50,03	50,106
21.04.2015	167,01	49,91	49,977	49,91	49,953	50,05	50,134
18.03.2016	162,00	49,91	49,971	49,91	49,947	50,04	50,121

Tablo 4.29. (Devamı) R15, R16 ve R17 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R15		R16		R17	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
16.03.2017	145,90	49,91	49,962	49,91	49,932	50,04	50,073
25.03.2019	152,80	49,91	49,973	49,91	49,937	50,04	50,089
1.06.2021	134,29	49,91	49,956	49,91	49,925	50,03	50,049
9.11.2022	124,81	49,91	49,933	49,91	49,919	50,03	50,037



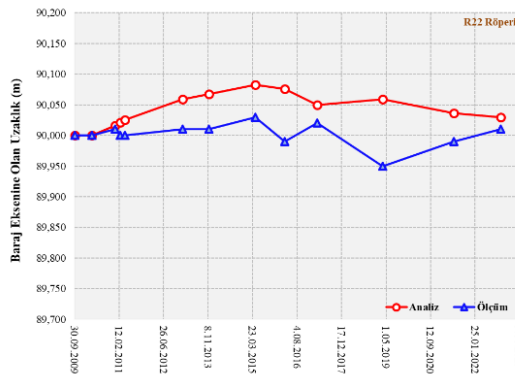
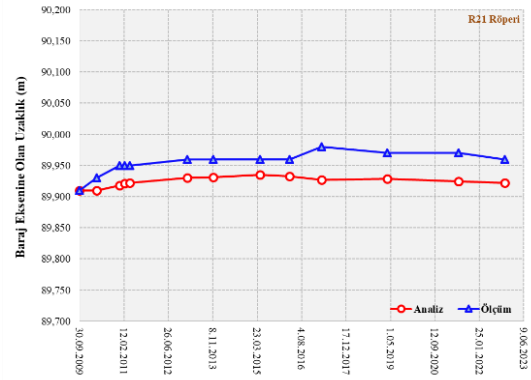
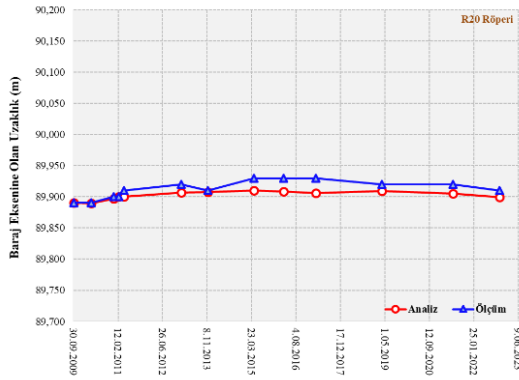
Şekil 4.35. R15, R16 ve R17 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.

Tablo 4.29 ve Şekil 4.35'ten görüldüğü üzere R15, R16 ve R17 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri analiz sonucu elde edilen değerlerin altında kalmıştır. Ayrıca R15 ve R16 röperlerinin 22.02.2011 tarihinden sonraki ölçüm değerlerinin sabit kalması, bu tarihten sonraki okuma değerlerinin hatalı olduğu kanaatine neden olmuştur.

Alet merkezleme röperi (AMR) 5 hattı üzerinde olan R20, R21 ve R22 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.30' da, grafikler Şekil 4.36' da verilmiştir.

Tablo 4.30. R20, R21 ve R22 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R20		R21		R22	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	89,89	89,890	89,91	89,910	90,00	90,000
13.04.2010	0,00	89,89	89,890	89,93	89,910	90,00	90,000
27.12.2010	108,53	89,9	89,897	89,95	89,918	90,01	90,016
22.02.2011	120,55	89,9	89,900	89,95	89,921	90,00	90,022
18.04.2011	125,55	89,91	89,900	89,95	89,922	90,00	90,026
24.01.2013	154,36	89,92	89,907	89,96	89,931	90,01	90,059
15.11.2013	158,70	89,91	89,908	89,96	89,931	90,01	90,067
21.04.2015	167,01	89,93	89,910	89,96	89,935	90,03	90,083
18.03.2016	162,00	89,93	89,909	89,96	89,933	89,99	90,076
16.03.2017	145,90	89,93	89,906	89,98	89,927	90,02	90,050
25.03.2019	152,80	89,92	89,909	89,97	89,929	89,95	90,059
1.06.2021	134,29	89,92	89,905	89,97	89,924	89,99	90,036
9.11.2022	124,81	89,91	89,899	89,96	89,922	90,01	90,029



Şekil 4.36. R20, R21 ve R22 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.

Tablo 4.30 ve Şekil 4.36’den görüldüğü üzere R20 ve R21 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri analiz sonucu elde edilen değerlerin üstünde

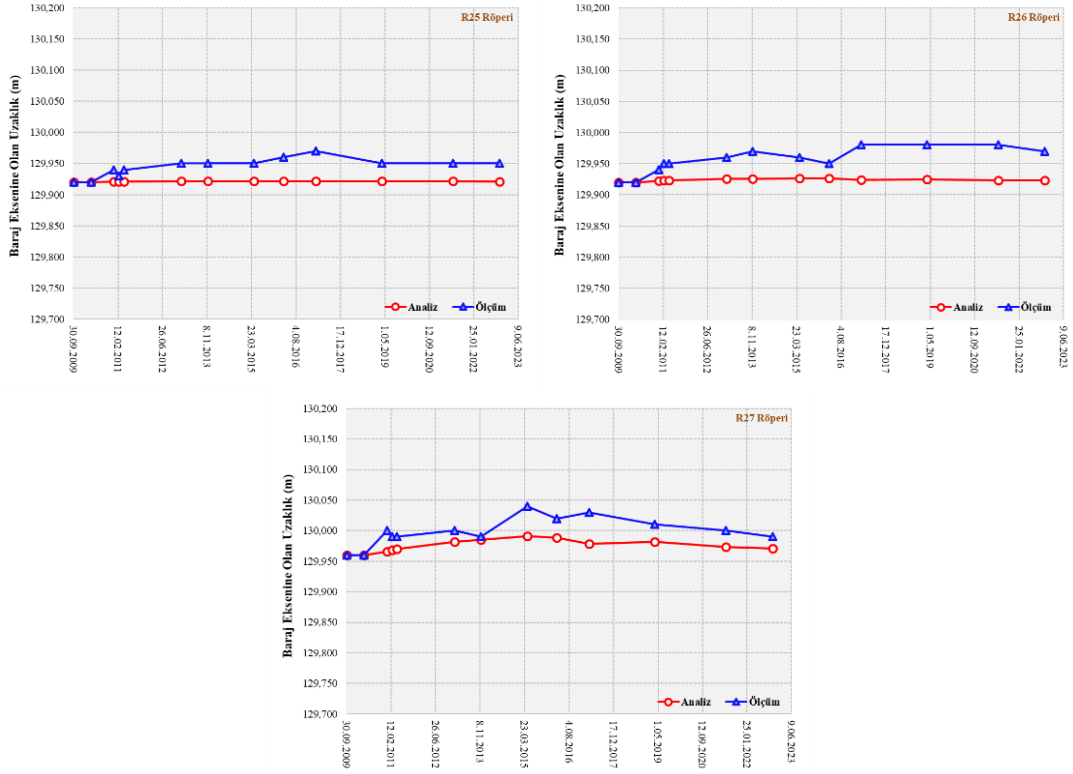
ve R22 röperinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri analiz sonucu elde edilen değerlerin altında kalmıştır.

Alet merkezleme röperi (AMR) 6 hattı üzerinde olan R25, R26 ve R27 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.31’ de, grafikler Şekil 4.37’ de verilmiştir.

Tablo 4.31. R25, R26 ve R27 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R25		R26		R27	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	129,92	129,920	129,92	129,920	129,96	129,960
13.04.2010	0,00	129,92	129,920	129,92	129,920	129,96	129,960
27.12.2010	108,53	129,94	129,921	129,94	129,922	130,00	129,966
22.02.2011	120,55	129,93	129,921	129,95	129,923	129,99	129,968
18.04.2011	125,55	129,94	129,921	129,95	129,923	129,99	129,970
24.01.2013	154,36	129,95	129,922	129,96	129,925	130,00	129,982
15.11.2013	158,70	129,95	129,922	129,97	129,926	129,99	129,985
21.04.2015	167,01	129,95	129,922	129,96	129,927	130,04	129,991
18.03.2016	162,00	129,96	129,922	129,95	129,926	130,02	129,988
16.03.2017	145,90	129,97	129,922	129,98	129,924	130,03	129,978
25.03.2019	152,80	129,95	129,922	129,98	129,925	130,01	129,982
1.06.2021	134,29	129,95	129,921	129,98	129,924	130,00	129,973
9.11.2022	124,81	129,95	129,921	129,97	129,923	129,99	129,971

Tablo 4.31 ve Şekil 4.37’den görüldüğü üzere R25, R26 ve R27 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri analiz sonucu elde edilen değerlerin üstünde kalmıştır.

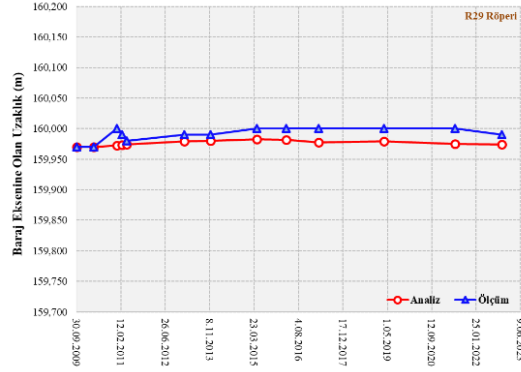
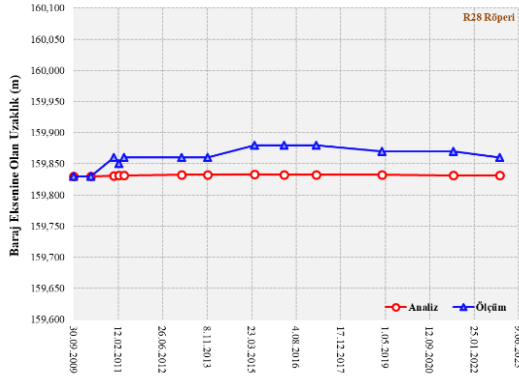


Şekil 4.37. R25, R26 ve R27 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.

Alet merkezleme röperi (AMR) 7 hattı üzerinde olan R28 ve R29 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.32’ da, grafikler Şekil 4.38’ da verilmiştir.

Tablo 4.32. R28 ve R29 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Kotu (m)	R28		R29	
		Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)	Ölçüm Değeri (m)	Analiz Sonucu (m)
30.09.2009	0,00	159,83	159,830	159,97	159,970
13.04.2010	0,00	159,83	159,830	159,97	159,970
27.12.2010	108,53	159,86	159,831	160,00	159,973
22.02.2011	120,55	159,85	159,831	159,99	159,973
18.04.2011	125,55	159,86	159,831	159,98	159,974
24.01.2013	154,36	159,86	159,832	159,99	159,979
15.11.2013	158,70	159,86	159,833	159,99	159,980
21.04.2015	167,01	159,88	159,833	160,00	159,983
18.03.2016	162,00	159,88	159,833	160,00	159,982
16.03.2017	145,90	159,88	159,832	160,00	159,978
25.03.2019	152,80	159,87	159,832	160,00	159,979
1.06.2021	134,29	159,87	159,832	160,00	159,975
9.11.2022	124,81	159,86	159,831	159,99	159,974



Şekil 4.38. R28 ve R29 röperlerinde baraj eksenine olan uzaklık değişimi grafikleri.

Tablo 4.32 ve Şekil 4.38’den görüldüğü üzere R28 ve R29 röperlerinin baraj eksenine olan uzaklığı için yapılan ölçüm değerleri analiz sonucu elde edilen değerlerin üstünde kalmıştır.

Tüm yatay yer değiştirme ölçüm değerleri incelendiğinde; hatalı olduğu düşünülen röper ölçümlerinin genel itibariyle aynı tarihlerde olduğu ve tüm röperlere ait analiz değerlerinin su seviyesine bağlı olarak dinamik şekilde değişim gösterdiği dikkati çekmiştir.

4.11.2. Piyezometrelere ait analiz sonuçları ile baraj ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması ve değerlendirilmesi

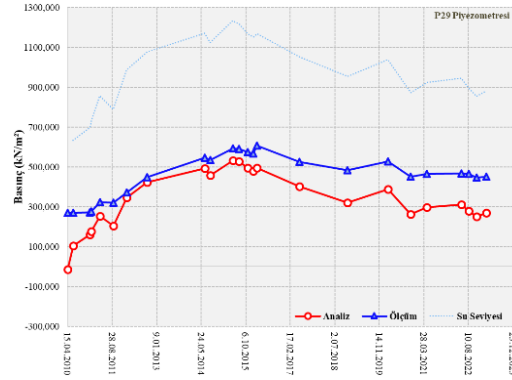
76 m kotu ve baraj ekseninde olan P29 dolgu tipi piyezometreye ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.33’ te, grafik Şekil 4.39’ de verilmiştir.

Tablo 4.33. P29 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	269,182	-13,305
15.06.2010	100,00	270,014	103,581
21.12.2010	107,38	272,719	159,598
6.01.2011	111,24	276,777	176,210
12.04.2011	125,23	322,749	252,550
9.09.2011	117,50	319,629	204,360
8.02.2012	139,80	372,591	346,335
26.09.2012	150,00	448,004	421,692
3.07.2014	160,50	545,806	493,654
2.09.2014	155,16	533,838	458,551
15.05.2015	167,53	591,464	533,020
22.07.2015	165,55	589,205	526,480
27.10.2015	160,16	572,870	494,964

Tablo 4.33. (Devamı) P29 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
30.12.2015	158,24	567,477	479,013
9.02.2016	160,22	607,424	495,562
31.05.2017	147,07	525,297	400,908
22.11.2018	136,06	483,387	319,815
19.02.2020	145,63	526,612	388,919
31.10.2020	126,98	451,747	263,510
2.05.2021	132,70	464,832	297,030
21.05.2022	135,01	467,310	312,023
13.08.2022	129,51	465,788	278,289
8.11.2022	124,83	446,179	251,096
1.03.2023	128,04	451,157	269,291



Şekil 4.39. P29 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

Tablo 4.33 ve Şekil 4.39’ dan görüldüğü üzere P29 piyezometresine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

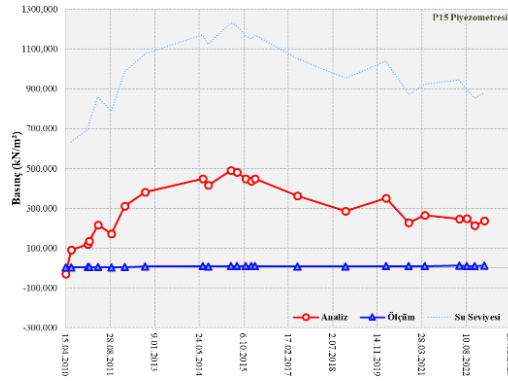
78 m kotu ve baraj ekseninde olan P15 dolgu tipi piyezometreye ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.34’ te, grafik Şekil 4.40’ ta verilmiştir.

Tablo 4.34. P15 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	1,898	-30,882
15.06.2010	100,00	2,462	88,753
21.12.2010	107,38	2,872	116,783
6.01.2011	111,24	2,821	135,142
12.04.2011	125,23	3,693	214,872
9.09.2011	117,50	2,103	170,209
8.02.2012	139,80	4,513	310,458
26.09.2012	150,00	7,080	379,844

Tablo 4.29. (Devamı) P15 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
3.07.2014	160,50	7,539	448,420
2.09.2014	155,16	6,528	414,810
15.05.2015	167,53	8,052	488,802
22.07.2015	165,55	7,539	480,783
27.10.2015	160,16	7,539	447,806
30.12.2015	158,24	8,549	435,622
9.02.2016	160,22	9,062	446,896
31.05.2017	147,07	5,548	361,028
22.11.2018	136,06	6,498	286,176
19.02.2020	145,63	9,062	351,114
31.10.2020	126,98	8,052	226,605
2.05.2021	132,70	9,575	265,265
21.05.2022	135,01	10,088	246,550
13.08.2022	129,51	9,108	246,785
8.11.2022	124,83	9,062	213,317
1.03.2023	128,04	10,103	235,862



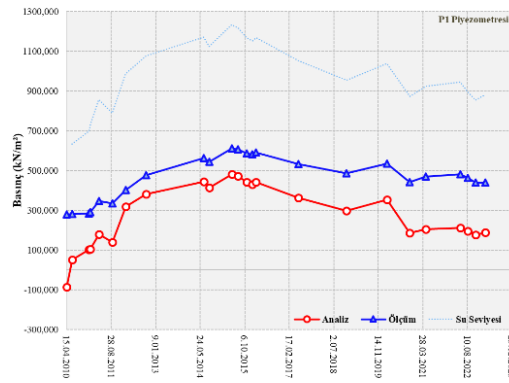
Şekil 4.40. P15 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

Tablo 4.34 ve Şekil 4.40'tan görüldüğü üzere P15 dolgu tipi eksen piyezometresindeki ölçüm değerleri olması gereken değerlerin altındadır. Bu nedenle P15 dolgu tipi eksen piyezometresinin arızalı olduğu düşünülmektedir.

85 m kotu ve baraj ekseninde olan P1 dolgu tipi piyezometreye ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.35'te, grafik Şekil 4.41'de verilmiştir.

Tablo 4.35. P1 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	279,317	-85,684
15.06.2010	100,00	281,410	49,766
21.12.2010	107,38	284,130	103,104
6.01.2011	111,24	289,936	104,156
12.04.2011	125,23	346,694	177,576
9.09.2011	117,50	333,982	139,146
8.02.2012	139,80	401,526	317,345
26.09.2012	150,00	477,268	379,853
3.07.2014	160,50	561,823	443,309
2.09.2014	155,16	544,012	413,201
15.05.2015	167,53	611,004	481,203
22.07.2015	165,55	606,805	472,757
27.10.2015	160,16	586,407	442,076
30.12.2015	158,24	580,119	430,801
9.02.2016	160,22	589,561	440,346
31.05.2017	147,07	531,468	363,396
22.11.2018	136,06	484,905	296,374
19.02.2020	145,63	534,098	354,265
31.10.2020	126,98	440,934	185,594
2.05.2021	132,70	470,306	204,387
21.05.2022	135,01	481,879	211,358
13.08.2022	129,51	461,843	194,200
8.11.2022	124,83	438,304	177,121
1.03.2023	128,04	439,928	188,843



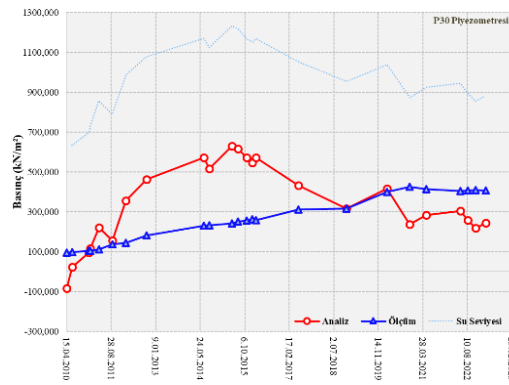
Şekil 4.41. P1 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

Tablo 4.35 ve Şekil 4.41’ den görüldüğü üzere P1 piyezometresine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

85 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 20 m mesafede olan P30 dolgu tipi piyezometreye ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.36’ da, grafik Şekil 4.42’ da verilmiştir.

Tablo 4.36. P30 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	95,216	-84,361
15.06.2010	100,00	97,801	22,579
21.12.2010	107,38	104,014	94,196
6.01.2011	111,24	103,964	116,790
12.04.2011	125,23	111,866	221,473
9.09.2011	117,50	136,850	154,765
8.02.2012	139,80	144,782	354,691
26.09.2012	150,00	179,938	462,182
3.07.2014	160,50	229,367	572,270
2.09.2014	155,16	231,911	515,997
15.05.2015	167,53	241,782	628,911
22.07.2015	165,55	250,750	615,729
27.10.2015	160,16	255,746	571,280
30.12.2015	158,24	261,628	546,426
9.02.2016	160,22	258,442	571,491
31.05.2017	147,07	310,925	433,148
22.11.2018	136,06	316,806	315,984
19.02.2020	145,63	400,119	417,009
31.10.2020	126,98	424,511	236,375
2.05.2021	132,70	414,695	283,604
21.05.2022	135,01	404,191	304,870
13.08.2022	129,51	407,530	257,039
8.11.2022	124,83	409,558	219,098
1.03.2023	128,04	407,663	244,610



Şekil 4.42. P30 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

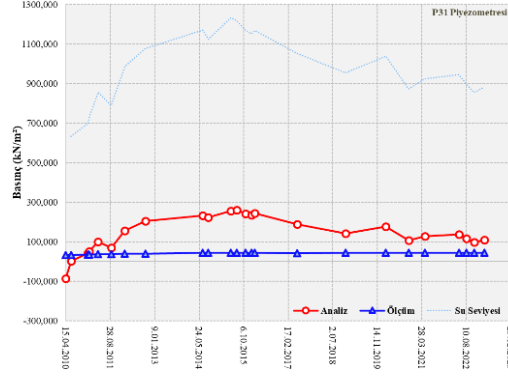
Tablo 4.36 ve Şekil 4.42’ den görüldüğü üzere P30 piyezometresine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesinden bağımsız, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

85 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 20 m mesafede olan P31 dolgu tipi piyezometreye ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.24’ te, grafik Şekil 4.31’ de verilmiştir.

Tablo 4.37. P31 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	31,137	-85,200
15.06.2010	100,00	32,379	2,534
21.12.2010	107,38	34,017	40,464
6.01.2011	111,24	34,712	50,897
12.04.2011	125,23	36,698	98,786
9.09.2011	117,50	37,634	68,683
8.02.2012	139,80	38,678	155,490
26.09.2012	150,00	39,926	204,422
3.07.2014	160,50	43,550	232,472
2.09.2014	155,16	43,550	223,651
15.05.2015	167,53	44,047	255,484
22.07.2015	165,55	44,047	261,070
27.10.2015	160,16	44,543	240,762
30.12.2015	158,24	44,543	234,233
9.02.2016	160,22	44,062	244,020
31.05.2017	147,07	42,137	187,965
22.11.2018	136,06	43,550	140,706
19.02.2020	145,63	44,047	177,392
31.10.2020	126,98	44,047	106,019
2.05.2021	132,70	44,528	126,776
21.05.2022	135,01	44,543	135,875
13.08.2022	129,51	44,543	115,466
8.11.2022	124,83	44,543	98,278
1.03.2023	128,04	44,543	109,565

Tablo 4.37 ve Şekil 4.43’ ten görüldüğü üzere P31 piyezometresine ait analiz değerleri genel itibariyle ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim göstermezken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

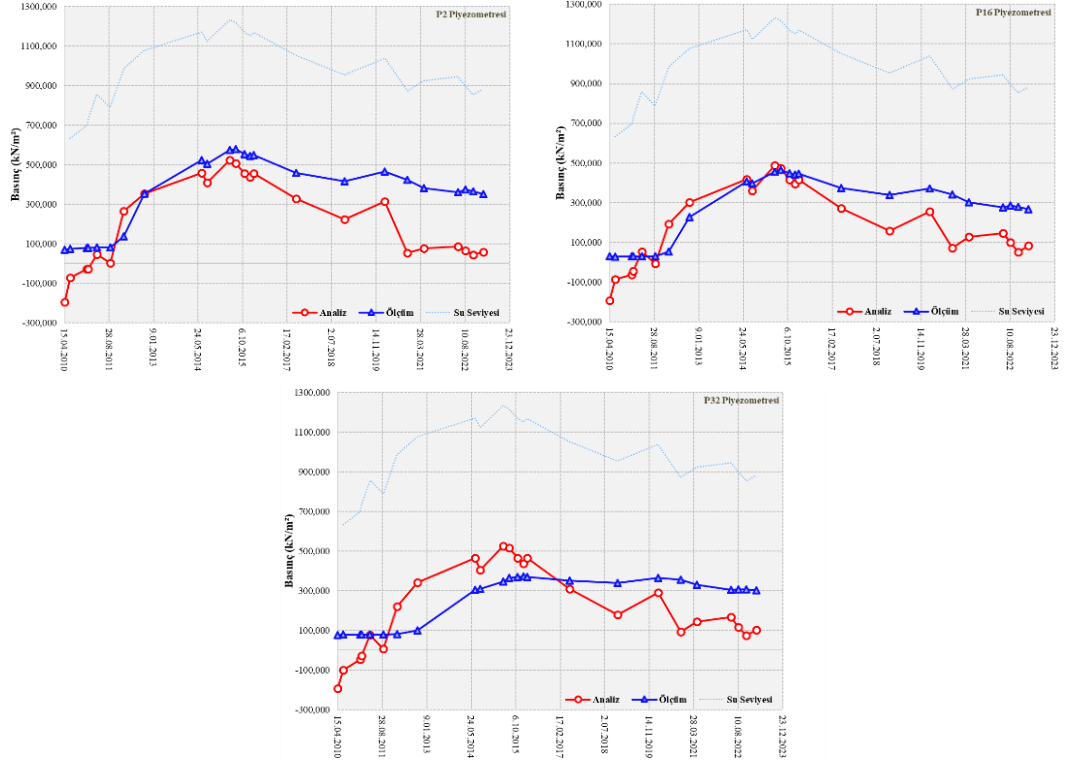


Şekil 4.43. P31 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

100 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 20 m mesafede olan P2, P16 ve P32 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.38’ te, grafikler Şekil 4.44’ de verilmiştir.

Tablo 4.38. P2, P16 ve P32 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P2		P16		P32	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	69,025	-194,577	28,437	-193,670	75,860	-193,033
15.06.2010	100,00	74,330	-73,270	27,733	-86,247	77,918	-100,823
21.12.2010	107,38	79,197	-29,164	28,512	-63,604	78,248	-46,061
6.01.2011	111,24	79,306	-29,303	28,616	-45,671	78,578	-28,376
12.04.2011	125,23	80,017	45,189	29,447	53,295	79,073	76,399
9.09.2011	117,50	81,548	2,906	30,485	-8,687	79,788	6,284
8.02.2012	139,80	137,487	265,546	52,760	193,193	80,834	221,522
26.09.2012	150,00	352,504	354,054	226,006	301,077	99,153	342,289
3.07.2014	160,50	523,737	458,258	406,638	417,629	303,834	464,571
2.09.2014	155,16	505,171	407,758	396,800	359,798	309,328	403,366
15.05.2015	167,53	573,969	521,782	453,854	488,071	346,137	526,239
22.07.2015	165,55	578,882	506,932	464,103	473,863	364,265	515,190
27.10.2015	160,16	553,222	455,888	447,539	416,071	369,757	465,793
30.12.2015	158,24	543,940	437,299	441,327	394,938	370,856	437,106
9.02.2016	160,22	547,762	454,382	444,433	414,591	370,307	465,757
31.05.2017	147,07	457,659	327,876	374,012	271,488	349,983	309,722
22.11.2018	136,06	416,694	223,937	338,270	156,918	340,095	179,453
19.02.2020	145,63	463,667	313,522	370,387	255,769	363,715	290,863
31.10.2020	126,98	422,156	54,332	340,342	70,164	356,025	93,100
2.05.2021	132,70	381,186	76,679	301,999	126,102	329,657	143,738
21.05.2022	135,01	360,972	85,260	276,604	146,675	303,834	167,054
13.08.2022	129,51	374,084	64,322	284,897	99,391	306,031	115,294
8.11.2022	124,83	365,343	44,375	279,195	51,202	306,031	74,434
1.03.2023	128,04	350,591	58,053	267,274	83,483	301,086	101,587



Şekil 4.44. P2, P16 ve P32 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

Tablo 4.38 ve Şekil 4.44' ten görüldüğü üzere P2, P16 ve P32 piyezometrelerine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir. Ölçüm değerleri özellikle 08.02.2012 tarihinden sonra büyük artış göstermiştir.

100 m kotu ve baraj ekseninde olan P3, P17 ve P33 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.39' da, grafikler Şekil 4.45' te verilmiştir.

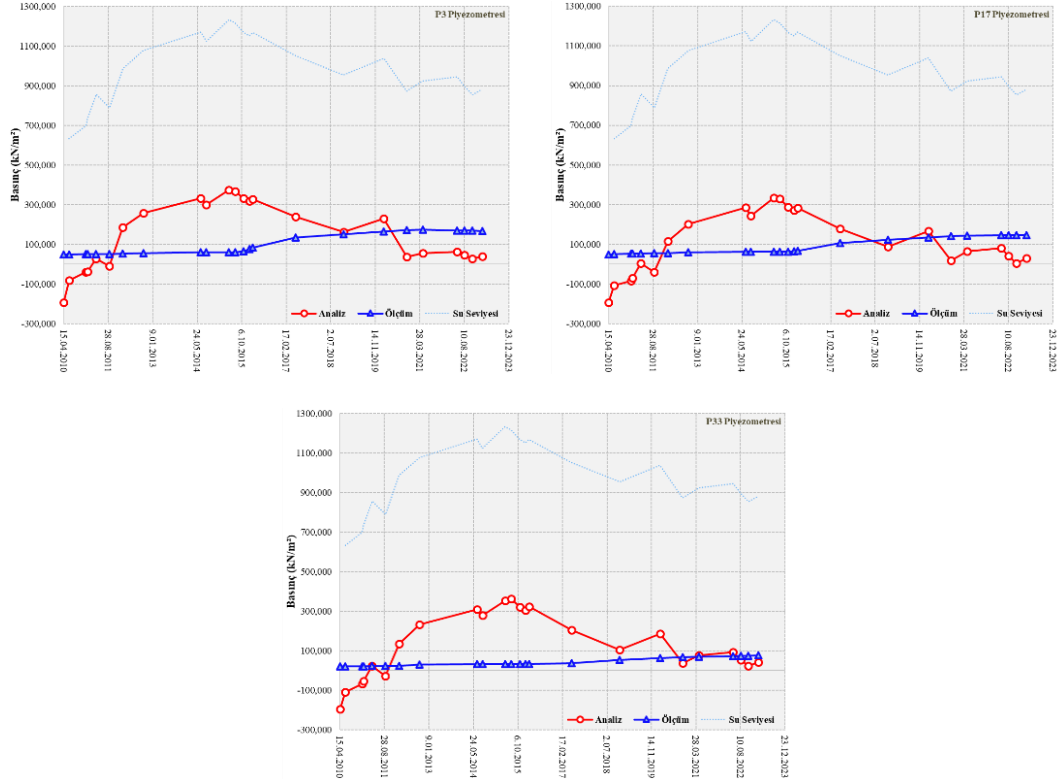
Tablo 4.39. P3, P17 ve P33 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P3		P17		P33	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	47,495	-194,299	48,844	-194,954	19,580	-194,576
15.06.2010	100,00	49,586	-81,300	51,272	-108,283	20,424	-110,618
21.12.2010	107,38	50,198	-39,100	52,081	-84,061	21,319	-67,830
6.01.2011	111,24	50,249	-38,280	52,243	-69,471	21,369	-53,998
12.04.2011	125,23	50,811	28,328	52,945	4,590	22,015	22,540

Tablo 4.39. (Devamı) P3, P17 ve P33 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P3		P17		P33	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
9.09.2011	117,50	51,933	-9,548	54,132	-39,637	22,114	-28,153
8.02.2012	139,80	52,800	186,597	55,157	116,294	23,555	134,201
26.09.2012	150,00	55,555	258,759	58,772	200,708	29,469	232,489
3.07.2014	160,50	59,737	332,001	62,818	284,334	32,153	308,691
2.09.2014	155,16	59,737	298,645	62,818	242,388	31,656	279,667
15.05.2015	167,53	59,227	373,411	62,818	332,792	31,159	353,773
22.07.2015	165,55	59,227	366,732	62,818	329,751	31,159	362,365
27.10.2015	160,16	64,328	331,283	62,818	287,842	31,159	321,553
30.12.2015	158,24	77,081	318,112	64,437	271,506	31,159	303,449
9.02.2016	160,22	84,222	326,691	66,055	283,519	31,159	323,297
31.05.2017	147,07	134,206	240,254	107,050	178,119	36,129	203,708
22.11.2018	136,06	151,036	162,932	121,610	88,073	53,523	103,377
19.02.2020	145,63	164,295	229,538	134,551	165,953	61,972	185,252
31.10.2020	126,98	171,435	36,913	139,942	18,742	67,439	36,432
2.05.2021	132,70	172,965	55,716	142,638	63,155	69,427	75,356
21.05.2022	135,01	170,415	62,811	144,795	79,725	72,906	93,575
13.08.2022	129,51	169,395	45,318	144,795	41,876	73,403	53,665
8.11.2022	124,83	168,885	28,043	144,795	3,420	74,398	21,931
1.03.2023	128,04	167,865	39,878	144,795	29,007	75,392	42,583

Tablo 4.39 ve Şekil 4.45' ten görüldüğü üzere P3, P17 ve P33 piyezometrelerine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir. Ölçüm değerleri özellikle 30.12.2015 tarihinden sonra büyük artış göstermiştir.



Şekil 4.45. P3, P17 ve P33 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

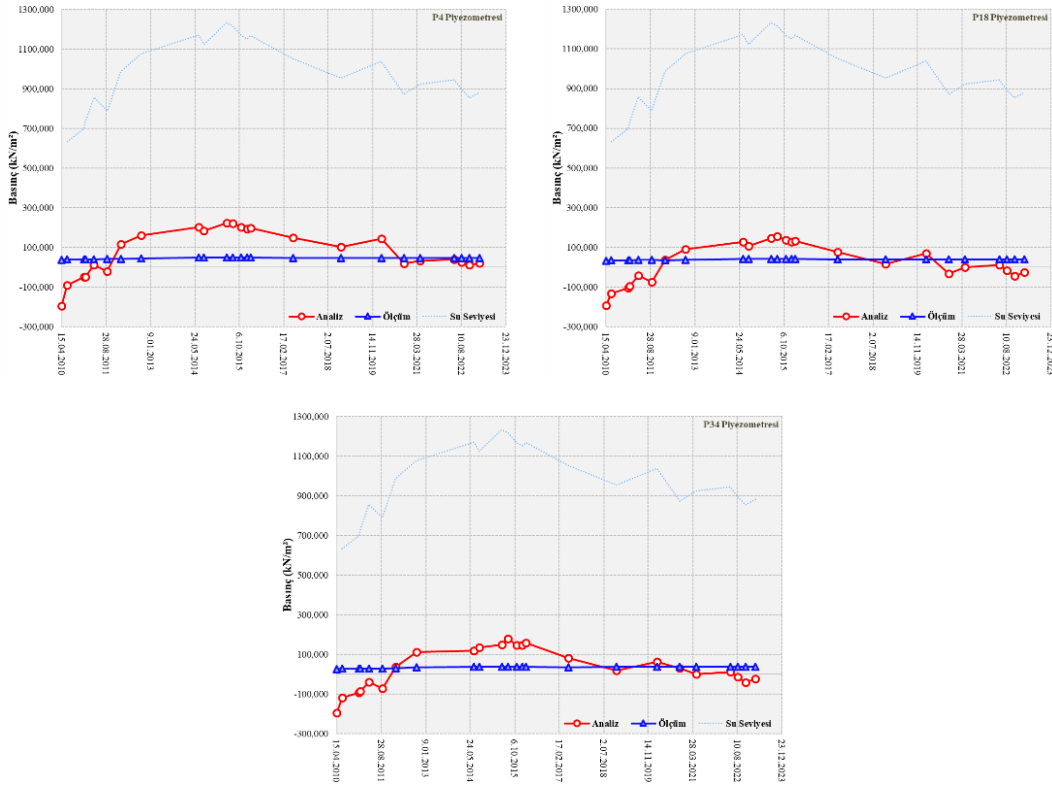
100 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 20 m mesafede olan P4, P18 ve P34 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.40' ta, grafikler Şekil 4.46' da verilmiştir.

Tablo 4.40. P4, P18 ve P34 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P4		P18		P34	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	37,133	-194,653	31,663	-194,593	24,648	-194,837
15.06.2010	100,00	38,143	-90,161	33,753	-133,622	26,955	-119,320
21.12.2010	107,38	38,782	-50,187	34,773	-105,830	27,057	-94,107
6.01.2011	111,24	38,888	-49,064	34,874	-95,533	27,467	-86,702
12.04.2011	125,23	39,420	10,956	35,486	-43,187	27,980	-39,852
9.09.2011	117,50	40,643	-22,210	36,455	-74,531	28,389	-72,862
8.02.2012	139,80	41,654	116,946	33,243	36,323	29,773	37,855
26.09.2012	150,00	44,685	160,176	36,149	89,941	34,591	111,611
3.07.2014	160,50	47,770	201,360	41,144	127,559	36,692	118,817
2.09.2014	155,16	47,770	183,105	41,144	106,989	36,692	134,590
15.05.2015	167,53	47,770	223,779	40,635	146,189	36,692	149,147
22.07.2015	165,55	47,770	220,383	40,635	154,937	36,692	179,647
27.10.2015	160,16	47,770	200,976	41,144	135,685	37,205	147,175

Tablo 4.30. (Devamı) P4, P18 ve P34 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P4		P18		P34	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
30.12.2015	158,24	47,770	193,763	40,635	126,170	37,205	145,218
9.02.2016	160,22	47,770	197,710	40,635	131,295	37,205	157,575
31.05.2017	147,07	45,111	149,041	38,086	75,693	35,667	81,259
22.11.2018	136,06	46,174	101,332	38,596	16,042	36,180	18,523
19.02.2020	145,63	46,706	142,771	38,596	68,942	36,692	62,683
31.10.2020	126,98	46,706	17,194	38,596	-34,003	36,180	29,374
2.05.2021	132,70	46,706	33,147	38,596	-1,594	36,692	0,382
21.05.2022	135,01	46,706	38,597	38,596	10,287	36,692	11,969
13.08.2022	129,51	46,706	24,705	38,596	-16,796	36,692	-15,147
8.11.2022	124,83	46,706	10,198	38,596	-44,492	36,692	-41,058
1.03.2023	128,04	47,238	20,352	38,596	-25,889	37,205	-23,379



Şekil 4.46. P4, P18 ve P34 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

Tablo 4.40 ve Şekil 4.46' dan görüldüğü üzere P4, P18 ve P34 piyezometrelerine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. P4 ve P34 piyezometrelerinin ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken P18 piyezometresi su

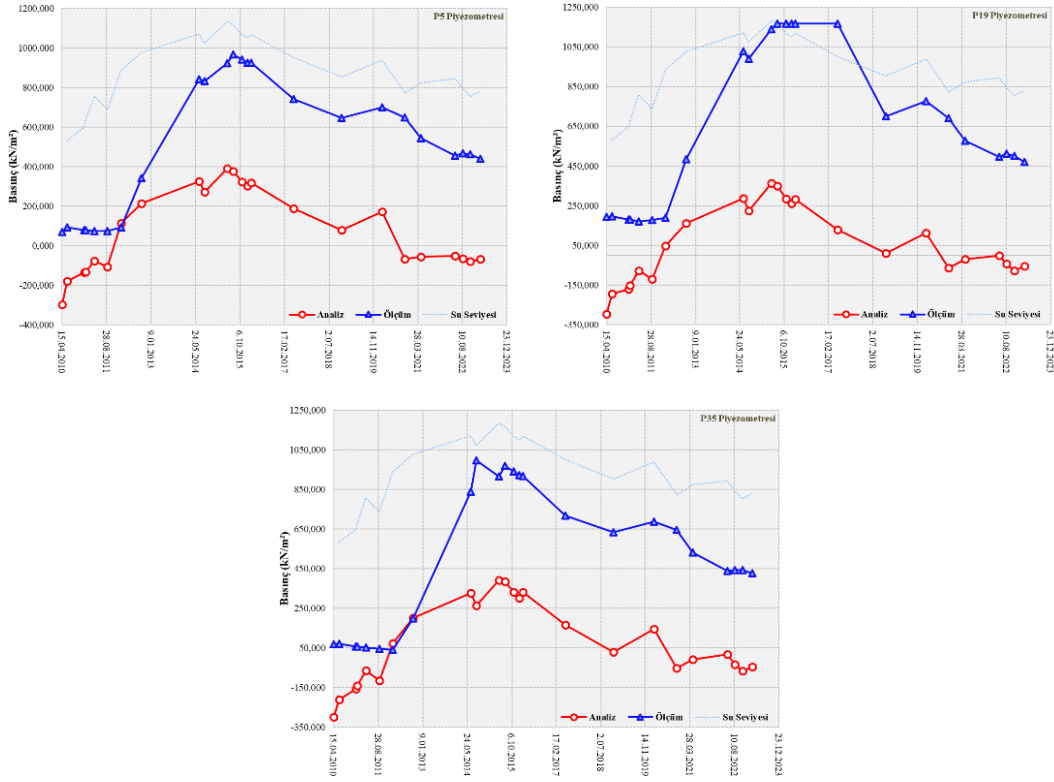
seviyesinden bağımsız değişim göstermiş, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

115 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 15 m mesafede olan P5, P19 ve P35 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.41’ de, grafikler Şekil 4.47’ de verilmiştir.

Tablo 4.31. P5, P19 ve P35 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P5		P19		P35	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	69,802	-297,293	193,605	-296,784	70,349	-297,277
15.06.2010	100,00	91,790	-180,114	196,118	-193,969	70,677	-208,765
21.12.2010	107,38	78,499	-134,039	179,507	-170,850	58,261	-156,026
6.01.2011	111,24	78,116	-132,670	178,305	-154,136	57,495	-140,205
12.04.2011	125,23	74,178	-77,669	171,091	-78,187	53,119	-63,834
9.09.2011	117,50	75,162	-106,537	177,922	-121,574	46,992	-113,507
8.02.2012	139,80	93,212	112,462	188,250	47,284	42,561	74,177
26.09.2012	150,00	340,867	214,174	484,046	160,344	200,554	200,974
3.07.2014	160,50	841,935	324,066	1027,619	285,252	839,480	327,858
2.09.2014	155,16	832,661	271,309	991,110	222,568	996,554	265,777
15.05.2015	167,53	923,755	390,033	1140,384	362,514	914,755	391,550
22.07.2015	165,55	967,928	376,586	1168,160	348,820	969,290	384,610
27.10.2015	160,16	941,752	321,913	1168,160	284,756	942,024	331,991
30.12.2015	158,24	925,936	302,093	1168,160	261,491	921,845	301,056
9.02.2016	160,22	925,391	318,784	1168,160	282,137	917,482	331,847
31.05.2017	147,07	740,447	186,954	1168,160	129,189	717,798	166,301
22.11.2018	136,06	647,113	78,227	699,425	9,475	634,284	30,600
19.02.2020	145,63	699,515	171,871	777,963	112,631	688,871	145,943
31.10.2020	126,98	649,297	-67,227	691,788	-65,973	646,294	-50,996
2.05.2021	132,70	543,374	-56,127	576,667	-20,406	531,632	-6,519
21.05.2022	135,01	456,532	-50,333	495,345	-1,204	439,870	17,645
13.08.2022	129,51	466,910	-64,618	512,812	-43,403	444,787	-32,494
8.11.2022	124,83	463,087	-78,292	499,712	-79,709	444,787	-65,364
1.03.2023	128,04	440,144	-68,894	470,235	-55,772	427,305	-44,104

Tablo 4.41 ve Şekil 4.47’ den görüldüğü üzere P5, P19 ve P35 piyezometrelerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesinden bağımsız değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir. Ölçüm değerleri özellikle 08.02.2012 tarihinden sonra büyük artış göstermiştir.



Şekil 4.47. P5, P19 ve P35 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

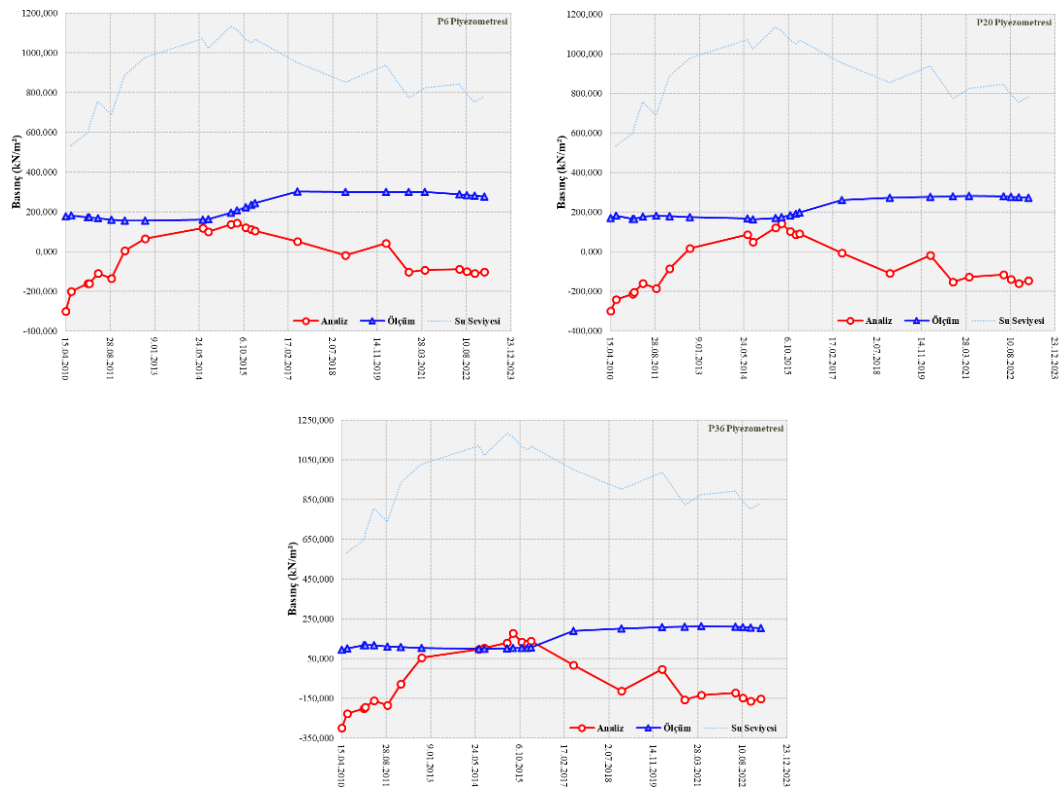
115 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 15 m mesafede olan P6, P20 ve P36 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.42’ de, grafikler Şekil 4.48’ de verilmiştir.

Tablo 4.32. P6, P20 ve P36 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P6		P20		P36	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	178,592	-298,158	170,629	-298,743	95,434	-297,790
15.06.2010	100,00	182,088	-198,662	181,392	-241,137	101,230	-224,788
21.12.2010	107,38	171,929	-160,136	165,766	-213,278	118,344	-200,676
6.01.2011	111,24	171,820	-158,596	165,220	-203,887	118,290	-194,291
12.04.2011	125,23	168,051	-108,740	176,639	-159,141	117,962	-161,405
9.09.2011	117,50	161,552	-135,012	182,321	-184,961	112,384	-183,210
8.02.2012	139,80	157,128	5,292	178,169	-85,022	108,010	-76,951
26.09.2012	150,00	156,035	65,808	175,054	16,863	105,112	55,097
3.07.2014	160,50	161,661	119,127	167,897	85,245	100,793	97,622
2.09.2014	155,16	162,753	101,359	163,526	48,736	100,246	103,863
15.05.2015	167,53	196,615	137,986	168,990	121,597	101,886	129,606
22.07.2015	165,55	208,083	145,108	174,453	140,987	104,073	178,457
27.10.2015	160,16	224,466	121,141	183,742	103,143	104,620	133,414

Tablo 4.33. (Devamı) P6, P20 ve P36 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P6		P20		P36	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
27.10.2015	160,16	224,466	121,141	183,742	103,143	104,620	133,414
30.12.2015	158,24	236,479	111,606	191,390	86,922	104,073	124,471
9.02.2016	160,22	244,670	106,320	198,493	90,970	106,807	138,155
31.05.2017	147,07	302,543	51,002	259,675	-5,728	189,361	18,518
22.11.2018	136,06	301,452	-16,636	272,238	-109,713	202,480	-113,003
19.02.2020	145,63	300,906	41,975	276,061	-18,960	208,492	-3,120
31.10.2020	126,98	300,360	-102,122	279,338	-152,095	212,319	-155,314
2.05.2021	132,70	300,906	-91,766	282,069	-126,458	213,412	-133,693
21.05.2022	135,01	288,895	-87,494	278,246	-115,512	210,132	-120,917
13.08.2022	129,51	285,619	-98,317	276,607	-139,478	209,039	-146,668
8.11.2022	124,83	281,252	-109,278	274,422	-159,897	207,399	-161,972
1.03.2023	128,04	277,430	-101,634	272,784	-146,353	204,666	-152,179



Şekil 4.48. P6, P20 ve P36 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

Tablo 4.42 ve Şekil 4.48’ den görüldüğü üzere P6, P20 ve P36 piyezometrelerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesinden bağımsız değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı

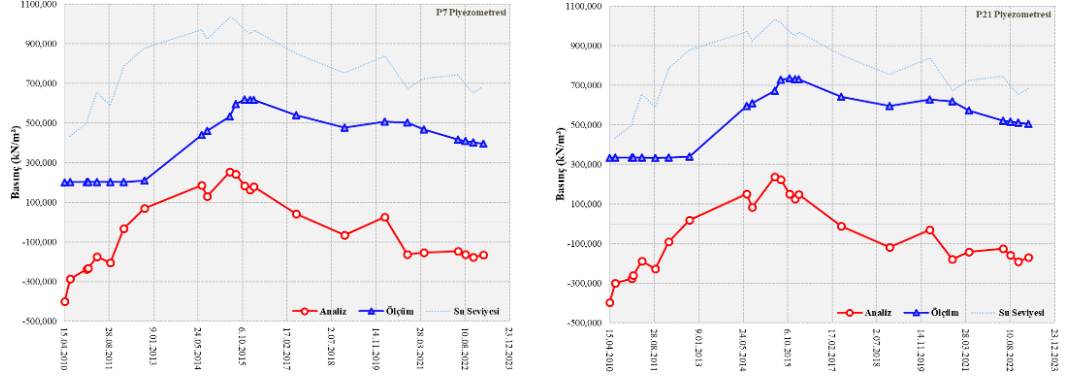
olarak dinamik değişim göstermiştir. Ölçüm değerleri özellikle 02.09.2014 tarihinden sonra büyük artış göstermiştir.

130 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 10 m mesafede olan P7 ve P21 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.43’ te, grafikler Şekil 4.49’ da verilmiştir.

Tablo 4.34. P7 ve P21 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P7		P21	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	201,014	-398,925	333,607	-398,151
15.06.2010	100,00	202,872	-284,391	335,524	-299,900
21.12.2010	107,38	202,982	-235,270	335,990	-276,051
6.01.2011	111,24	203,091	-231,188	336,094	-260,035
12.04.2011	125,23	203,583	-174,453	334,695	-188,293
9.09.2011	117,50	202,599	-204,219	333,037	-228,717
8.02.2012	139,80	204,239	-32,224	335,576	-91,276
26.09.2012	150,00	209,924	71,014	339,876	19,758
3.07.2014	160,50	440,181	186,388	596,022	151,773
2.09.2014	155,16	461,482	131,151	608,431	84,446
15.05.2015	167,53	533,566	254,465	672,527	238,131
22.07.2015	165,55	596,898	243,668	727,293	223,276
27.10.2015	160,16	618,733	184,279	734,525	151,778
30.12.2015	158,24	617,641	163,195	729,876	126,772
9.02.2016	160,22	617,641	179,405	729,876	148,546
31.05.2017	147,07	541,210	42,789	642,034	-12,154
22.11.2018	136,06	477,866	-63,671	594,988	-119,158
19.02.2020	145,63	508,448	27,114	629,111	-30,090
31.10.2020	126,98	502,441	-162,598	619,805	-177,716
2.05.2021	132,70	467,490	-151,894	572,752	-140,462
21.05.2022	135,01	417,786	-145,831	522,060	-126,372
13.08.2022	129,51	410,139	-160,800	515,852	-158,173
8.11.2022	124,83	403,584	-175,256	511,195	-189,764
1.03.2023	128,04	396,482	-165,357	503,951	-168,543

Tablo 4.43 ve Şekil 4.49’ dan görüldüğü üzere P7 ve P21 piyezometrelerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir. Ölçüm değerleri özellikle 26.09.2012 tarihinden sonra büyük artış göstermiştir.

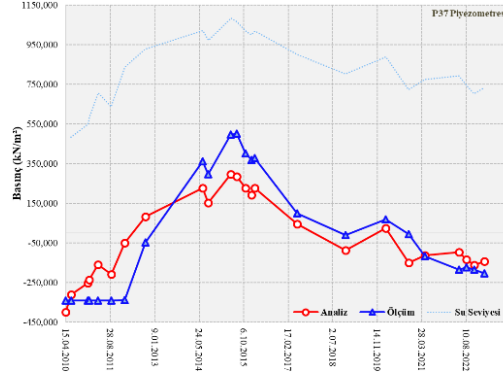


Şekil 4.49. P7 ve P21piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

130 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 15 m mesafede olan P37 dolgu tipi piyezometresine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.44’ te, grafikler Şekil 4.50’ de verilmiştir.

Tablo 4.44. P37 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	-340,182	-398,412
15.06.2010	100,00	-340,678	-309,076
21.12.2010	107,38	-339,630	-252,429
6.01.2011	111,24	-339,465	-235,634
12.04.2011	125,23	-338,638	-158,898
9.09.2011	117,50	-340,458	-208,173
8.02.2012	139,80	-337,315	-48,661
26.09.2012	150,00	-45,963	83,246
3.07.2014	160,50	361,518	227,228
2.09.2014	155,16	297,789	153,018
15.05.2015	167,53	497,690	298,287
22.07.2015	165,55	500,984	286,034
27.10.2015	160,16	401,612	228,508
30.12.2015	158,24	369,757	192,389
9.02.2016	160,22	378,545	228,407
31.05.2017	147,07	100,418	46,275
22.11.2018	136,06	-10,733	-86,326
19.02.2020	145,63	70,161	25,702
31.10.2020	126,98	-4,678	-148,114
2.05.2021	132,70	-116,444	-112,863
21.05.2022	135,01	-183,096	-95,802
13.08.2022	129,51	-173,179	-133,008
8.11.2022	124,83	-183,096	-160,672
1.03.2023	128,04	-201,829	-142,093



Şekil 4.50. P37 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

Tablo 4.44 ve Şekil 4.50’ den görüldüğü üzere P37 piyezometresine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir. Ölçüm değerleri özellikle 08.02.2012 tarihinden sonra büyük artış göstermiştir.

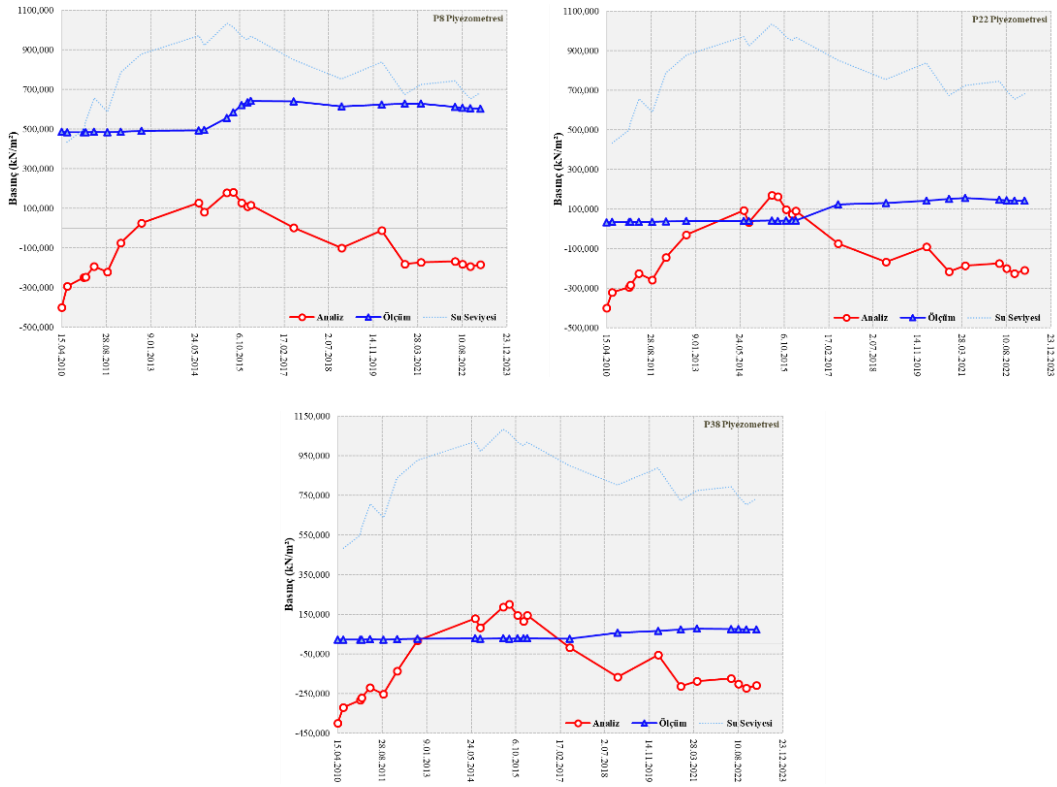
130 m kotu ve baraj ekseninde olan P8, P22 ve P38 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.45’ te, grafikler Şekil 4.51’ d1 verilmiştir.

Tablo 4.45. P8, P22 ve P38 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P8		P22		P38	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	487,645	-399,009	32,709	-399,545	22,019	-398,237
15.06.2010	100,00	485,250	-292,758	34,490	-320,952	22,817	-319,329
21.12.2010	107,38	484,791	-248,384	35,191	-295,312	23,215	-280,690
6.01.2011	111,24	484,995	-245,033	35,245	-282,651	23,763	-269,950
12.04.2011	125,23	485,657	-192,139	36,055	-224,772	24,162	-219,241
9.09.2011	117,50	484,842	-219,781	34,436	-257,340	22,717	-251,741
8.02.2012	139,80	486,014	-72,624	37,026	-144,250	25,407	-134,245
26.09.2012	150,00	490,753	27,272	40,264	-29,452	26,852	19,173
3.07.2014	160,50	493,097	128,606	40,696	92,673	28,745	130,238
2.09.2014	155,16	495,135	82,843	40,156	32,658	28,247	83,140
15.05.2015	167,53	557,298	179,459	41,235	170,449	29,243	188,199
22.07.2015	165,55	584,809	181,065	40,696	162,707	28,247	201,192
27.10.2015	160,16	620,978	127,997	41,235	97,392	28,745	145,933
30.12.2015	158,24	635,751	109,103	41,775	74,156	29,243	115,362
9.02.2016	160,22	642,882	117,482	41,775	90,603	30,239	145,495
31.05.2017	147,07	639,317	2,239	124,306	-73,637	27,748	-16,769
22.11.2018	136,06	614,356	-99,152	130,777	-167,780	57,141	-164,912
19.02.2020	145,63	624,544	-11,478	143,177	-91,469	68,101	-53,499

Tablo 4.45. (Devamı) P8, P22 ve P38 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P8		P22		P38	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
31.10.2020	126,98	629,638	-180,112	152,342	-215,939	74,577	-211,130
2.05.2021	132,70	628,110	-172,275	156,115	-185,679	78,064	-185,816
21.05.2022	135,01	612,318	-167,100	147,490	-173,865	76,570	-172,585
13.08.2022	129,51	608,752	-179,992	145,334	-200,280	75,574	-200,489
8.11.2022	124,83	605,187	-192,702	143,177	-225,684	74,577	-220,034
1.03.2023	128,04	602,130	-183,975	141,021	-208,728	73,581	-207,240



Şekil 4.51. P8, P22 ve P38 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

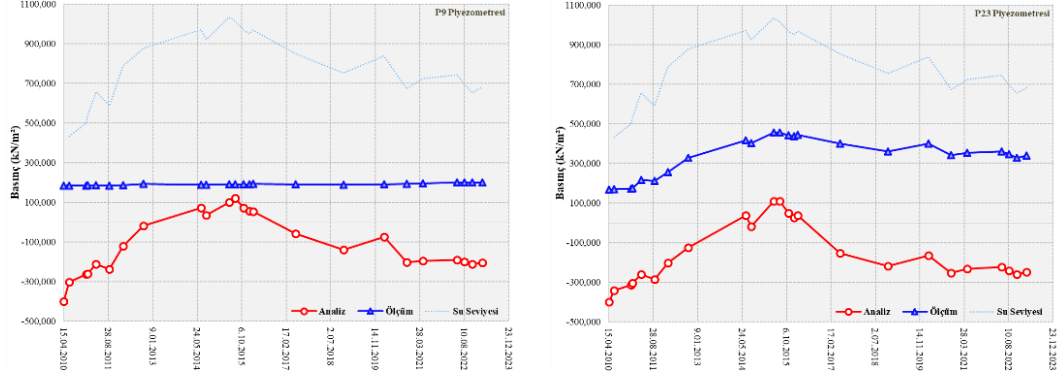
Tablo 4.45 ve Şekil 4.51’ den görüldüğü üzere P8, P22 ve P38 piyezometrelerine ait analiz değerleri genel itibariyle ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir. P8 piyezometresinin ölçüm değerleri özellikle 02.09.2014 tarihinden sonra, P22 ve P38 piyezometrelerinin ölçüm değerleri özellikle 30.12.2015 tarihinden sonra büyük artış göstermiştir. P8 piyezometresinin P22 ve P38 piyezometrelerine göre daha büyük basınç değerlerine sahip olması dikkati çekmiştir.

130 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 10 m mesafede olan P9 ve P23 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.46’ da, grafikler Şekil 4.52’ de verilmiştir.

Tablo 4.46. P9 ve P23 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P9		P23	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	185,642	-398,945	167,052	-399,498
15.06.2010	100,00	185,111	-300,523	169,749	-340,473
21.12.2010	107,38	185,642	-261,256	171,887	-313,214
6.01.2011	111,24	185,695	-258,918	174,533	-303,767
12.04.2011	125,23	186,651	-210,245	217,169	-260,293
9.09.2011	117,50	185,376	-235,723	211,319	-284,854
8.02.2012	139,80	187,607	-119,653	255,614	-202,144
26.09.2012	150,00	193,237	-17,989	329,150	-124,395
3.07.2014	160,50	190,210	72,288	415,460	37,471
2.09.2014	155,16	189,679	35,377	401,758	-19,345
15.05.2015	167,53	190,741	100,357	456,553	108,898
22.07.2015	165,55	190,741	120,602	456,046	108,600
27.10.2015	160,16	190,741	73,500	441,843	48,230
30.12.2015	158,24	192,334	56,084	436,770	25,572
9.02.2016	160,22	192,865	54,964	443,872	36,403
31.05.2017	147,07	190,741	-57,051	401,250	-153,456
22.11.2018	136,06	188,085	-138,821	361,653	-218,943
19.02.2020	145,63	190,741	-73,911	400,743	-165,473
31.10.2020	126,98	192,865	-201,944	341,340	-253,874
2.05.2021	132,70	196,052	-193,780	353,529	-231,828
21.05.2022	135,01	199,770	-189,673	361,653	-223,280
13.08.2022	129,51	199,770	-200,095	346,419	-242,643
8.11.2022	124,83	199,770	-210,810	327,118	-260,959
1.03.2023	128,04	201,363	-203,354	339,816	-248,620

Tablo 4.46 ve Şekil 4.52’ den görüldüğü üzere P9 ve P23 piyezometrelerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir. P9 piyezometresinin P23 piyezometresine göre daha düşük ve daha az değişken değerler okuması dikkati çekmiş olup piyezometrenin belirli zamanlarda hatalı okumalar aldığı düşünülmektedir. P23 piyezometresinin ölçüm değerleri özellikle 09.09.2011 tarihinden sonra büyük artış göstermiştir.

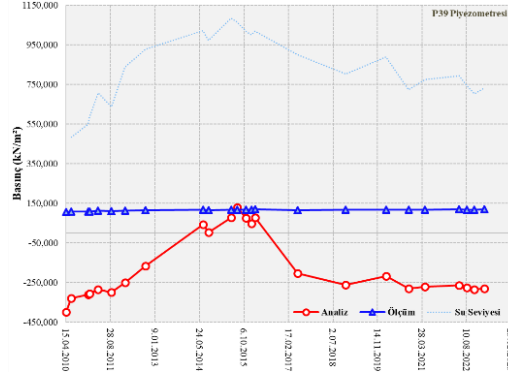


Şekil 4.52. P9 ve P23 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

130 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 15 m mesafede olan P39 dolgu tipi piyezometresine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.47’ de, grafikler Şekil 4.53’ te verilmiştir.

Tablo 4.47. P39 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	107,280	-398,302
15.06.2010	100,00	108,152	-328,665
21.12.2010	107,38	108,408	-309,192
6.01.2011	111,24	109,280	-304,588
12.04.2011	125,23	112,920	-283,277
9.09.2011	117,50	111,126	-296,919
8.02.2012	139,80	113,587	-248,714
26.09.2012	150,00	115,279	-166,091
3.07.2014	160,50	117,176	43,784
2.09.2014	155,16	116,151	4,835
15.05.2015	167,53	118,202	78,769
22.07.2015	165,55	117,689	130,026
27.10.2015	160,16	117,689	76,271
30.12.2015	158,24	118,714	47,442
9.02.2016	160,22	119,740	77,735
31.05.2017	147,07	116,663	-201,627
22.11.2018	136,06	117,176	-261,116
19.02.2020	145,63	118,714	-216,335
31.10.2020	126,98	117,689	-279,995
2.05.2021	132,70	119,227	-269,542
21.05.2022	135,01	119,740	-264,192
13.08.2022	129,51	119,227	-275,581
8.11.2022	124,83	118,714	-283,673
1.03.2023	128,04	119,740	-278,336



Şekil 4.53. P39 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

Tablo 4.47 ve Şekil 4.53' ten görüldüğü üzere P39 piyezometresine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

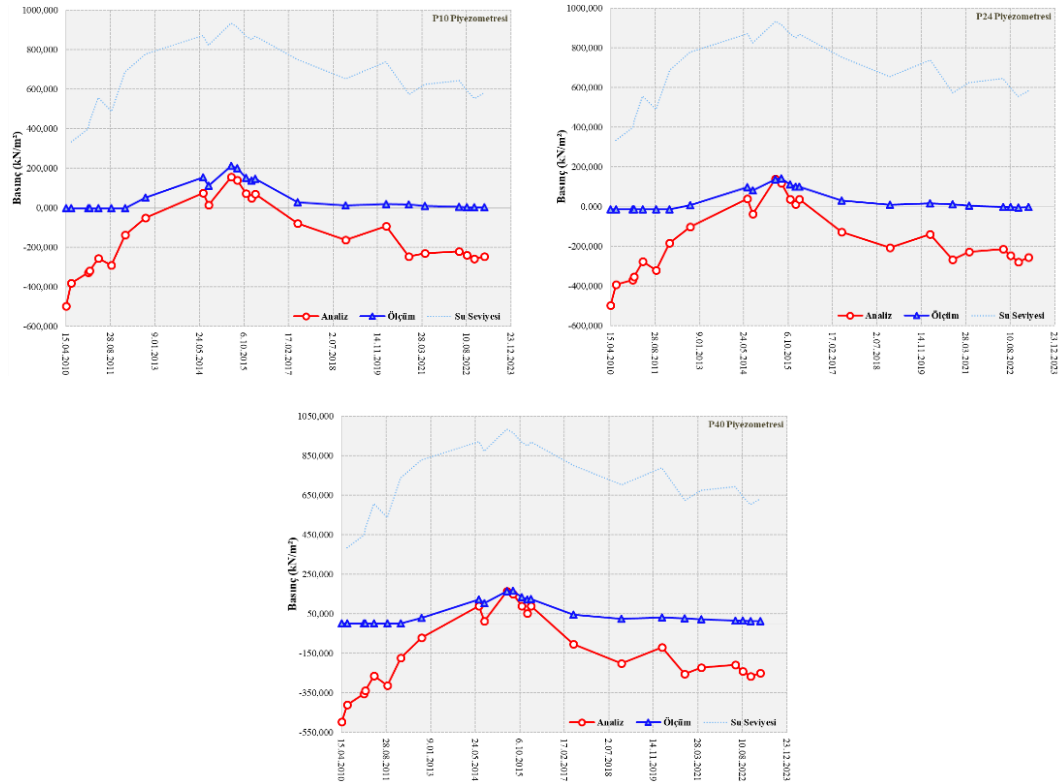
145 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 10 m mesafede olan P10, P24 ve P40 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.48' de, grafikler Şekil 4.54' te verilmiştir.

Tablo 4.48. P10, P24 ve P40 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P10		P24		P40	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	-1,985	-497,041	-13,707	-497,837	1,394	-496,386
15.06.2010	100,00	-2,266	-379,988	-14,120	-393,845	1,702	-409,134
21.12.2010	107,38	-2,050	-326,024	-14,244	-370,529	1,969	-353,928
6.01.2011	111,24	-1,985	-318,044	-14,182	-353,304	1,948	-337,766
12.04.2011	125,23	-1,877	-255,494	-14,099	-277,275	1,948	-264,164
9.09.2011	117,50	-2,482	-288,781	-14,492	-320,185	1,640	-311,472
8.02.2012	139,80	-1,511	-136,653	-13,913	-182,358	1,948	-171,304
26.09.2012	150,00	51,300	-51,076	8,024	-102,767	30,568	-69,659
3.07.2014	160,50	153,684	76,317	97,724	40,638	123,511	89,848
2.09.2014	155,16	113,225	14,467	81,545	-36,251	103,444	13,575
15.05.2015	167,53	213,024	155,466	137,585	139,212	164,857	164,273
22.07.2015	165,55	200,241	139,764	140,910	118,491	166,699	151,262
27.10.2015	160,16	151,520	73,080	111,835	37,912	134,771	90,625
30.12.2015	158,24	137,021	50,271	99,799	11,847	123,921	52,812
9.02.2016	160,22	147,624	70,471	100,006	37,328	125,968	90,736
31.05.2017	147,07	29,595	-78,666	30,165	-126,693	45,263	-103,440
22.11.2018	136,06	12,108	-161,719	9,472	-207,754	25,382	-199,830
19.02.2020	145,63	20,311	-91,597	16,713	-138,449	32,966	-119,426
31.10.2020	126,98	17,720	-246,618	12,368	-266,793	28,252	-254,280
2.05.2021	132,70	9,518	-228,544	5,542	-228,204	22,102	-222,347

Tablo 4.48. (Devamı) P10, P24 ve P40 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P10		P24		P40	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
21.05.2022	135,01	4,338	-220,933	-1,282	-214,581	15,952	-207,633
13.08.2022	129,51	3,475	-239,447	-2,316	-246,031	14,927	-240,415
8.11.2022	124,83	3,043	-256,736	-3,350	-279,188	13,491	-265,907
1.03.2023	128,04	2,827	-244,968	-3,143	-256,654	13,081	-248,638



Şekil 4.54. P10, P24 ve P40 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

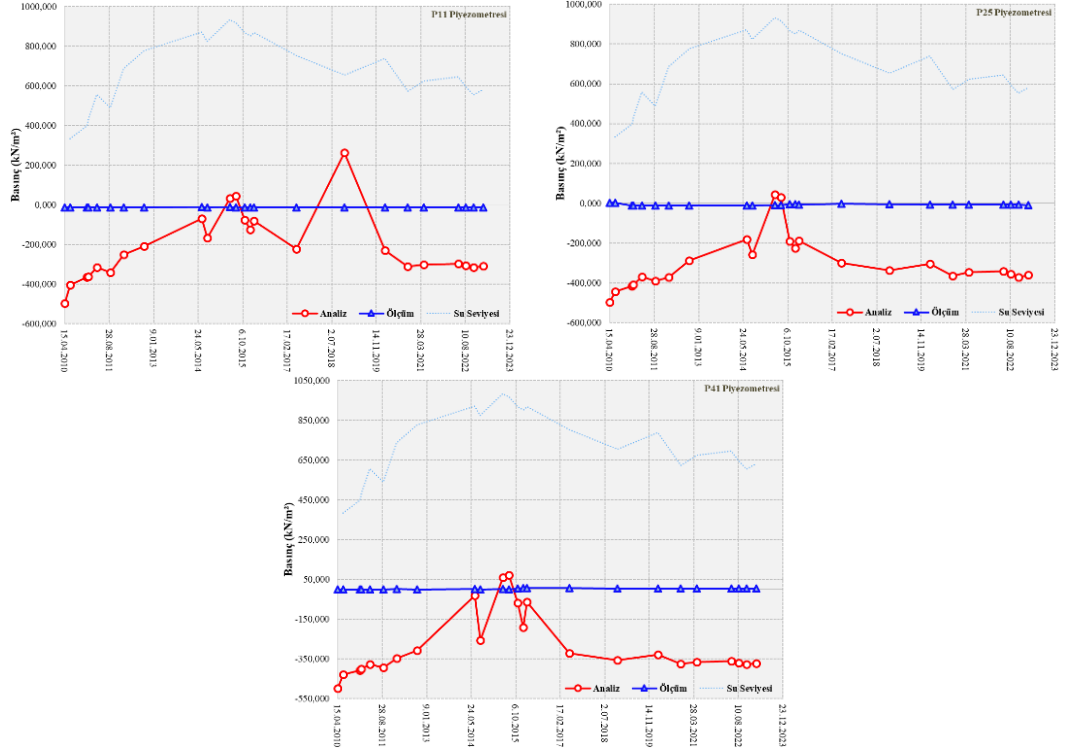
Tablo 4.48 ve Şekil 4.54' ten görüldüğü üzere P10, P24 ve P40 piyezometrelerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

145 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 10 m mesafede olan P11, P25 ve P41 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.49' da, grafikler Şekil 4.55' te verilmiştir.

Tablo 4.49. P11, P25 ve P41 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P11		P25		P41	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	-13,838	-498,463	0,422	-497,359	-0,515	-498,223
15.06.2010	100,00	-13,795	-403,913	0,921	-444,711	-0,844	-428,632
21.12.2010	107,38	-13,774	-366,397	-12,438	-417,489	-0,536	-407,225
6.01.2011	111,24	-13,731	-363,710	-12,554	-409,125	-0,556	-402,073
12.04.2011	125,23	-13,583	-316,758	-12,650	-371,299	-0,536	-378,752
9.09.2011	117,50	-14,029	-341,431	-12,573	-392,582	-1,030	-393,534
8.02.2012	139,80	-13,413	-251,088	-12,496	-372,082	-0,288	-348,760
26.09.2012	150,00	-13,370	-209,589	-11,747	-289,205	-0,412	-308,261
3.07.2014	160,50	-12,966	-69,699	-11,440	-183,152	-0,185	-32,621
2.09.2014	155,16	-13,179	-168,516	-11,632	-259,637	-0,391	-257,081
15.05.2015	167,53	-12,754	31,568	-10,864	43,474	0,021	58,999
22.07.2015	165,55	-14,667	44,349	-9,904	29,789	-0,391	71,159
27.10.2015	160,16	-14,454	-77,088	-6,257	-190,566	2,698	-68,629
30.12.2015	158,24	-14,029	-125,234	-4,530	-226,039	4,552	-193,188
9.02.2016	160,22	-14,029	-81,654	-7,793	-190,389	4,964	-64,288
31.05.2017	147,07	-14,879	-223,101	-2,610	-300,694	5,788	-322,772
22.11.2018	136,06	-14,454	262,842	-6,257	-338,691	3,522	-358,181
19.02.2020	145,63	-14,029	-229,416	-8,177	-306,275	3,316	-329,287
31.10.2020	126,98	-14,454	-311,127	-8,369	-366,143	3,316	-375,485
2.05.2021	132,70	-14,029	-301,470	-8,369	-348,262	3,316	-365,426
21.05.2022	135,01	-13,816	-297,671	-8,561	-341,826	3,522	-360,723
13.08.2022	129,51	-14,241	-307,341	-8,945	-356,918	3,316	-371,103
8.11.2022	124,83	-14,029	-317,459	-8,945	-371,957	3,316	-379,204
1.03.2023	128,04	-13,391	-310,383	-9,136	-361,633	3,316	-373,774

Tablo 4.49 ve Şekil 4.55' ten görüldüğü üzere P11, P25 ve P41 piyezometrelerine ait analiz değerleri genel itibariyle ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.



Şekil 4.55. P11, P25 ve P41 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

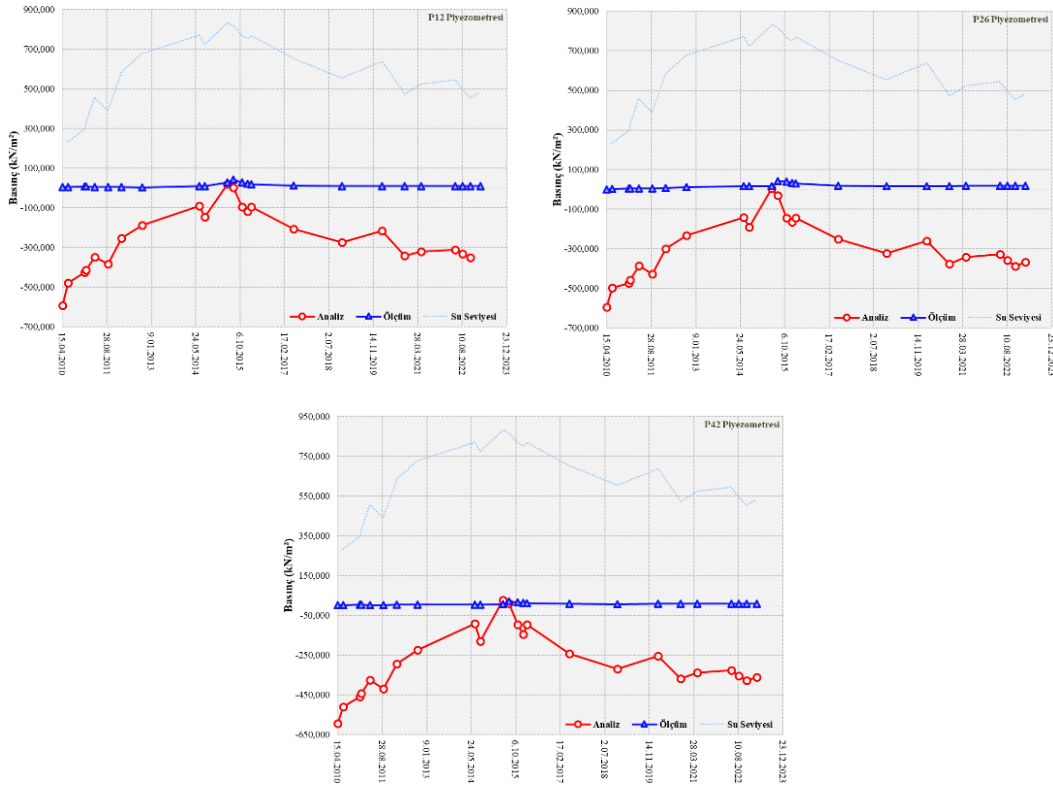
160 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 5 m mesafede olan P12, P26 ve P42 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.50' de, grafikler Şekil 4.56' da verilmiştir.

Tablo 4.35. P12, P26 ve P42 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P12		P26		P42	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	3,221	-594,331	0,080	-595,399	0,436	-595,177
15.06.2010	100,00	4,596	-480,315	0,239	-498,487	1,690	-510,756
21.12.2010	107,38	5,734	-426,002	2,713	-474,725	2,780	-459,304
6.01.2011	111,24	5,476	-414,904	3,032	-458,600	2,726	-444,379
12.04.2011	125,23	4,703	-350,109	4,150	-387,488	1,908	-376,564
9.09.2011	117,50	4,253	-384,881	2,633	-427,653	1,635	-420,267
8.02.2012	139,80	4,550	-253,376	5,666	-299,746	2,290	-295,037
26.09.2012	150,00	1,576	-188,337	9,496	-232,457	2,780	-223,783
3.07.2014	160,50	8,928	-91,469	15,481	-142,231	3,707	-91,111
2.09.2014	155,16	9,405	-146,930	15,481	-192,553	3,707	-179,582
15.05.2015	167,53	26,886	19,210	16,279	3,016	4,797	25,844
22.07.2015	165,55	41,010	2,752	40,221	-30,207	18,969	10,459
27.10.2015	160,16	26,463	-95,463	37,827	-145,863	14,609	-97,017
30.12.2015	158,24	20,265	-117,936	32,240	-165,608	11,883	-145,742
9.02.2016	160,22	17,873	-95,771	28,250	-145,751	10,248	-97,400

Tablo 4.36. (Devamı) P12, P26 ve P42 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P12		P26		P42	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
31.05.2017	147,07	10,805	-206,563	17,077	-250,911	6,978	-243,867
22.11.2018	136,06	8,976	-275,635	15,481	-323,077	5,887	-319,407
19.02.2020	145,63	8,761	-216,217	16,279	-260,819	6,978	-254,438
31.10.2020	126,98	8,761	-342,345	16,279	-377,884	6,978	-367,749
2.05.2021	132,70	8,761	-321,186	17,077	-341,865	7,523	-339,089
21.05.2022	135,01	8,960	-312,827	17,077	-329,341	7,523	-326,134
13.08.2022	129,51	8,777	-333,003	17,077	-358,379	7,523	-355,242
8.11.2022	124,83	8,761	-351,515	17,077	-389,329	7,523	-378,241
1.03.2023	128,04	8,960	-338,963	17,875	-368,222	8,068	-362,567



Şekil 4.56. P12, P26 ve P42 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

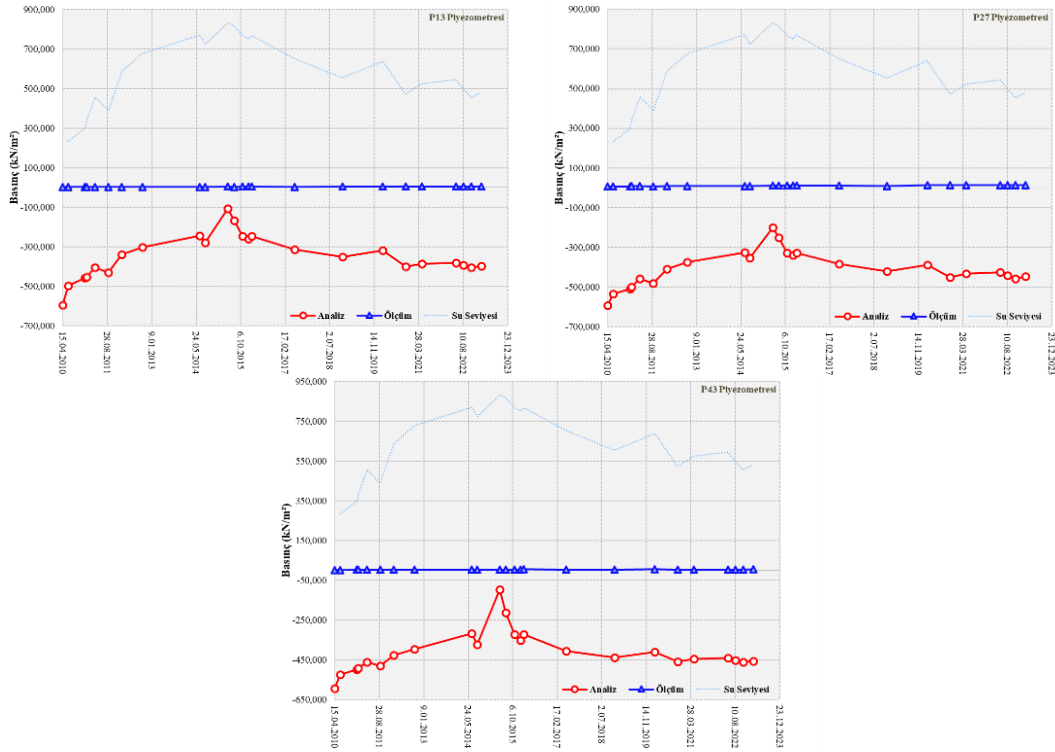
Tablo 4.50 ve Şekil 4.56' dan görüldüğü üzere P12, P26 ve P42 piyezometrelerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

160 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 5 m mesafede olan P13, P27 ve P43 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.51’ de grafikler Şekil 4.57’ de verilmiştir.

Tablo 4.51. P13, P27 ve P43 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P13		P27		P43	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	2,408	-595,572	5,822	-594,889	1,774	-594,878
15.06.2010	100,00	2,701	-498,958	6,347	-536,425	1,938	-523,849
21.12.2010	107,38	2,597	-458,858	7,081	-510,046	3,202	-498,250
6.01.2011	111,24	2,680	-454,229	7,186	-500,657	2,488	-491,730
12.04.2011	125,23	2,785	-404,394	7,396	-458,652	2,386	-462,321
9.09.2011	117,50	2,178	-430,755	6,924	-482,291	1,958	-481,056
8.02.2012	139,80	2,953	-339,228	8,078	-409,935	2,529	-427,707
26.09.2012	150,00	2,345	-302,970	7,816	-374,160	2,325	-396,467
3.07.2014	160,50	2,764	-244,756	9,284	-326,487	2,876	-318,606
2.09.2014	155,16	2,555	-279,292	8,760	-355,393	2,672	-373,635
15.05.2015	167,53	3,183	-106,319	9,809	-201,055	3,080	-96,128
22.07.2015	165,55	2,974	-167,293	9,809	-252,129	2,876	-213,716
27.10.2015	160,16	3,183	-247,171	10,333	-328,690	3,692	-322,714
30.12.2015	158,24	4,021	-261,503	11,382	-341,231	4,100	-353,633
9.02.2016	160,22	4,021	-247,175	10,333	-328,314	4,508	-323,419
31.05.2017	147,07	2,555	-313,322	9,809	-383,788	3,692	-405,641
22.11.2018	136,06	3,602	-351,587	9,284	-422,538	3,692	-437,933
19.02.2020	145,63	4,230	-318,639	12,431	-388,939	4,304	-410,074
31.10.2020	126,98	3,811	-399,270	12,431	-453,037	3,692	-458,440
2.05.2021	132,70	4,230	-386,678	12,956	-432,990	4,100	-446,251
21.05.2022	135,01	4,440	-382,031	12,956	-425,963	4,100	-440,778
13.08.2022	129,51	3,811	-393,625	12,431	-442,503	3,488	-453,082
8.11.2022	124,83	4,230	-405,255	12,956	-459,505	4,100	-462,970
1.03.2023	128,04	4,858	-397,201	14,005	-447,813	4,508	-456,263

Tablo 4.51 ve Şekil 4.57’ ten görüldüğü üzere P13, P27 ve P43 piyezometrelerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin altında kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak değişim gösterirken, analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.



Şekil 4.57. P13, P27 ve P43 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

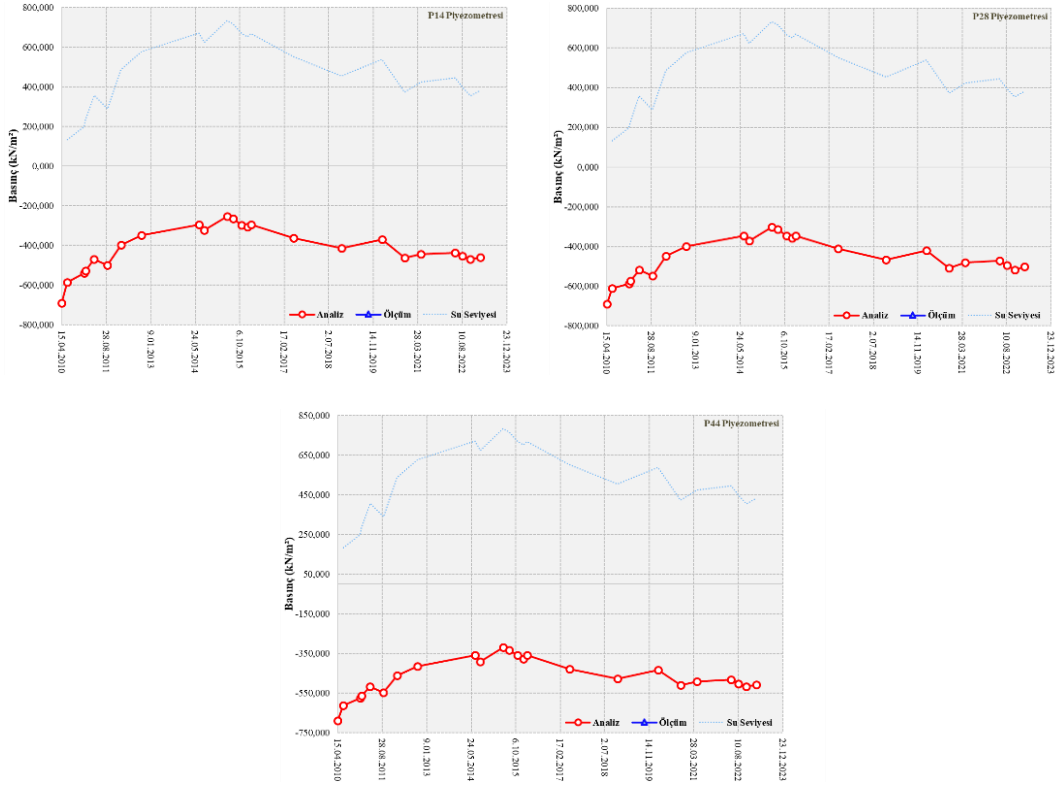
175 m kotu ve baraj ekseninde olan P14, P28 ve P44 dolgu tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.52' de, grafikler Şekil 4.58' de verilmiştir.

Tablo 4.52. P14, P28 ve P44 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P14		P28		P44	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	-	-691,082	-	-690,445	-	-690,565
15.06.2010	100,00	-	-586,478	-	-612,873	-	-613,744
21.12.2010	107,38	-	-538,685	-	-588,115	-	-575,900
6.01.2011	111,24	-	-528,645	-	-575,296	-	-565,329
12.04.2011	125,23	-	-469,567	-	-518,791	-	-517,600
9.09.2011	117,50	-	-501,281	-	-550,751	-	-548,366
8.02.2012	139,80	-	-396,897	-	-450,610	-	-461,679
26.09.2012	150,00	-	-349,570	-	-400,246	-	-415,896
3.07.2014	160,50	-	-295,346	-	-346,648	-	-359,007
2.09.2014	155,16	-	-322,574	-	-373,617	-	-391,489
15.05.2015	167,53	-	-253,552	-	-304,003	-	-319,314
22.07.2015	165,55	-	-265,955	-	-315,379	-	-333,692
27.10.2015	160,16	-	-296,979	-	-348,409	-	-360,455
30.12.2015	158,24	-	-306,549	-	-357,942	-	-377,475

Tablo 4.52. (Devamı) P14, P28 ve P44 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	P14		P28		P44	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
9.02.2016	160,22	-	-296,368	-	-347,936	-	-360,522
31.05.2017	147,07	-	-362,451	-	-413,661	-	-428,263
31.05.2017	147,07	-	-362,451	-	-413,661	-	-428,263
22.11.2018	136,06	-	-413,802	-	-468,636	-	-478,231
19.02.2020	145,63	-	-369,396	-	-421,008	-	-434,763
31.10.2020	126,98	-	-463,450	-	-511,324	-	-511,527
2.05.2021	132,70	-	-444,710	-	-483,183	-	-491,662
21.05.2022	135,01	-	-437,462	-	-473,457	-	-482,789
13.08.2022	129,51	-	-454,817	-	-496,194	-	-502,832
8.11.2022	124,83	-	-470,856	-	-520,242	-	-518,824
1.03.2023	128,04	-	-459,916	-	-503,745	-	-507,885



Şekil 4.58. P14, P28 ve P44 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

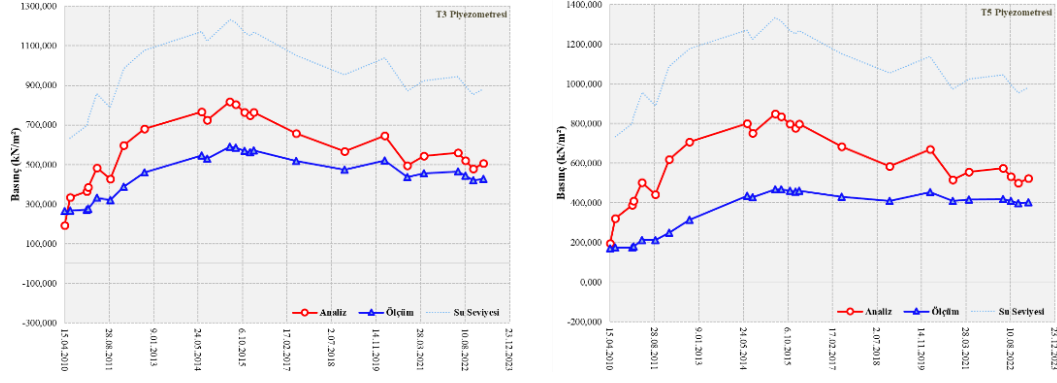
Tablo 4.52 ve Şekil 4.58’ den görüldüğü üzere P13, P27 ve P43 piyezometrelerinden işletmedeki su seviyesinin 175 metre kotuna hiç ulaşmamaş olması nedeniyle ölçüm alınmamıştır. Analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

55 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 15 m mesafede olan T3 ve T5 temel tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.53' te, grafikler Şekil 4.59' da verilmiştir.

Tablo 4.53. T3 ve T5 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	T3		T5	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	264,674	192,826	169,889	194,245
15.06.2010	100,00	267,332	334,575	175,177	319,745
21.12.2010	107,38	270,096	363,496	175,229	387,106
6.01.2011	111,24	275,517	386,008	178,161	408,209
12.04.2011	125,23	332,013	482,017	210,156	502,614
9.09.2011	117,50	320,534	427,393	211,256	442,297
8.02.2012	139,80	388,294	597,089	248,236	617,463
26.09.2012	150,00	458,599	680,351	314,051	706,927
3.07.2014	160,50	545,796	765,581	435,602	799,848
2.09.2014	155,16	528,262	723,487	427,208	751,322
15.05.2015	167,53	589,896	817,085	467,607	848,819
22.07.2015	165,55	586,177	803,957	466,558	835,205
27.10.2015	160,16	568,112	762,998	459,212	797,416
30.12.2015	158,24	561,205	748,252	456,063	777,160
9.02.2016	160,22	570,769	763,394	460,261	797,829
31.05.2017	147,07	518,166	657,176	429,306	682,569
22.11.2018	136,06	472,468	566,883	407,800	583,987
19.02.2020	145,63	519,760	645,366	452,391	669,739
31.10.2020	126,98	435,271	494,982	409,373	514,934
2.05.2021	132,70	455,464	542,028	415,668	556,501
21.05.2022	135,01	463,435	558,745	417,766	574,691
13.08.2022	129,51	443,242	519,346	409,898	533,064
8.11.2022	124,83	420,391	479,091	396,786	499,827
1.03.2023	128,04	427,300	506,663	401,506	522,542

Tablo 4.53 ve Şekil 4.59' dan görüldüğü üzere T3 ve P5 piyezometrelerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

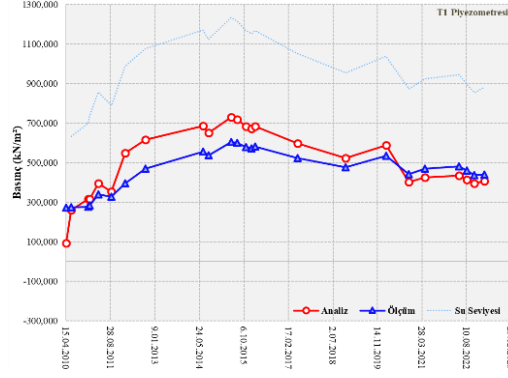


Şekil 4.59. T3 ve T5 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

65 m kotu ve memba bölgesinde baraj eksenine 15 m mesafede olan T1 temel tipi piyezometresine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.54’ te, grafik Şekil 4.60’ ta verilmiştir.

Tablo 4.54. T1 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	272,225	93,627
15.06.2010	100,00	274,338	259,356
21.12.2010	107,38	276,663	314,824
6.01.2011	111,24	282,738	315,960
12.04.2011	125,23	339,457	395,578
9.09.2011	117,50	326,626	352,873
8.02.2012	139,80	394,139	547,673
26.09.2012	150,00	470,044	615,407
3.07.2014	160,50	554,481	685,487
2.09.2014	155,16	536,567	650,543
15.05.2015	167,53	603,467	729,455
22.07.2015	165,55	599,781	717,613
27.10.2015	160,16	578,714	683,323
30.12.2015	158,24	572,393	670,950
9.02.2016	160,22	581,874	683,710
31.05.2017	147,07	522,338	596,473
22.11.2018	136,06	475,950	522,862
19.02.2020	145,63	533,405	586,807
31.10.2020	126,98	440,617	402,927
2.05.2021	132,70	469,622	425,772
21.05.2022	135,01	480,695	434,046
21.05.2022	135,01	480,695	434,046
13.08.2022	129,51	461,185	413,482
8.11.2022	124,83	437,452	393,878
1.03.2023	128,04	439,035	407,596



Şekil 4.60. T1 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

Tablo 4.54 ve Şekil 4.60' tan görüldüğü üzere T1 piyezometrelerine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

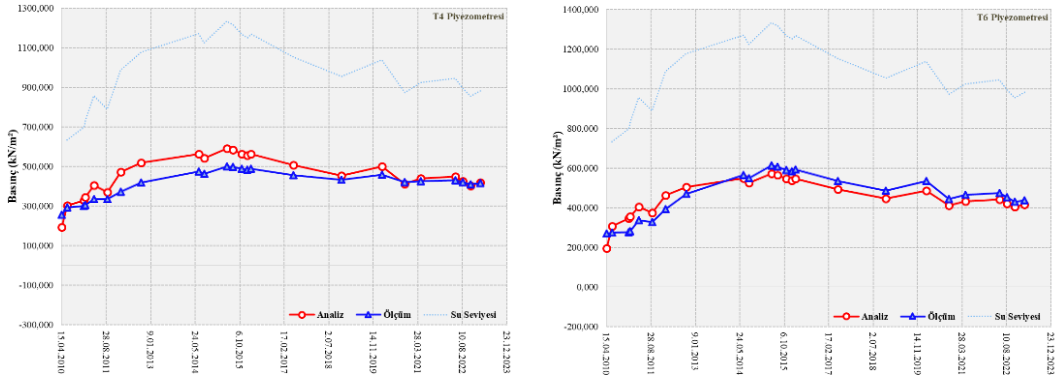
55 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 15 m mesafede olan T4 ve T6 temel tipi piyezometrelerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.55' te, grafikler Şekil 4.61' de verilmiştir.

Tablo 4.55. T4 ve T6 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	T4		T6	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	255,037	193,924	270,504	194,954
15.06.2010	100,00	293,736	302,963	273,226	305,511
21.12.2010	107,38	300,992	328,845	276,274	345,165
6.01.2011	111,24	303,949	343,642	281,662	356,251
12.04.2011	125,23	335,075	404,019	336,308	404,952
9.09.2011	117,50	334,053	370,141	327,055	374,049
8.02.2012	139,80	372,011	472,167	392,637	461,352
26.09.2012	150,00	419,441	519,294	469,695	503,996
3.07.2014	160,50	473,872	563,973	565,466	547,773
2.09.2014	155,16	463,652	542,458	548,598	525,075
15.05.2015	167,53	501,308	590,410	612,803	571,340
22.07.2015	165,55	498,080	583,574	607,362	564,801
27.10.2015	160,16	487,859	562,655	590,495	546,608
30.12.2015	158,24	484,631	555,230	583,421	537,288
9.02.2016	160,22	488,935	562,857	593,759	546,806
31.05.2017	147,07	455,584	506,354	533,362	492,410
22.11.2018	136,06	432,456	454,653	485,476	445,189
19.02.2020	145,63	457,735	499,708	533,362	486,318
31.10.2020	126,98	422,237	411,916	444,663	411,149

Tablo 4.55. (Devamı) T4 ve T6 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	T4		T6	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
2.05.2021	132,70	426,002	440,003	465,886	431,796
21.05.2022	135,01	429,767	449,890	472,961	440,697
13.08.2022	129,51	421,162	426,466	453,370	420,205
8.11.2022	124,83	410,406	402,246	429,425	403,546
1.03.2023	128,04	417,397	418,898	437,044	414,958



Şekil 4.61. T4 ve T6 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

Tablo 4.55 ve Şekil 4.61' den görüldüğü üzere T4 piyezometresine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin üzerinde kalmışken, T6 piyezometresine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

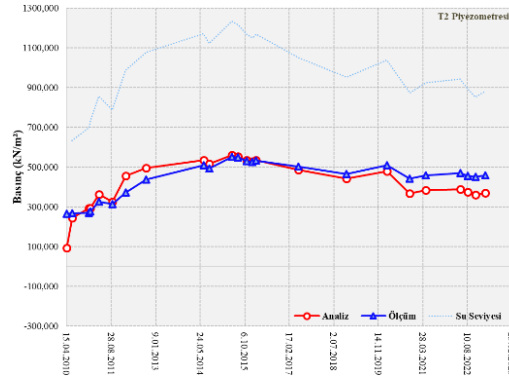
65 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 15 m mesafede olan T2 temel tipi piyezometresine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.56' da, grafik Şekil 4.62' de verilmiştir.

Tablo 4.56. T2 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	266,593	94,997
15.06.2010	100,00	268,644	244,220
21.12.2010	107,38	271,464	292,697
6.01.2011	111,24	276,489	293,988
12.04.2011	125,23	326,983	362,434
9.09.2011	117,50	314,374	326,166
8.02.2012	139,80	373,307	457,576

Tablo 4.56. (Devamı) T2 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
26.09.2012	150,00	438,974	497,091
3.07.2014	160,50	509,933	536,544
2.09.2014	155,16	494,577	516,999
15.05.2015	167,53	551,384	560,845
22.07.2015	165,55	548,826	554,294
27.10.2015	160,16	530,404	535,335
30.12.2015	158,24	525,286	528,449
9.02.2016	160,22	533,475	535,554
31.05.2017	147,07	503,279	486,132
22.11.2018	136,06	464,884	442,770
19.02.2020	145,63	509,421	480,536
31.10.2020	126,98	442,866	367,896
2.05.2021	132,70	459,764	384,311
21.05.2022	135,01	471,028	389,804
13.08.2022	129,51	457,204	375,740
8.11.2022	124,83	452,084	361,153
1.03.2023	128,04	459,252	371,476



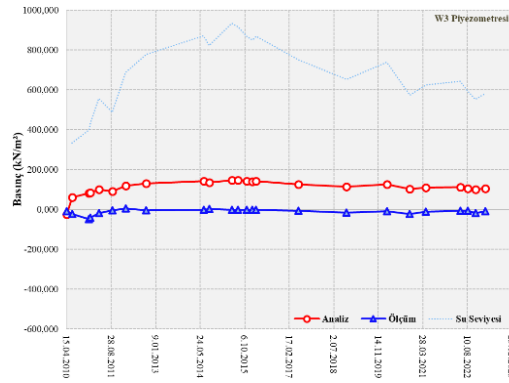
Şekil 4.62. T2 piyezometresinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

Tablo 4.56 ve Şekil 4.62' den görüldüğü üzere T2 piyezometresine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

78 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 40 m mesafede olan W3 su basıncı ölçerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.57' de, grafik Şekil 4.63' te verilmiştir.

Tablo 4.57. W3 su basıncı ölçerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	-7,558	-25,698
15.06.2010	100,00	-23,253	62,023
21.12.2010	107,38	-47,246	81,462
6.01.2011	111,24	-40,210	85,280
12.04.2011	125,23	-16,744	101,656
9.09.2011	117,50	-4,917	91,363
8.02.2012	139,80	5,670	118,633
26.09.2012	150,00	-2,834	130,413
3.07.2014	160,50	-1,296	142,128
2.09.2014	155,16	2,451	136,163
15.05.2015	167,53	-2,206	148,340
22.07.2015	165,55	-0,552	146,646
27.10.2015	160,16	-1,278	141,819
30.12.2015	158,24	-1,113	139,406
9.02.2016	160,22	-0,717	141,869
31.05.2017	147,07	-6,975	127,293
22.11.2018	136,06	-15,627	113,896
19.02.2020	145,63	-8,699	125,634
31.10.2020	126,98	-22,054	103,622
2.05.2021	132,70	-10,183	109,939
21.05.2022	135,01	-5,906	112,580
13.08.2022	129,51	-5,947	106,440
8.11.2022	124,83	-16,658	101,212
1.03.2023	128,04	-9,188	104,818



Şekil 4.63. W3 su basıncı ölçerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafiği.

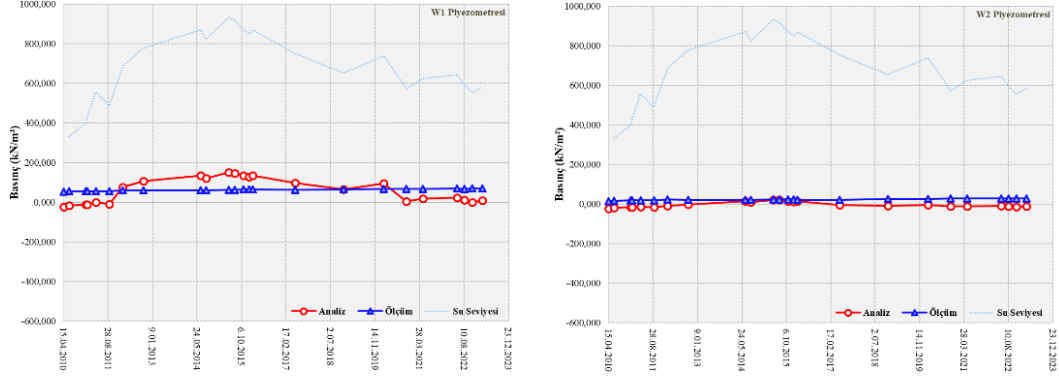
Tablo 4.57 ve Şekil 4.63' ten görüldüğü üzere W3 su basıncı ölçerine ait analiz değerleri ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.

100 m kotu ve mansap bölgesinde baraj eksenine 35 m mesafede olan W1 ve W2 su basıncı ölçerlerine ait ölçüm değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Tablo 4.58’ de, grafik Şekil 4.64’ te verilmiştir.

Tablo 4.58. W1 ve W2 piyezometrelerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim değerleri.

Ölçüm Tarihi	Su Seviyesi	W1		W2	
		Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)	Ölçüm Değeri (kN/m ²)	Analiz Sonucu (kN/m ²)
15.04.2010	0,00	53,787	-22,174	14,247	-22,195
15.06.2010	100,00	55,665	-15,372	16,842	-19,537
21.12.2010	107,38	57,329	-11,561	18,219	-17,172
6.01.2011	111,24	57,490	-11,429	18,431	-16,581
12.04.2011	125,23	57,490	1,218	18,748	-13,060
9.09.2011	117,50	57,167	-8,269	18,060	-15,241
8.02.2012	139,80	60,807	78,178	22,915	-8,057
26.09.2012	150,00	60,223	107,579	20,847	-1,155
3.07.2014	160,50	62,375	135,365	22,163	15,073
2.09.2014	155,16	61,838	121,804	21,661	8,925
15.05.2015	167,53	64,522	151,578	24,309	22,232
22.07.2015	165,55	63,985	147,260	22,747	20,123
27.10.2015	160,16	65,054	134,517	23,250	14,761
30.12.2015	158,24	65,600	129,813	23,806	12,974
9.02.2016	160,22	66,643	134,677	21,661	14,809
31.05.2017	147,07	64,531	99,562	22,300	-4,143
22.11.2018	136,06	66,678	66,832	24,893	-9,537
19.02.2020	145,63	68,284	95,429	25,952	-5,084
31.10.2020	126,98	68,816	6,020	26,956	-12,569
2.05.2021	132,70	68,820	20,174	27,486	-10,651
21.05.2022	135,01	70,426	24,687	28,490	-9,911
13.08.2022	129,51	69,361	12,899	27,038	-11,623
8.11.2022	124,83	70,417	0,074	27,961	-13,155
1.03.2023	128,04	70,426	9,208	28,545	-12,120

Tablo 4.58 ve Şekil 4.64’ ten görüldüğü üzere W1 ve W2 su basıncı ölçerlerine ait analiz değerleri belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin altında, belirli zamanlarda ölçüm değerlerinin üzerinde kalmıştır. Ölçüm değerleri genel itibariyle su seviyesine bağlı olarak ve analiz değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik değişim göstermiştir.



Şekil 4.64. W1 ve W2 su basıncı ölçerlerinin ölçüm ve analiz değerlerine ait değişim grafikleri.

Tüm piyezometrelerde analiz sonucu elde edilen piyezometre değerleri su seviyesine bağlı olarak dinamik şekilde değişmekte iken genel itibariyle ölçüm değerleri modellenen su seviyelerinden bağımsız şekilde değişim göstermiştir. Bunun nedeni olarak ölçüm değerlerinin gerçek su seviyesi değişimine göre sonuçlar vermesi, analiz su seviyelerinin modellenen su seviyelerine göre sonuç vermesi olduğu düşünülmektedir. Buradan hareketle; arazideki su seviyesi değişiminin anlık olarak takip edilerek gerçek senaryonun oluşturulması ve uygulamada kullanılan malzemelere ait gerçek geçirimsizlik değerlerinin modele yansıtılması sonucu piyezometre okumalarının ve model sonuçlarının birbirine yakın elde edileceği kanaatine varılmıştır. Okuma değerlerinde genel itibariyle eksi basınç değeri bulunmazken model sonuçlarında su seviyesine bağlı olarak eksi basınçlı değerler elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İkizdere Barajı, ICOLD metodu ile “En Yüksek (IV)” risk sınıfında, Bureau metodu ile “Düşük (I)” risk sınıfında, DSİ Baraj Emniyeti Rehberi (2012)’ de belirtilen yöntem ile “En Yüksek (IV)” risk sınıfında bulunmuştur. Bu nedenle İkizdere Barajı için periyodik olarak detaylı güvenlik muayeneleri yapılmalı, baraj sürekli olarak izlenmeli ve acil eylem planları hazırlanarak ihtiyaç duyulması halinde güncellenmelidir.

Analiz sonuçları ve barajın gerçek zamanlı davranışı göz önüne alındığında belirli dönemlerdeki röper ölçüm değerlerinin hatalı olduğu düşünülmektedir.

Alınan piyezometre ve röper ölçümleri ile analizlerle elde edilen sonuçlar arasında fark olmasının nedeni olarak baraj zon ve temelindeki gerçek zemin parametrelerinin elde edilememesi ve barajdaki su seviyesi değişiminin anlık olarak ölçülmemesi olduğu düşünülmektedir.

Barajın zamana bağlı olarak yükselmesi sonucu barajda konsolidasyon oturmaları meydana gelecektir. Meydana gelen oturma davranışının gerçeğe yakın bir şekilde tespit edilebilmesi için baraj inşaatının başladığı tarihten itibaren belirli noktalarda oturma okumalarının alınması barajın gerçek zaman oturma davranışının elde edilmesini sağlayacaktır. İncelemesi yapılan barajın inşaat aşamasındaki oturma ölçümleri olmadığından dolayı barajın gerçek zamanlı deformasyon davranışı elde edilememiştir.

Barajlardaki boşluksuyu basınçlarının gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için su basınçlarının ve ölçüm anındaki su seviyelerinin anlık olarak takip edilmesi ve analiz modeline yansıtılması önemlidir. Çünkü analiz modelinde tanımlanan su seviyesi belirli zaman aralıklarında olmakta ve bu zaman aralıkları arasındaki su seviyesi değişiminin lineer olarak olduğu kabul edilmektedir. Ancak gerçek durumda bu tarihler arasındaki su seviyesi değişimi lineer değişim göstermeyebilmektedir. Bu durumda analiz sonucu elde edilen boşluksuyu basınç verileri ile ölçülen boşluksuyu basınç verileri birbiri ile uyuşmamakta ve barajın gerçeğe yakın davranışı elde edilememektedir.

Baraj kil çekirdeğinde oluşacak olan emme gerilimlerinin ölçülebilmesi için barajlara tansiyometrelerin yerleştirilmesi tavsiye edilmektedir.

Analiz sonucu elde edilen veriler barajın davranışının su seviyesinin değişimine ve zemin bünye modelinde girilmiş olan parametrelerin (elastisite modülleri, permeabilite vb.) değerlerine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Uygulamada kullanılan malzeme parametrelerinin tespit edilmesi ve analiz programlarına doğru bir şekilde tanıtılması baraj davranışının en gerçek şekilde analiz edilebilmesi için önemlidir.

Barajların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi için gerekli olan zemin parametrelerinin elde edilmesi için gerekli arazi ve laboratuvar testleri planlama ve inşaat aşamasında yapılarak sonuçlar kayıt altına alınmalıdır. Baraj inşaatı sonrası yapılan ölçümler ve uygulamada kullanılan zemin parametreleri ile yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırılmalı, barajın davranışı hakkında değerlendirmeler yapılmalıdır.

Baraj inşasından sonra alınan ölçümler kullanılarak baraja ait analizler anlık olarak gerçekleştirilmeli ve barajın planlama aşamasında öngörüldüğü şekilde davranıp davranmadığı kontrol edilmelidir. Analiz sonucu baraj gerçek davranışı elde edilemiyorsa analiz modeli kalibre edilerek barajın gerçeğe yakın davranışı elde edilmeye çalışılmalıdır.

Mevzuat kapsamında sadece planlama aşamasında kullanılacak malzemelerin imalat için uygunluğu açısından araştırmalar zorunlu olup, planlanan barajın modellenmesinde ihtiyaç duyulan parametrelerin deneyler sonucu elde edilmesi zorunlu tutulmamaktadır. Yapılması planlanan barajların modellenmesinde kullanılacak olan zemin modellerine planlama aşamasında karar verilerek planlama ve inşaat aşamalarında bu karar verilen zemin bünye modelinde ihtiyaç duyulan parametreler için gerekli test ve deneylerin de yapılması ve raporlanarak kayıt altına alınması tavsiye edilmektedir.

Barajların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılırken analiz sonuçlarının hassasiyetini arttırmak amacıyla gerilme yığılmalarının ve deplasmanların önemli olduğu bölgelerde sonlu elemanlar ağı küçük ölçekte seçilmelidir.

Her baraj için planlama aşamasında baraj izleme planlarının oluşturulması ve barajın inşaatının başladığı ilk günden itibaren periyodik denetim, gözlem ve ölçümlere

başlanması ve barajın işletme ömrü boyunca devam etmesi baraj güvenliği açısından önemlidir.

Barajlarda yapılacak olan denetim, gözlem ve ölçümler periyodik olarak konusunda uzman personeller tarafından gerçekleştirilmelidir. Yapılan denetim, gözlem ve ölçüm sonuçlarına bağlı olarak elde edilen veriler analiz edilerek analiz sonuçları konusunda uzman personeller tarafından değerlendirilmeli ve özenli bir şekilde arşivlenmelidir.

Alınması gereken kritik ölçümlerin olabildiğince otomatik olarak alınabildiği sistemlerin kurulması ve ölçüm aletleri ile bağlı oldukları sistemlerin bakım, kalibrasyon ve fiziksel kontrollerinin belirlenen periyotlarla yapılması tavsiye edilmektedir. Böylelikle ölçüm aletleri ve bağlı oldukları sistemlerdeki hasar ve arızalar en aza indirilebilecek ve ölçüm değerlerinde kişilere bağlı hataların önüne geçilmiş olacak ve belirlenen periyotlarla sürekli veri kaydı alınabilecektir.

Barajlardan alınacak olan ölçüm verilerinin daha sağlıklı olması ve cihazlardan iyi bir performans elde edebilmek için yerleştirilecek olan ölçüm cihazlarının seçiminde, yerleşim yerlerinin belirlenmesinde ve okumaların alınmasında çok dikkatli davranılması gerekmektedir.

Güncel teknolojilerin takip edilerek mevcut barajlardaki ölçüm alet ve yöntemlerinin iyileştirilmesi ve yeni teknolojilerin entegre edilmesi baraj güvenliği açısından faydalı olacaktır.

Barajların teknik şartname, proje ve kurallara uygun bir şekilde inşa edilmesi baraj güvenliğinin sağlanması açısından çok önemlidir.

KAYNAKLAR

- Abay, O., Baykan, N. ve Baykan, N. O., (2015, 19-21, Kasım). Tarih boyunca barajların elden çıkma nedenleri. *4. Su Yapıları Sempozyumu* (157-166) içinde. Antalya, Türkiye.
- Ağırlioğlu, N. (2011). *Baraj güvenliği*. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş.
- Ağırlioğlu, N. (2014). *Atatürk Barajı ve Türkiye'ye etkileri*. Scala Yayıncılık.
- Ağırlioğlu, N., Altunkaynak, A., Özger, M. ve Kartal, E. (2018, 27-31, Ekim). Baraj güvenliği uygulamaları: Göktürk Barajı örneği. H. Tosun, E. Emiroğlu, Ş. Y. Kumcu, T. V. Tosun (Ed.), *Uluslararası V. Baraj Güvenliği Sempozyumu* (1108-1118) içinde. İstanbul, Türkiye.
- Akçalı, E., Sünbül, A. B. ve Arman, H. (2014, 9-11, Ekim). Baraj gövdesi dolgu malzemesi deneyleri, kullanım limitleri ve risk değerlendirmesi. M. E. Emiroğlu, M. Tunç (Ed.), *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (699-712) içinde. Elazığ, Türkiye.
- Aksu, S. ve Ağca, E. (2007, 28-30, Mayıs). DSİ Genel Müdürlüğünce baraj emniyetini ile ilgili olarak yapılan ve yapılması gereken çalışmalar. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (617-628) içinde. Ankara, Türkiye.
- Aksu, S. ve Ağca, E. (2009, 13-15, Mayıs). Baraj emniyeti rehberi ve bölge taşkın planları. H. Tosun, E. Seyrek, M. Türköz, H. Savaş, A. Orhan (Ed.), *Uluslararası Katılımlı II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (215-226) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Al-Jassani, M. S. H. ve Konuk, N. (2021). Baraj deformasyonları ve Al Kut Barajı (Irak) örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences (Anadolu Çevre ve Hayvancılık Bilimleri Dergisi)*, 6(3), 456-461. <https://doi.org/10.35229/jaes.941471>
- Aşık, Y. (2016). Barajların kontrolü ve denetiminin önemi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 33-40. <http://dx.doi.org/10.17714/gufbed.2016.06.004>
- Aydın, R. K. (2007, 28-30, Mayıs). Baraj ölçüm tesislerinin baraj güvenliğindeki önemli görevi. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (733-739) içinde. Ankara, Türkiye.
- Aydın, S. ve Aydın, M. C. (2014, 9-11, Ekim). Akbaş Barajı eşdeğer lineer dinamik analizi ve kalıcı deformasyon tahminleri. M. E. Emiroğlu, M. Tunç (Ed.), *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (247-260) içinde. Elazığ, Türkiye.

- Baykan, N. O., Yaşar, M. ve Saf, B. (2007, 28-30, Mayıs). Barajlarda güvenlik ölçütleri ve ölçüm aygıtları. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (227-240) içinde. Ankara, Türkiye.
- Bayraktar, A., Kartal, M. E. ve Adanur, S. (2007, 28-30, Mayıs). Beton plak-kaya dolgu arayüzey birleşiminin ÖYBKKD barajların deprem davranışına etkisi. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (449-460) içinde. Ankara, Türkiye.
- Bentley (2023, 05 Ocak). Plaxis Material Models Manual 3D. https://communities.bentley.com/cfs-file/_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS_5F00_3D_5F00_2023.1_5F00_3D_5F00_3_5F00_Material-Models-Manual.pdf adresinden 05.10.2023 tarihinde alınmıştır.
- Berilgen, M., Özaydın, K. ve Edil, T. B. (2014, 9-11, Ekim). Barajlarda ani su inmesi durumundaki davranışın sayısal analizi. M. E. Emiroğlu, M. Tunç (Ed.), *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (151-157) içinde. Elazığ, Türkiye.
- Berkün, M. (2007). *Su yapıları, Barajlar, savaklar ve su kuvveti tesisleri*. Birsen Yayınevi.
- Bilge, H. T. ve Çetin, K. Ö., (2011, 11-14, Ekim). Suya doymuş kumlu zeminlerin tekrarlı boşluk suyu basıncı gelişim davranışlarının modellenmesi. *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı* içinde. Ankara, Türkiye.
- Bilir, S., Yıldız, S. S., Müftüoğlu, N., Ateş, S., Demir, E. ve Babacan, K. (2009, 13-15, Mayıs). GNSS ile bir erken uyarı sistemi. H. Tosun, E. Sevrek, M. Türköz, H. Savaş, A. Orhan (Ed.), *Uluslararası Katılımlı II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (251-259) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Caner, E. (2021, 17 Ağustos). Barajlarda güvenlik, acil durum planları ve su alarm sistemleri. <https://www.sunsavunma.net/barajlarda-guvenlik-acil-durum-eylem-planlari-ve-su-alarm-sistemleri/> adresinden 7.10.2022 tarihinde alınmıştır.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2012). *Baraj tasarımında sismik parametre seçimi rehberi*. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2012). *Baraj emniyeti rehberi*. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2014, 21 Şubat). Baraj Ölçüm Cihazları Teknik Şartnamesi. <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/740> adresinden 13.10.2022 tarihinde alınmıştır.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2023, 14 Aralık). Yıllar itibarıyla yapımı tamamlanan baraj sayıları 1936-2022. <https://dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/1847> adresinden 03.03.2024 tarihinde alınmıştır.
- Emiroğlu, E., Edil, T.B., Kalkan, Y., Karadeniz, H., Celep, Z. (2020). Baraj Emniyeti için Gözlemsel İnceleme ve Değerlendirmelerin Rolü. *Su Kaynakları Dergisi*, 5(2), 40-47.

- ENCON. (2006). *Yusufeli Barajı ve HES projesi çevresel etki değerlendirmesi raporu*. <https://docplayer.biz.tr/16157623-Viii-5-baraj-guvenligi-ve-acil-mudahale-viii-5-1-baraj-guvenliginde-yer-alan-taraflar.html>
- Fay Üzerinde Yaşayan İllerimiz: Aydın Raporu-4, https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/344b5189f16b36d_ek.pdf adresinden 09.09.2023 tarihinde alınmıştır.
- Gülal, E., ve Hoşbaş, G. (2000). Barajların güvenliği. *DSİ Teknik Bülteni*, 96, 63-67.
- Güler, T., Çakır, F. ve Ceylan, E. (2012, 10-12, Ekim). Ağrı Patnos Barajı'nın sismik performans analizi. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş (Ed.), *Uluslararası Katılımlı III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (233-241) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Gürbüz, M., Şahinbaz, D., Birhan, S. S., Aydın, K., Hanzaçebi, G. ve Koç, N. (2009, 13-15, Mayıs). Cindere Barajı ve Hidroelektrik Santrali mikrotremor çalışması. H. Tosun, E. Seyrek, M. Türköz, H. Savaş, A. Orhan (Ed.), *Uluslararası Katılımlı II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (319-336) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- ICOLD (2023, Nisan). Number of Dams by Country. https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/number-of-dams-by-country adresinden 03.03.2024 tarihinde alınmıştır.
- Kalkan, Y. (2009, 11-15, Mayıs). Atatürk Barajında deformasyon izleme çalışmaları ve düşey deformasyonlar. *12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı* içinde. Ankara, Türkiye.
- Kalkan, Y. (2014). Baraj emniyeti ve deformasyon izleme çalışmaları Atatürk Barajı örneği. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(3), 40-50.
- Karaton, M. ve Calayır, Y. (2009, 13-15, Mayıs). Kemer barajlarda baraj-rezervuar etkileşiminin sismik hasara etkisi. H. Tosun, E. Seyrek, M. Türköz, H. Savaş, A. Orhan (Ed.), *Uluslararası Katılımlı II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (621-631) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Kasalak, F. A., Aydın, M., Şeren, A., Yıldırım, M. U., Öztekin, Z., Çevlik, H., Keleş, E. ve Doğan, M. (2012, 10-12, Ekim). Su kalitesinin baraj emniyetine etkisi (Hancağız Barajı cebri boru tüneline yaşanan patlama). H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş (Ed.), *Uluslararası Katılımlı III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (293-305) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Kürklü, G. ve Zorluer, İ. (2007, 28-30, Mayıs). Dolgu barajlarda deformasyon gözlemleri ve gelişmiş veri toplama sistemlerinin kullanımı. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *I. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (691-700) içinde. Ankara, Türkiye.
- Mesci, S. B., Ağırlioğlu, N. ve Eriş, E. (2007, 28-30, Mayıs). Dolgu barajlarda sızma hattının belirlenmesi ve kullanılan metotların karşılaştırılması. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *I. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (171-182) içinde. Ankara, Türkiye.
- Mısırlıoğlu, M., Altan, A. ve Oral, K. (2012, 10-12, Ekim). Akyar Barajında ölçüm tesisleri ve oturmaların gözlenmesi. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş (Ed.), *Uluslararası Katılımlı III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (209-221) içinde. Eskişehir, Türkiye.

- Özmen, H. CB. (2018). *Eskişehir ili sismik tehlike analizi* [Yüksek lisans tezi]. Anadolu Üniversitesi.
- Özoral, E. (2009, 13-15, Mayıs). Dolgu baraj mühendisliğinde gelişmeler ve tartışmalar üzerine değerlendirme. H. Tosun, E. Seyrek, M. Türköz, H. Savaş, A. Orhan (Ed.), H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş (Ed.), *Uluslararası Katılımlı II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (847-857) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Savaş, H., Şen, S., Yılmaz, G. ve Tosun H. (2007, 28-30, Mayıs). Toprak dolgu barajlar yönünden düşük plastisiteli dispersif zeminlerin değerlendirilmesi. *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (399-407) içinde. Ankara, Türkiye.
- Seyrek, E., Orhan, A. ve Tosun, H. (2009, 13-15, Mayıs). Ceyhan Havzası baraj yerleri deterministik sismik tehlike analizi. H. Tosun, E. Seyrek, M. Türköz, H. Savaş, A. Orhan (Ed.), *Uluslararası Katılımlı II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (575-582) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Sucu, S., Kankal, M., Aydoğan, D., Yüksek, Ö. ve Dinç, T. (2007, 28-30, Mayıs). Dolusavak türleri ve Deriner, Borçka ve Muratlı Barajı örnekleri. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (241-250) içinde. Ankara, Türkiye.
- Şen, Z. (2007, 28-30, Mayıs). Baraj güvenliği üzerine iklim değişikliği etkileri. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (135-147) içinde. Ankara, Türkiye.
- Şen, Z. (2012, 10-12, Ekim). Türkiye barajlarının ulusal ve uluslararası güvenliğinin sağlanması önerileri. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş (Ed.), *Uluslararası Katılımlı III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (45-52) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Taşçı, L., Yıldırım, B., Gökalp, E. (2004). Kaya dolgu barajda deformasyonların jeodezik ve sonlu elemanlar metodu ile belirlenmesi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 205-219.
- Tosun, H. (2009, 13-15, Mayıs). Baraj yeri depremselliği ve sismik tasarım parametreleri. H. Tosun, E. Seyrek, M. Türköz, H. Savaş, A. Orhan (Ed.), *Uluslararası Katılımlı II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (859-871) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Tosun, H., Özoral, E., Şenol, S. ve Seyrek, E. (2007, 28-30, Mayıs). Baraj yapılarının toplam riski ve Yeşilirmak Havzası için yapılan analizler. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (330-339) içinde. Ankara, Türkiye.
- Tosun, H., Üstündağ, F. ve Tosun, K. (2007, 28-30, Mayıs). Dolgu barajlarda oluşan statik deformasyonlar ve hesap esasları. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (507-516) içinde. Ankara, Türkiye.
- Tosun, H., Yılmaz, G. ve Yıldız, G. (2007, 28-30, Mayıs). Dolgu barajlarda inşa edilen geçirimsizlik perdeleri ve ülkemizdeki uygulama esasları. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (149-160) içinde. Ankara, Türkiye.

- Türköz, M., Aydın, E. C., Orhan, A., Öztürk, Ö., Gündüz, O. ve Tosun, H. (2007, 28-30, Mayıs). Dicle havzası büyük barajlarının toplam risk analizleri. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (363-372) içinde. Ankara, Türkiye.
- Türköz, M., Zorluer, İ., Şen, S. ve Tosun, H. (2009, 13-15, Mayıs). Önyüzü beton kaplı kaya dolgu barajlarda statik deformasyon ve gerilmeler için mükayeseli analiz. H. Tosun, E. Seyrek, M. Türköz, H. Savaş, A. Orhan (Ed.), *Uluslararası Katılımlı II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (837-846) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Ulusoy, İ. C. (2015). *Dolgu barajların güvenliğinde risk analizi: Atatürk Barajı örneği* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Unutmaz, B. ve Çetin, K. Ö. (2007, 28-30, Mayıs). Toprak dolgu barajların sismik tepki ve zemin sıvılaşması analizleri. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (387-398) içinde. Ankara, Türkiye.
- Uzel, T., Eren, K., Gülal, E. ve Güzel, G. (2012, 10-12, Ekim). Baraj güvenlik ölçümleri ve baraj bilgi sistemi. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş (Ed.), *Uluslararası Katılımlı III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (53-63) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Uzel, T., Erkaya, H., Hoşbaş, R. G. ve Gülal, E. (2007, 28-30, Mayıs). Barajların güvenliği: Uygulamadan örnekler. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (373-386) içinde. Ankara, Türkiye.
- Yenigün, G. ve Yüzcül, F. (2013, 22-24, Mart). Baraj güvenliği açısından tip seçimi: ÖYBK barajlarda etken faktörler ve Ilısu Barajı örneği. *3. Bursa Uluslararası Su Kongresi ve Sergisi* içinde. Bursa, Türkiye.
- Yenigün, K. (2007, 28-30, Mayıs). Dolusavaklarda taşkına dayalı güvenilirlik ve BARAJ_RISK programıyla risk analizi uygulaması. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (301-318) içinde. Ankara, Türkiye.
- Yenigün, K. ve Erkek, C. (2002, 6-8, Haziran). Risk mühendisliği yaklaşımıyla baraj güvenliğinin irdelenmesi. *GAP IV. Mühendislik Kongresi* içinde. Şanlıurfa, Türkiye.
- Yenigün, K. ve Sepetçioğlu, M. Y. (2012, 10-12, Ekim). Güncel baraj hasarlarının analizi. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş (Ed.), *III. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (393-401) içinde. Eskişehir, Türkiye.
- Yenigün, K. ve Yüzcül, F. (2014, 9-11, Ekim). Baraj elemanlarının tasarım ve yapım aşamasında baraj güvenliği kıstasıyla irdelenmesi; Ilısu Barajı Örneği. M. E. Emiroğlu, M. Tunç (Ed.), *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (469-487) içinde. Elazığ, Türkiye.
- Yıldız, D. (1992). Baraj güvenliği ve barajlarda kapaklı veya kapaksız dolusavakların tercihi üzerine düşünceler. *DSİ Teknik Bülteni*, 75(3-25).
- Yıldız, D. (2018). Su yönetimi ve barajların güvenliği ilişkisi. *World Water Diplomacy & Science News*, 2018(10003), 1-6.

- Yıldız, G. . (2007, 28-30, Mayıs). Tarihte baraj yıkılmaları ve yıkılmalarından öğrenilenler. H. Tosun, M. Türköz, H. Savaş, E. Sevrek (Ed.), *1. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi* (701-717) içinde. Ankara, Türkiye.
- Yunatçı, A. A., Çetin, K. Ö., Bilge, H. T. ve Özdemir, G. (2014, 9-11, Ekim). Baraj performans izleme sistemlerinde ihtiyaç belirlemesinden veri çözümlemesine uzanan sürecin değerlendirilmesi. M. E. Emiroğlu, M. Tunç (Ed.), *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu* (117-126) içinde. Elazığ, Türkiye.
- Yücer, G. (2012, Kasım). Barajlarda yapı performansı. https://www.jeofizik.org.tr/resimler/ekler/bbe8e153934b327_ek.pdf?dergi=34 adresinden 13.10.2022 tarihinde alınmıştır.

EKLER

EK A. Sahalardan alınan numunelerin laboratuvarında elde edilen deney sonuçları

EK B. Hatalı olduğu düşünölen ve revize edilen ölçümlere ait grafikler

EK C. Plaxis programına ait çıktıları

EK A**Tablo A.1.** (4-A) (R-A) (Ku-A) kaya malzeme özellikleri.

Numune Ocağı	Birim Ağırlık gr/cm ³	Su Emme %	Görünen Porozite %	Los Angeles Aşınma Kaybı		Basınç Dayanımı kgf/cm ²	Na ₂ SO ₄ Don Kaybı %
				100 D %	500 D %		
T1	2,63	0,6	1,6	10,9	37	460 620 620	1,5
T2	2,63	0,9	2,4	9,6	40	370 440 480	0,3
T3	2,64	0,7	1,8	8	30,3	410 450 460	0,5

Tablo A.2. (4-B) (R-B) (Ku-B) kaya malzeme özellikleri.

Numune Ocağı	Birim Ağırlık gr/cm ³	Su Emme %	Görünen Porozite %	Los Angeles Aşınma Kaybı		Basınç Dayanımı kgf/cm ²	Na ₂ SO ₄ Don Kaybı %
				100 D %	500 D %		
T1	2,7	0,4	1,1	14,1	58	380 475 560	1

Tablo A.3. (4-C) (R-C) (Ku-C) kaya malzeme özellikleri.

Numune Ocağı	Birim Ağırlık gr/cm ³	Su Emme %	Görünen Porozite %	Los Angeles Aşınma Kaybı		Basınç Dayanımı kgf/cm ²	Na ₂ SO ₄ Don Kaybı %
				100 D %	500 D %		
T1	2,66	0,3	0,8	10,2	39,7	405 570 680	1

Tablo A.4. (3-A) (F-A) (Ag-A) geçirimli malzeme özellikleri.

Numune No	Birim Ağırlık gr/cm ³		Su Emme %		200 Nolu Elekten Geçen %	
	Kum	Çakıl	Kum	Çakıl	Kum	Çakıl
501	1,596	1,729	1	1,1	3,2	0,5
502	1,631	1,752	1	1,2	8,3	0,5
504	1,635	1,753	0,6	0,5	1	0,1
506	1,575	1,703	1,8	1,3	10	0,5
508	1,702	1,706	1,9	1,1	8,1	0,5
512	1,715	1,738	1,5	1,3	4,8	1
514	1,716	1,737	1,4	1,3	5,7	0,4
518	1,646	1,716	0,4	1,3	11,2	0,6
519	1,715	1,738	0,4	1,3	7,1	0,7
522	1,715	1,738	0,9	0,8	2,6	0,9
527	1,663	1,683	0,6	0,9	8	0,8
529	1,664	1,69	0,6	0,9	2,5	0,2
531	1,634	1,693	0,7	0,5	1,1	0,2
533	1,642	1,706	0,8	1,2	7,2	1,3
535	1,643	1,709	0,8	1	4,6	0,33
540	1,646	1,746	1	0,8	4,4	0,3
542	1,644	1,745	1	0,8	2,7	0,3
545	1,676	1,629	0,4	1,6	1,2	0,2
548	1,692	1,686	1	0,9	2,9	0,3
551	1,718	1,645	2,5	1,7	6,4	0,5
553	1,733	1,68	2,7	1,3	5,5	0,5
554	1,668	1,662	2,5	1,9	4,1	1
555	1,7	1,667	2	1,6	5,3	0,5
556	1,668	1,663	3,4	1,7	11	0,5

Tablo A.5. A geçirimsiz malzeme özellikleri.

Numune No	Sıkıştırma		Üç Eksenli Kesme Deneyi		Grup Simgesi
	γ_k max gr/cm ³	W _{opt} %	c kg/cm ²	Ø °	
202	2	11			SC-CL
203	1,962	12,1			SC-CL
204	1,963	12,2			SC-CL
207	1,854	12,9	1,2	22	SC-CL
210	1,86	15,2	0,55	6	SC-CL
214	1,786	17,4			SC-CL
217	1,802	14,1			SC-CL
279	1,83	15,8			SC-CL
220	1,896	14,3			SC-CL
224	1,956	11,6			SC-CL
226	1,857	15			SC-CL
228	1,98	12,7			SC-CL
231	1,946	12,7			SC-CL
233	1,83	15,6			SC-CL
234	1,938	13,1			SC-CL
236	1,84	17,5	1,12	29	SC-CL
242	1,885	13,3			SC-CL
245	1,784	17	0,8	15	SC-CL
241	1,806	16			CL
249	1,856	14,8	1,75	18	SC-CL

Tablo A.6. E geçirimsiz malzeme özellikleri.

Numune No	Sıkıştırma		Üç Eksenli Kesme Deneyi		Grup Simgesi
	γ_k max gr/cm ³	W _{opt} %	c kg/cm ²	Ø °	
301	1,82	14,6	1,42	16	SC-CL
307	1,858	15,9			SC-CL
310	1,892	14,2			SC-CL

Tablo A.7. C geçirimsiz malzeme özellikleri.

Numune No	Sıkıştırma		Üç Eksenli Kesme Deneyi		Grup Simgesi
	γ_k max gr/cm ³	W _{opt} %	c kg/cm ²	Ø °	
405	1,75	14,4			CL
408	1,886	12,6	1,78	18	CL

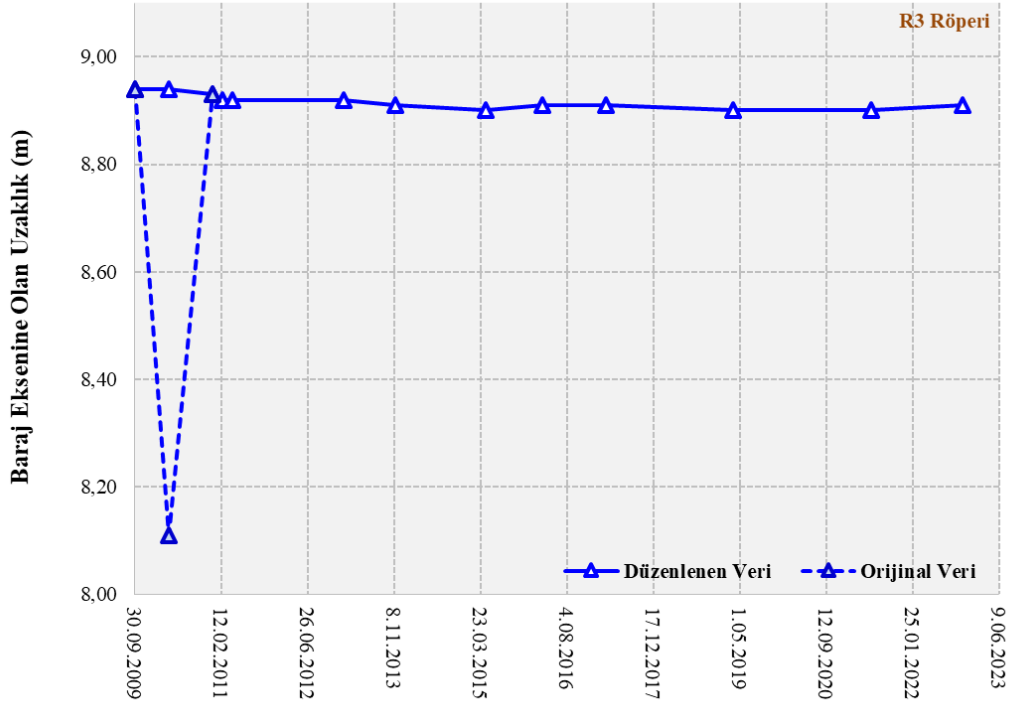
Tablo A.8. C geçirimsiz malzeme özellikleri.

Numune No	Sıkıştırma		Geçirimsizlik Katsayısı m/sn	Üç Eksenli Kesme Deneyi		Grup Simgesi
	γ_k^{\max} gr/cm ³	wopt %		c kg/cm ²	Ø °	
703	1,74	16,2				SC
706	1,92	12,8	2,14x10 ⁻⁹			SC
712	1,93	12,2				CL
718	1,8	15,3	Geçirimsiz			SC
725	1,82	14,8				SC

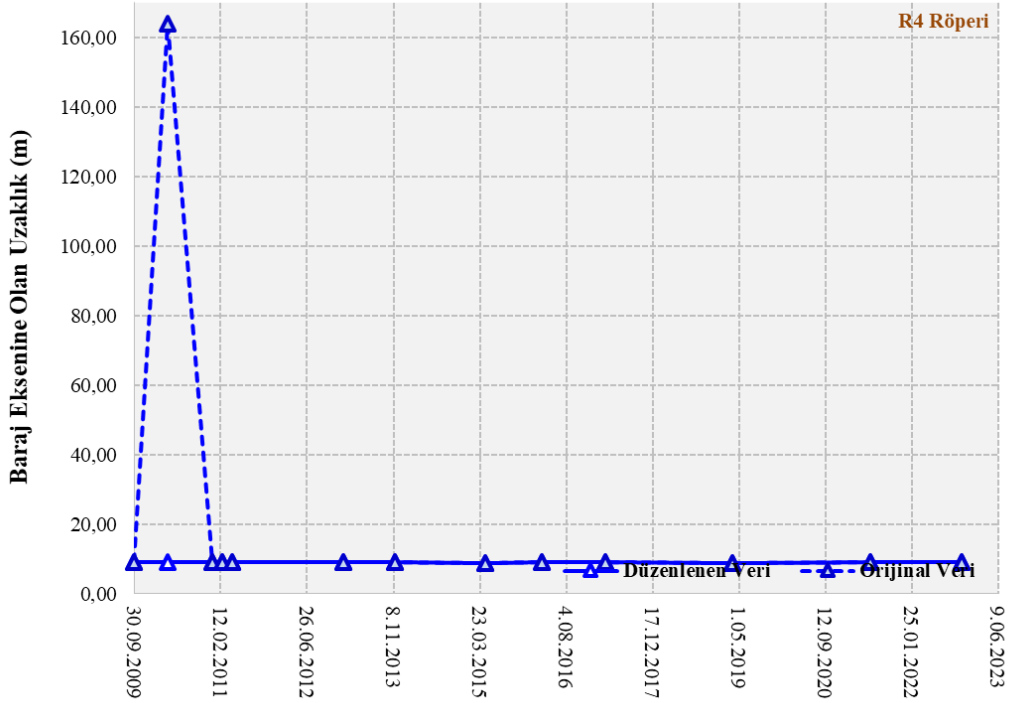
Tablo A.9. B geçirimsiz malzeme özellikleri.

Numune No	Sıkıştırma		Geçirimsizlik Katsayısı m/sn	Üç Eksenli Kesme Deneyi		Grup Simgesi
	γ_k^{\max} gr/cm ³	wopt %		c kg/cm ²	Ø °	
601	1,79	14,8	Geçirimsiz			CL
603	1,82	15,6				CL
606	1,68	17	2,5x10 ⁻⁷			SC
609	1,8	14,7				SC
611	1,82	14,6				CL
616	1,75	16,2	2,43x10 ⁻⁸			CL
618	1,84	12,8				CL

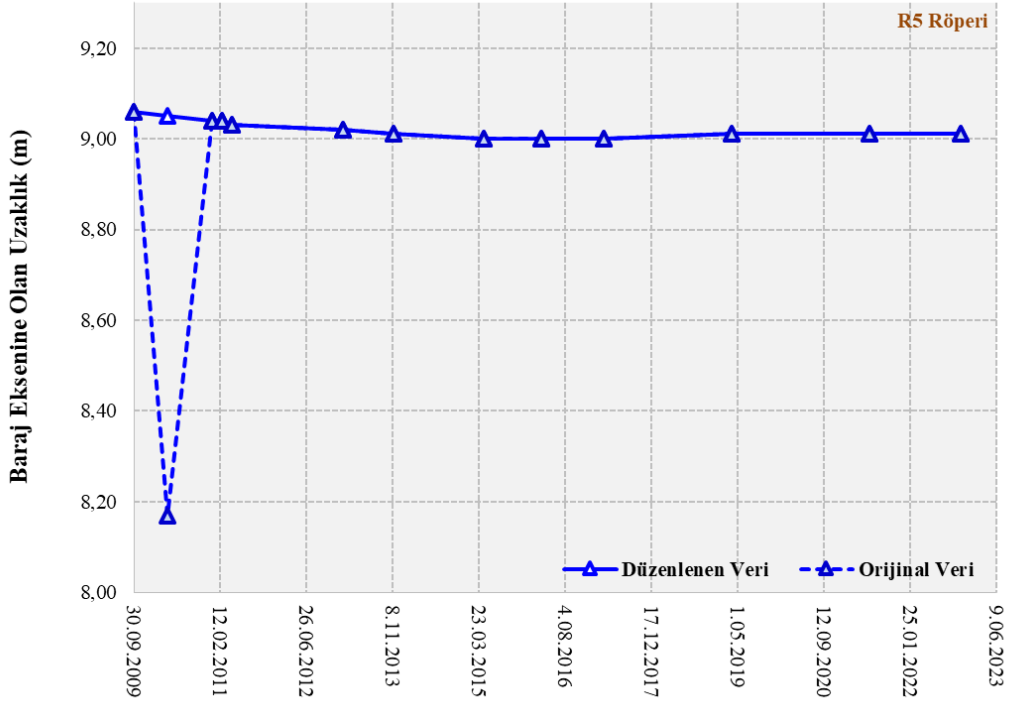
EK B



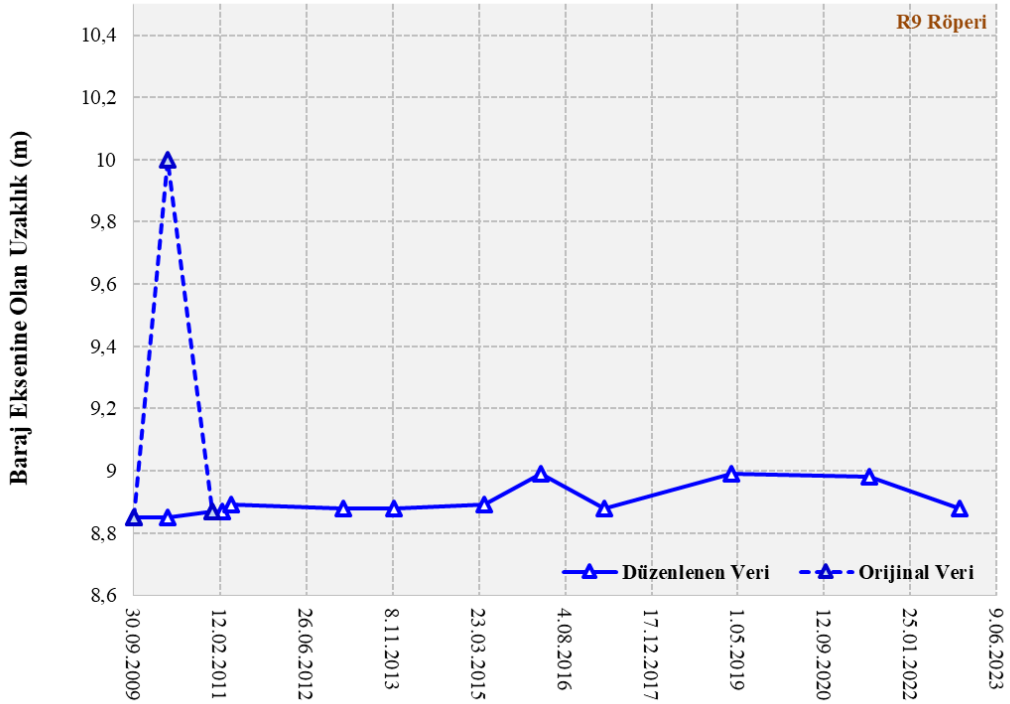
Şekil B.1. R3 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



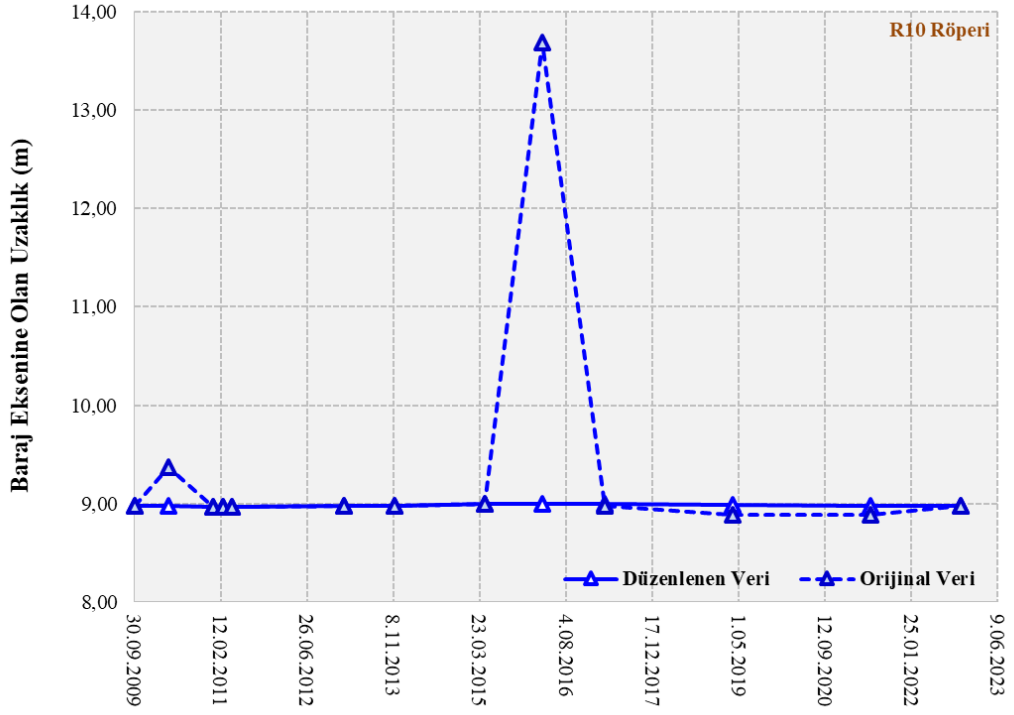
Şekil B.2. R4 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



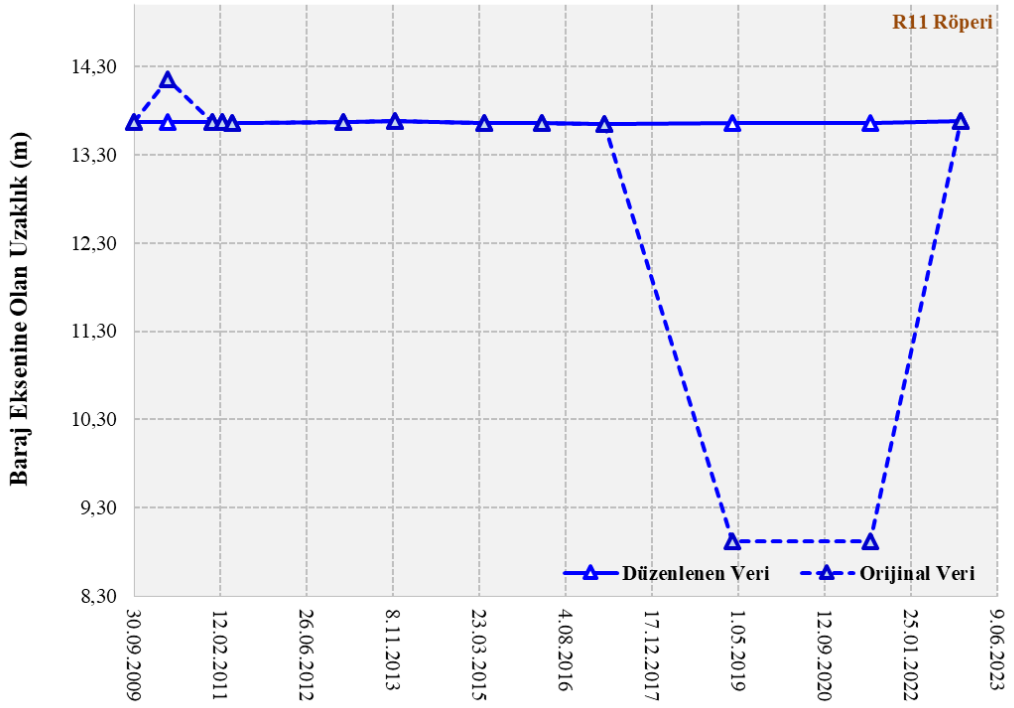
Şekil B.3. R5 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



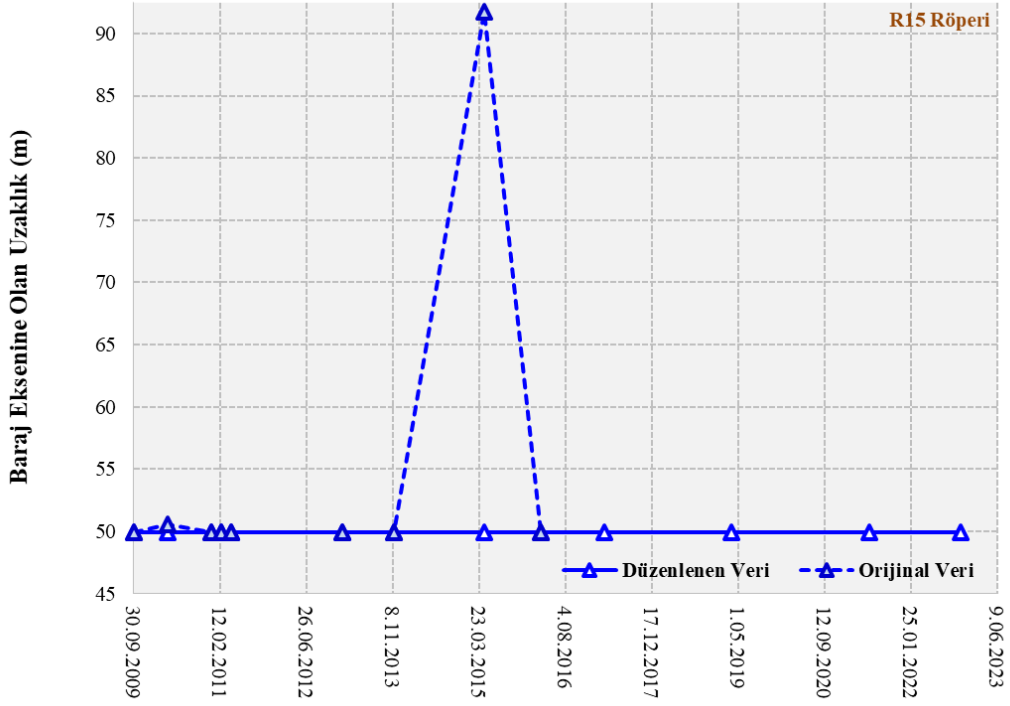
Şekil B.4. R9 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



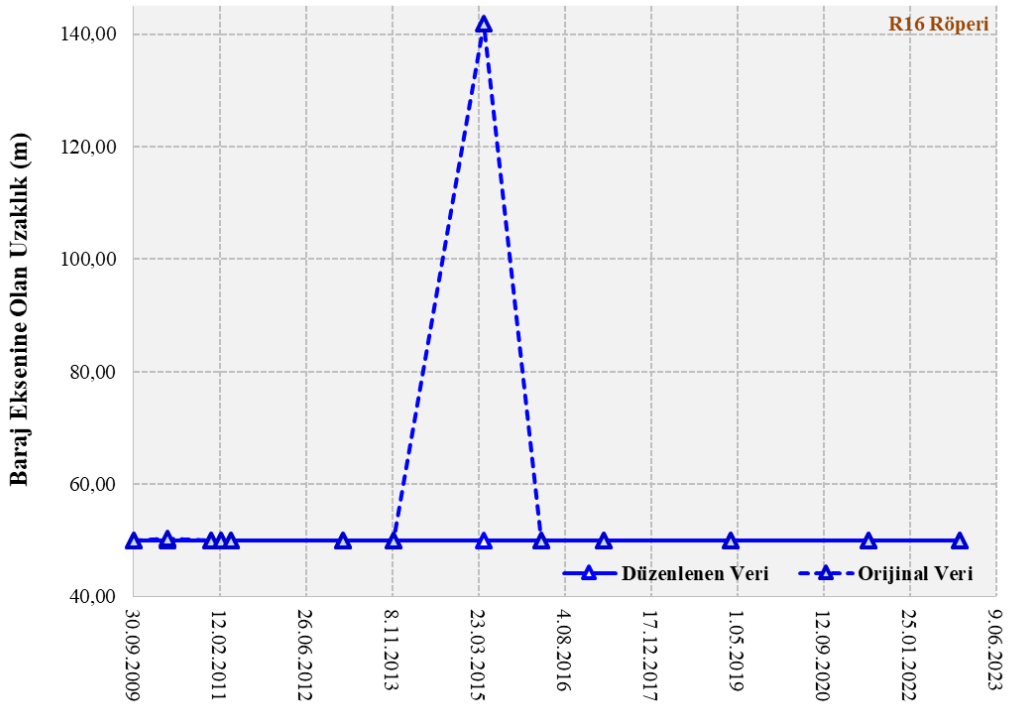
Şekil B.5. R10 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



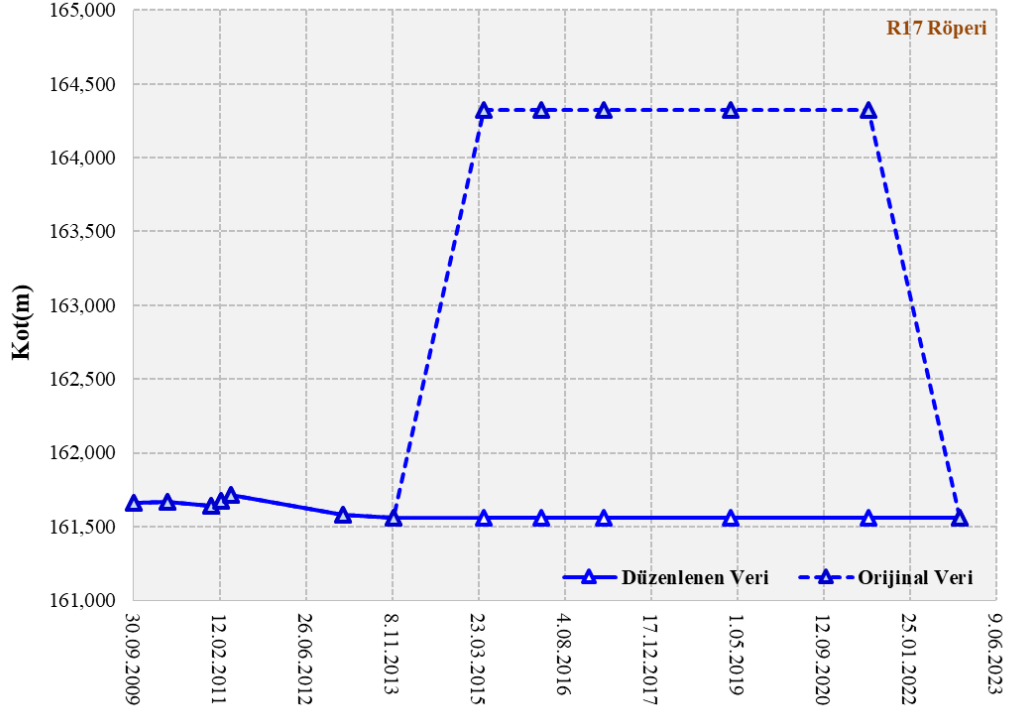
Şekil B.6. R11 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



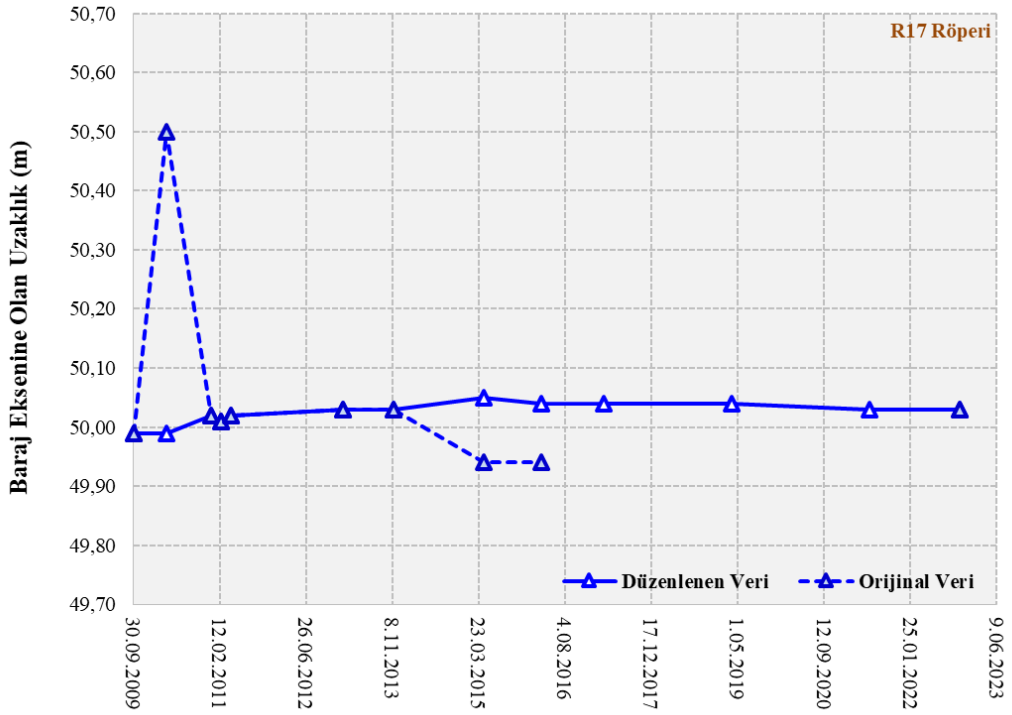
Şekil B.7. R15 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



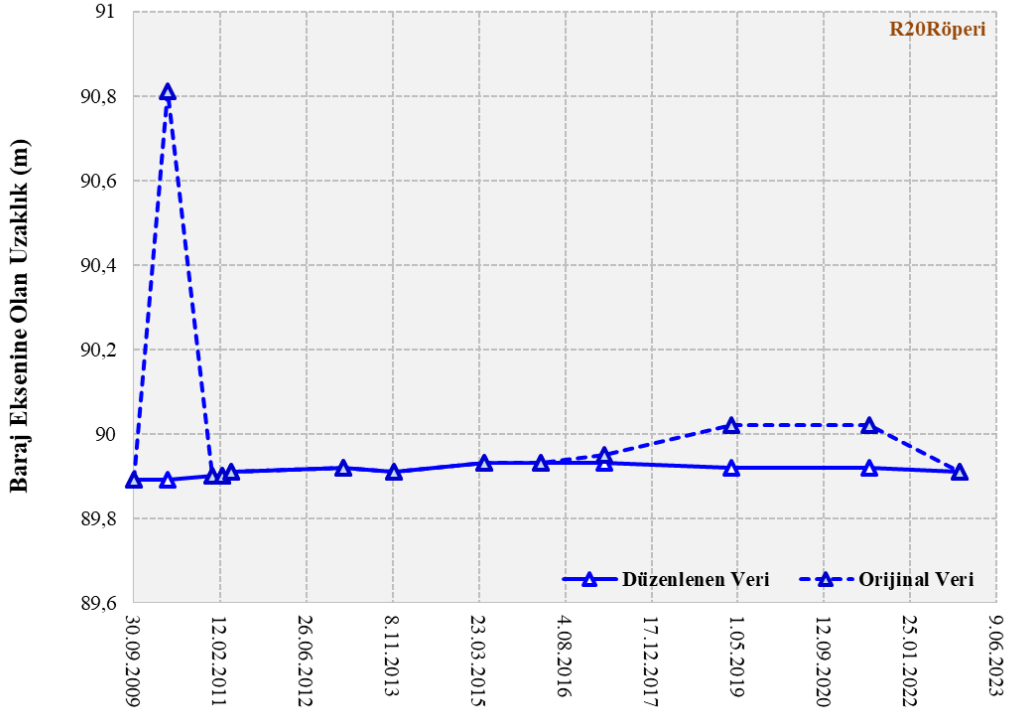
Şekil B.8. R16 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



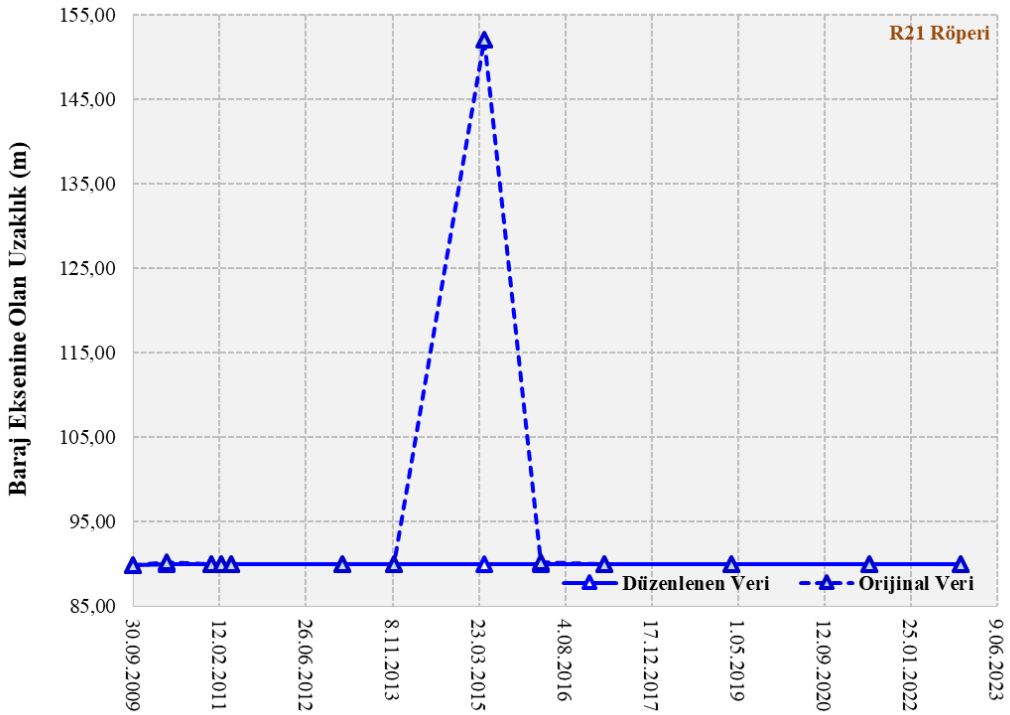
Şekil B.9. R17 röperinin kotuna ait veriler.



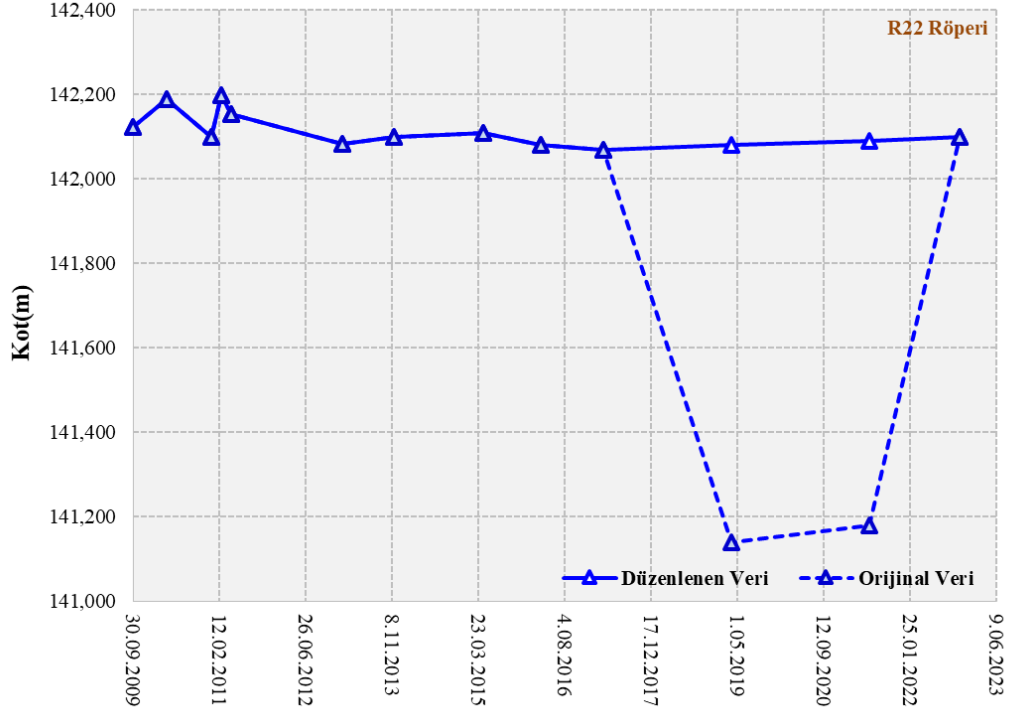
Şekil B.10. R17 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



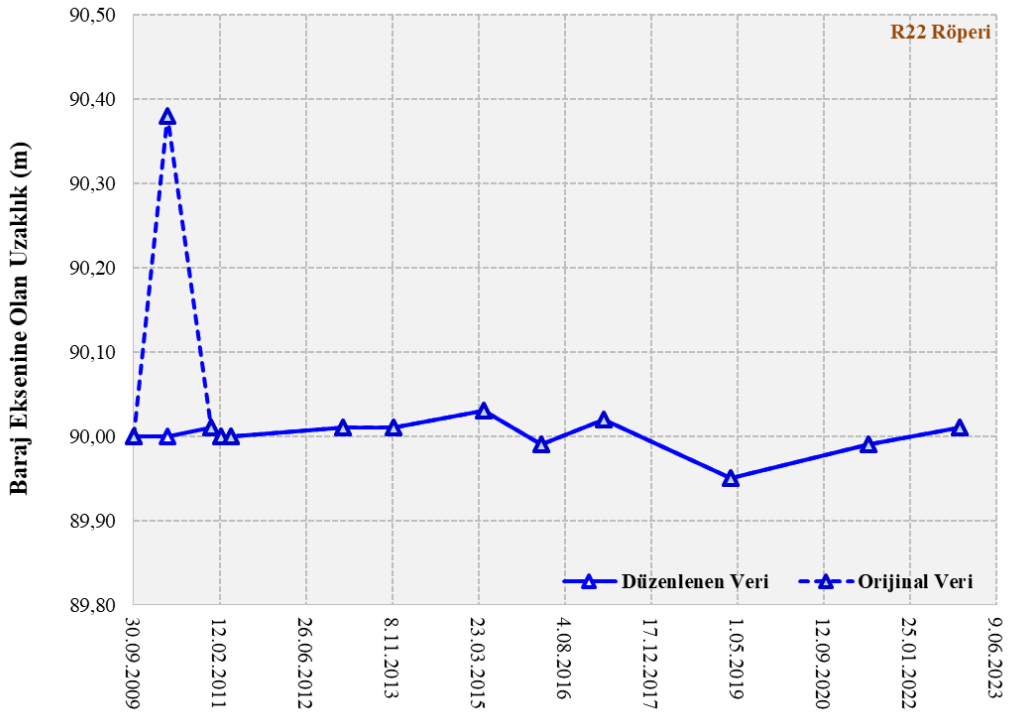
Şekil B.11. R20 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



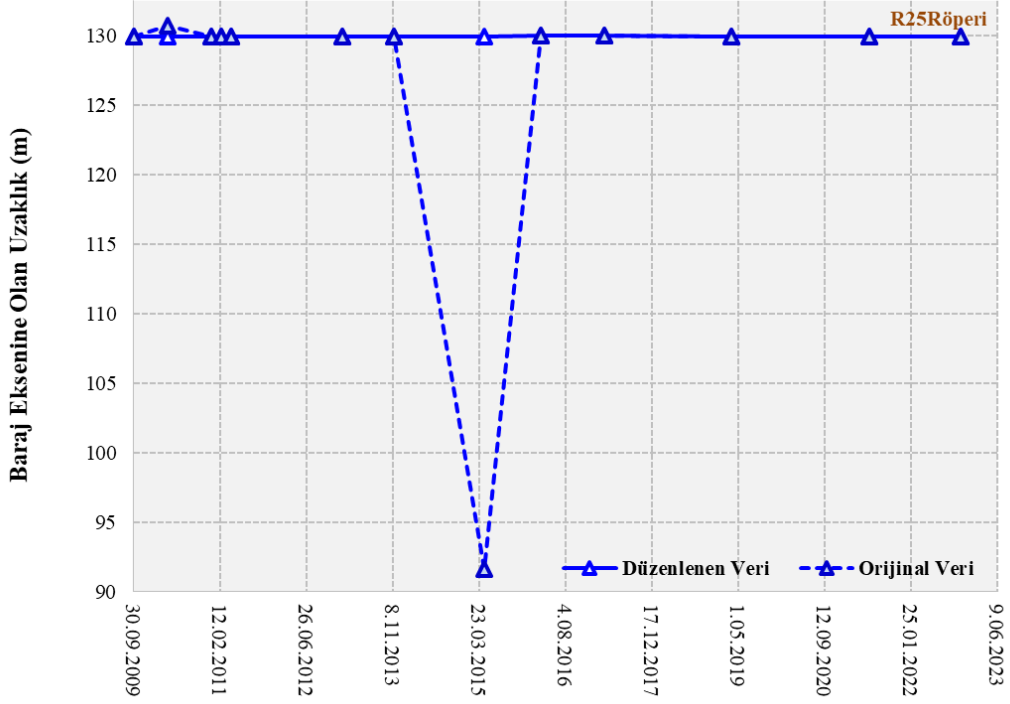
Şekil B.12. R21 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



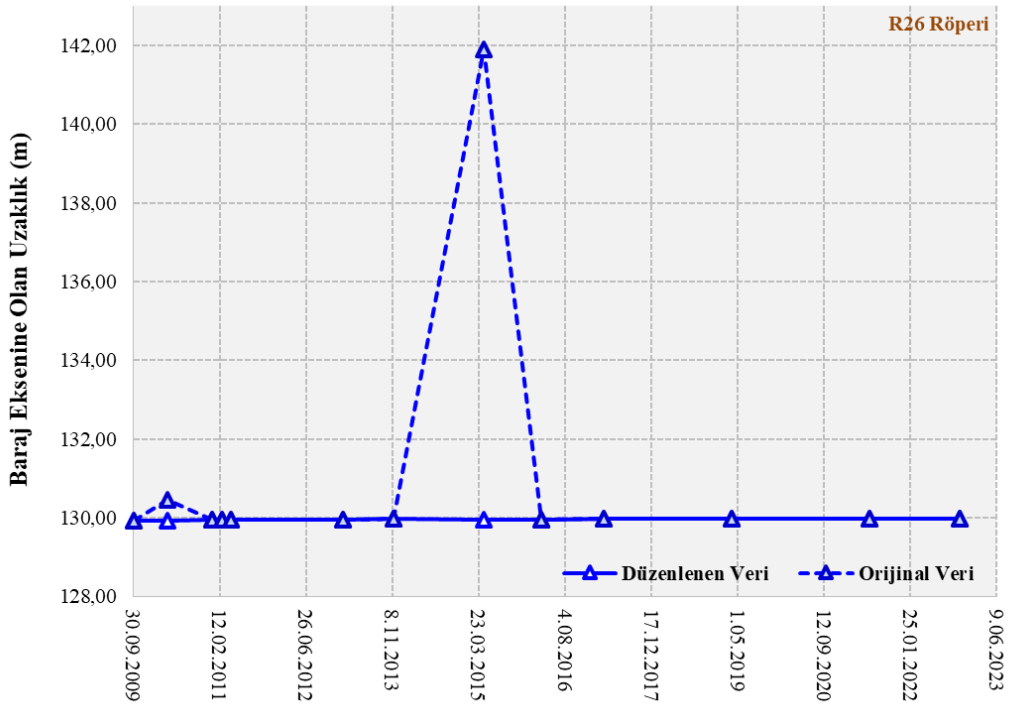
Şekil B.13. R22 röperinin kotuna ait veriler.



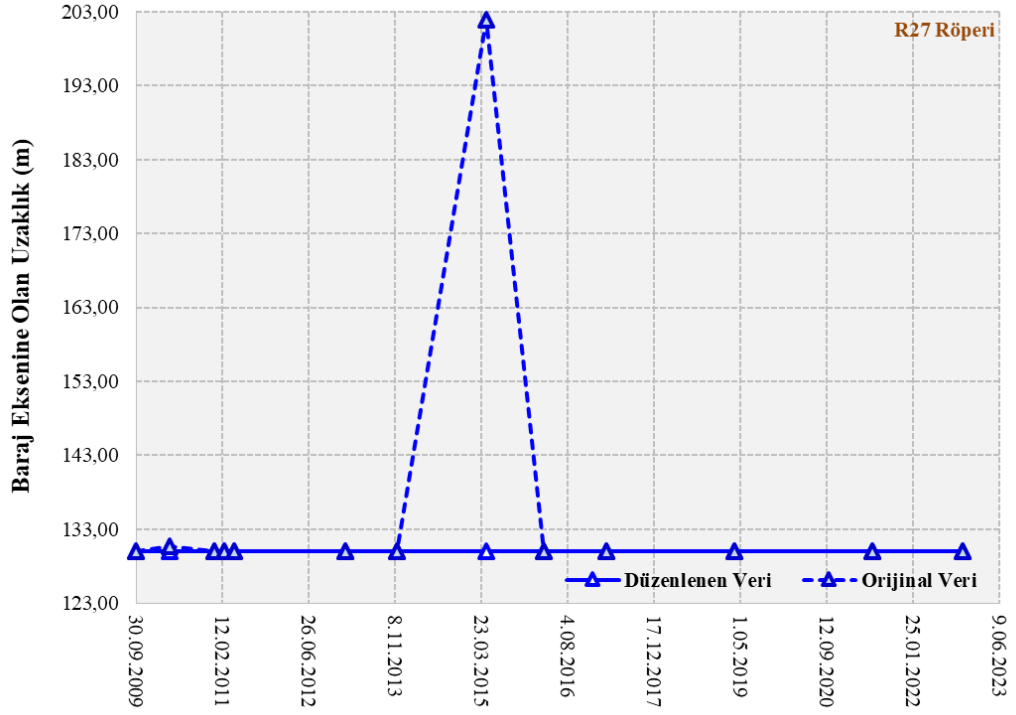
Şekil B.14. R22 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



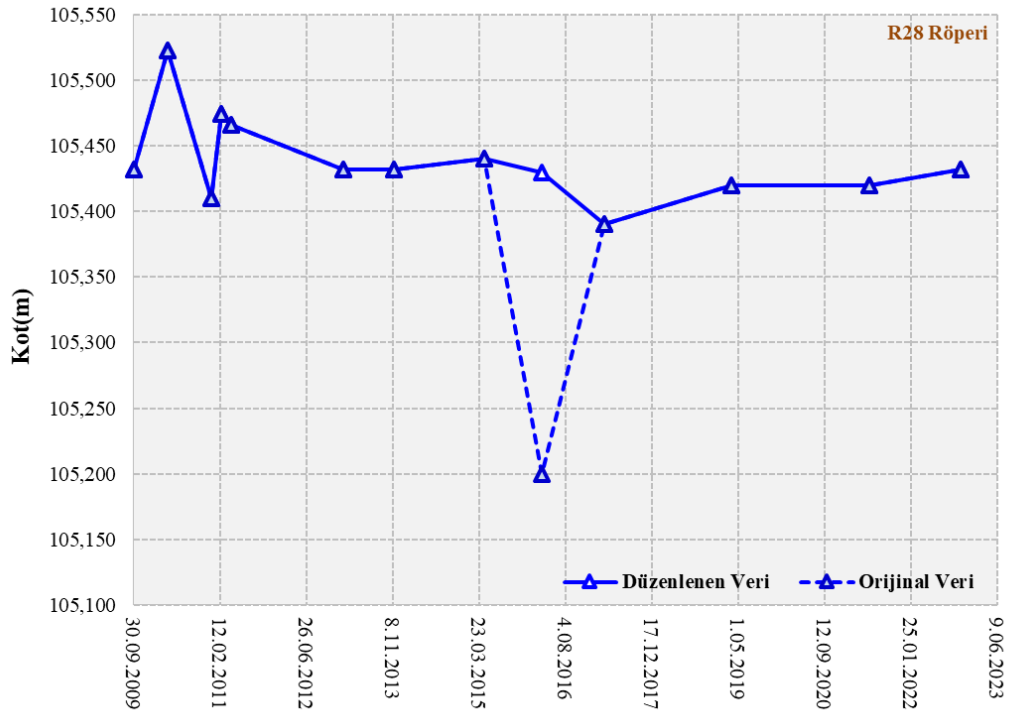
Şekil B.15. R25 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



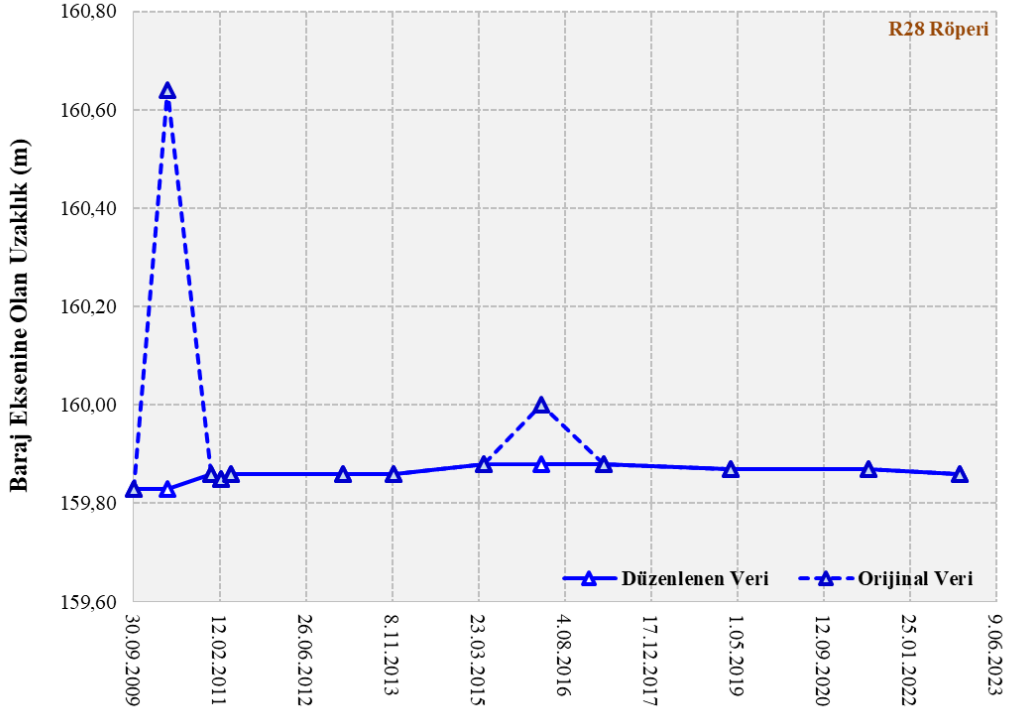
Şekil B.16. R26 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



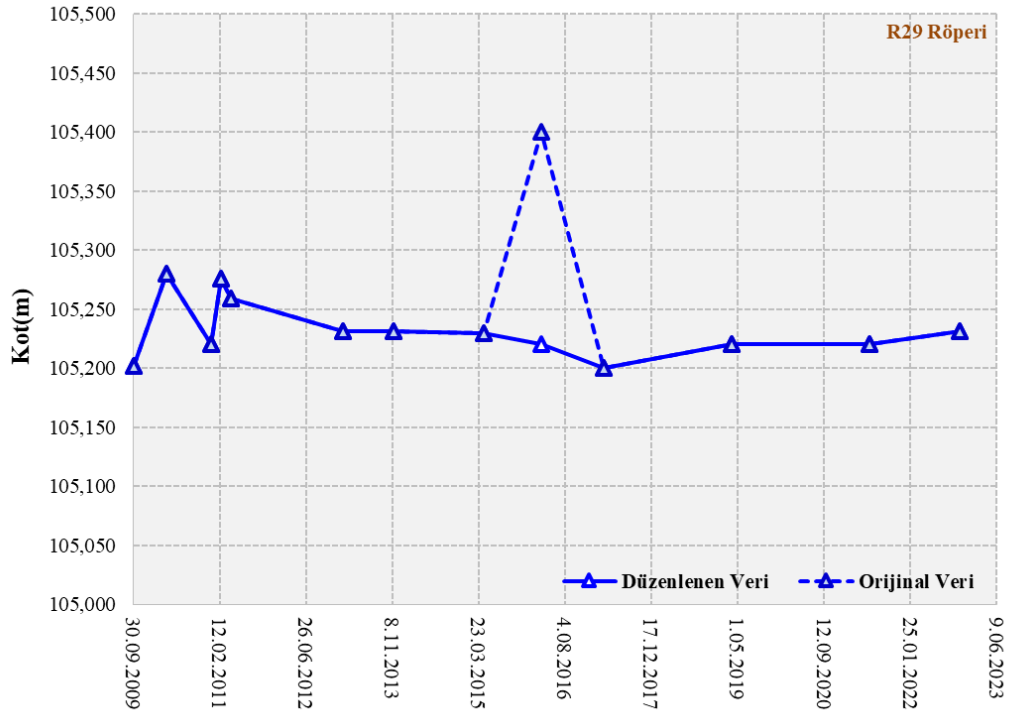
Şekil B.17. R27 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.



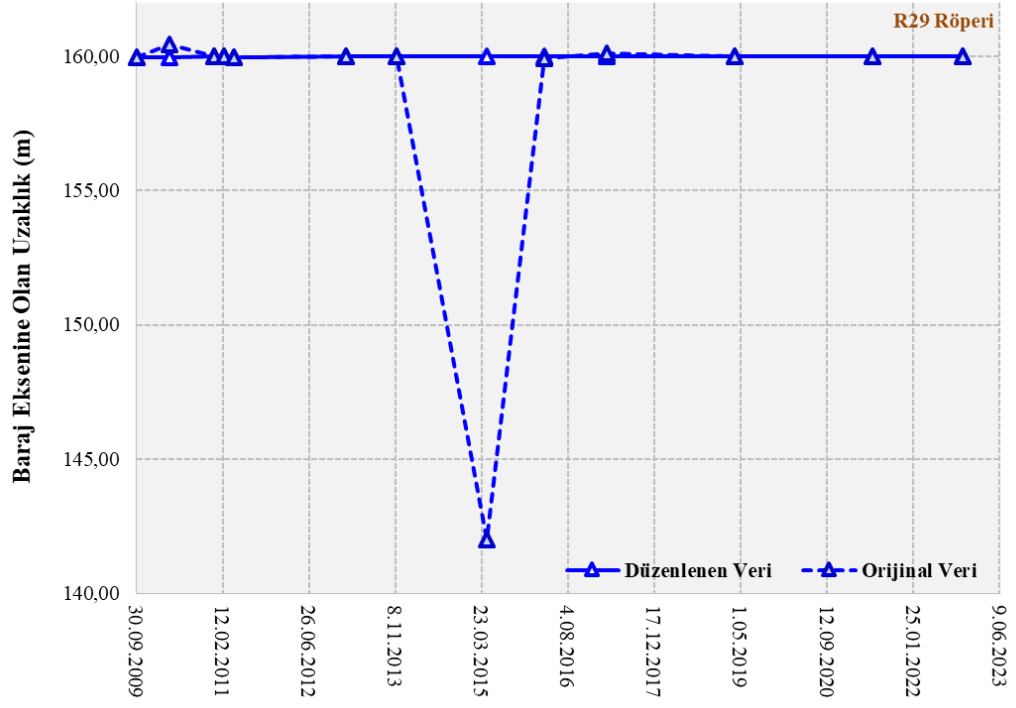
Şekil B.18. R28 röperinin kotuna ait veriler.



Şekil B.19. R28 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.

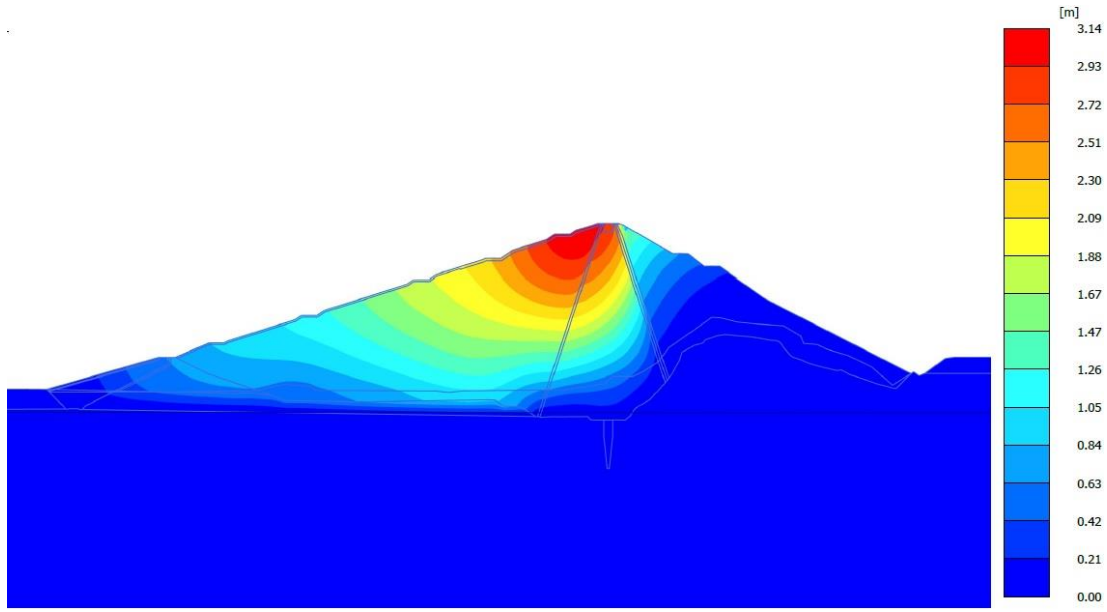


Şekil B.20. R29 röperinin kotuna ait veriler.

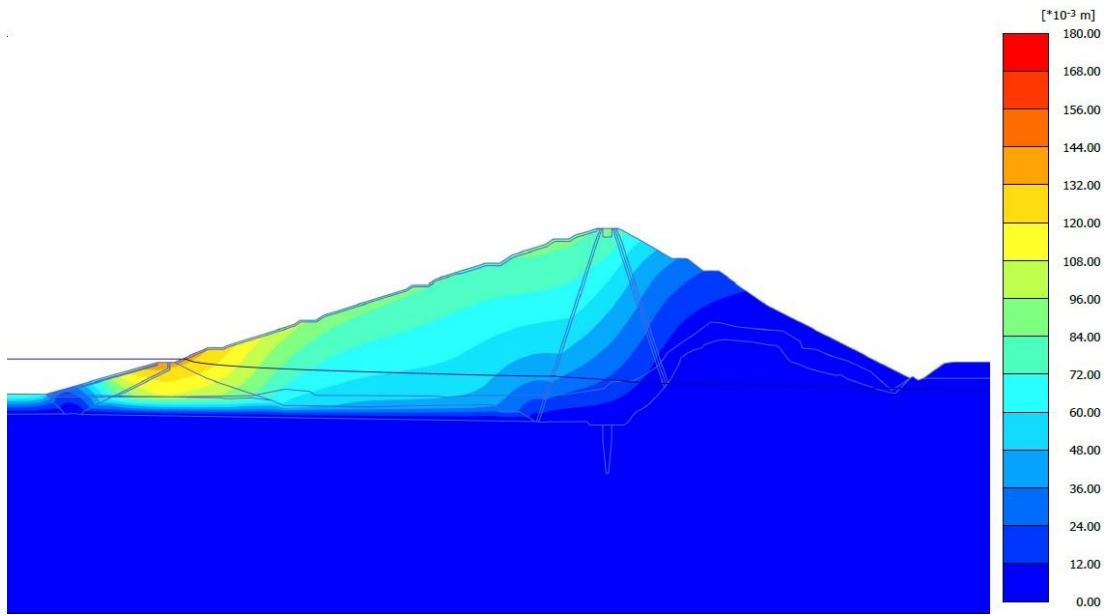


Şekil B.21. R29 röperinin baraj eksenine olan uzaklığına ait veriler.

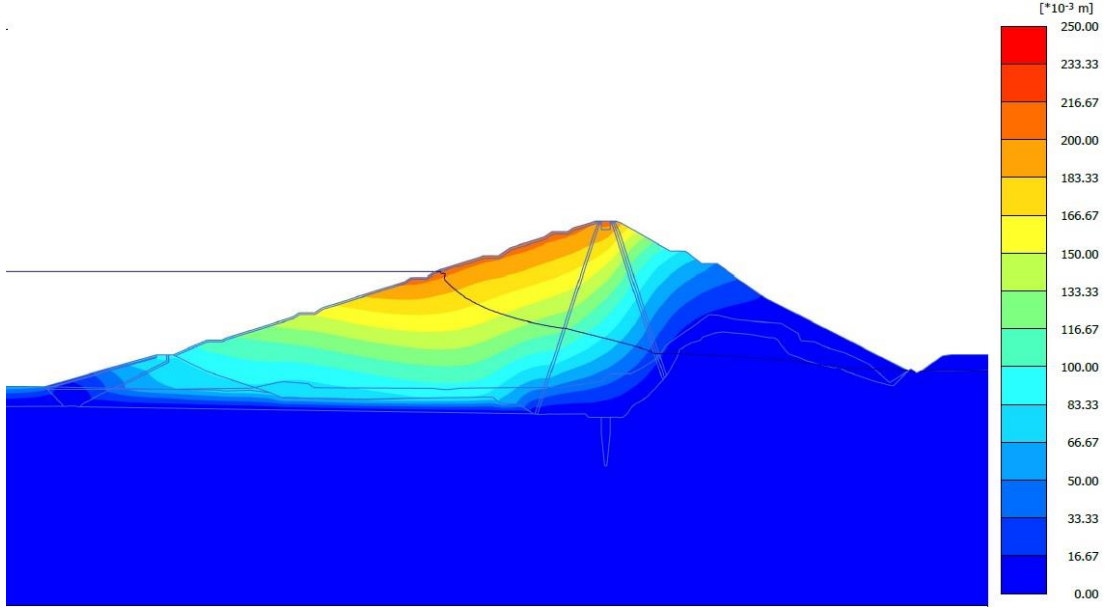
EK C



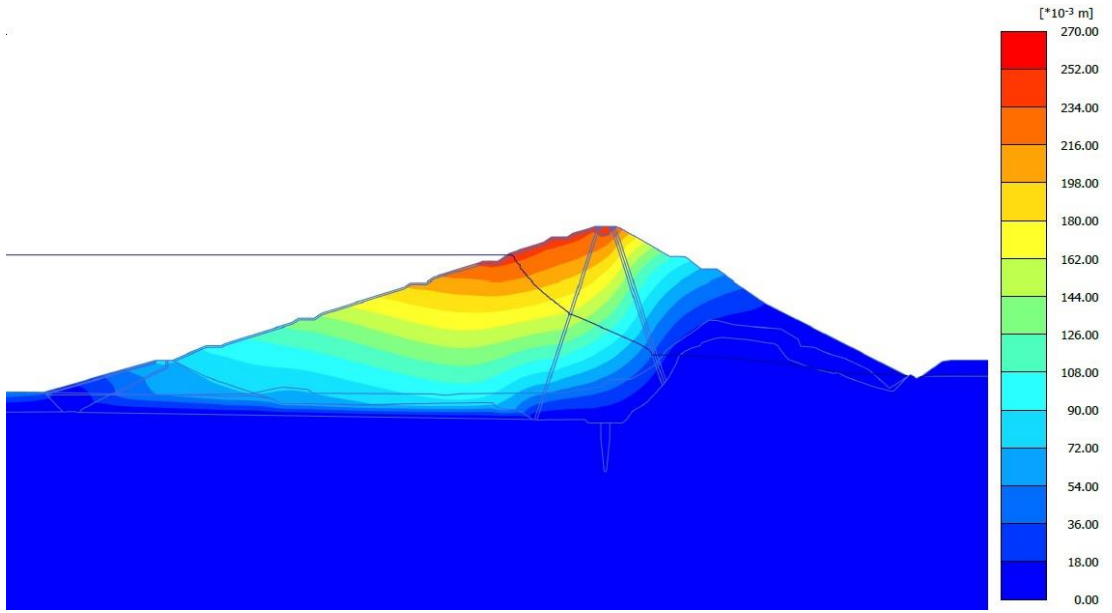
Şekil C.1. B3 kesitine ait 30.09.2009 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



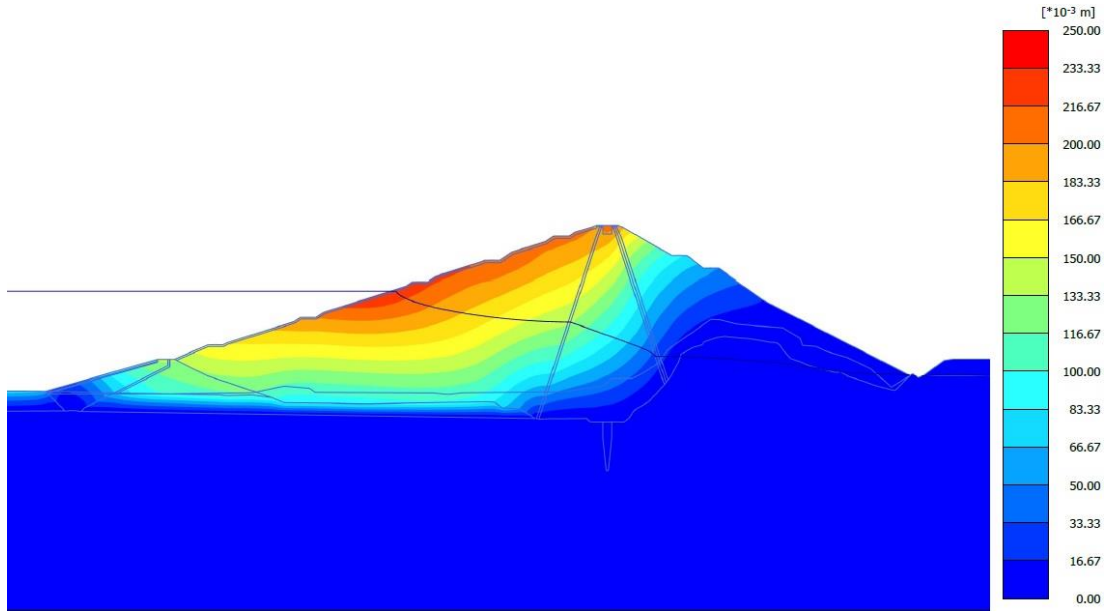
Şekil C.2. B3 kesitine ait 27.12.2010 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



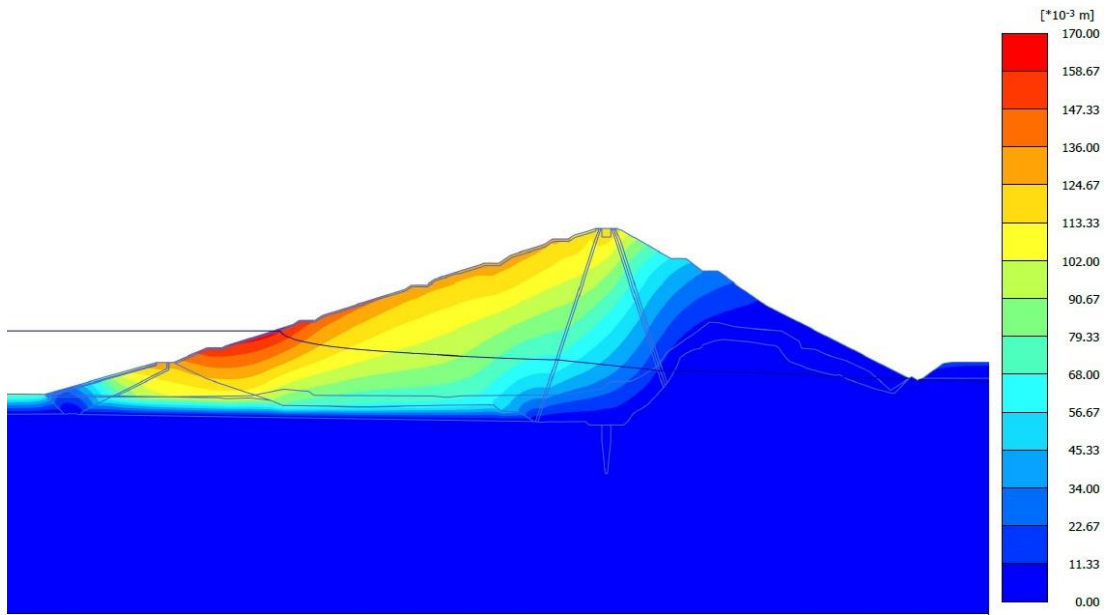
Şekil C.3. B3 kesitine ait 24.01.2013 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



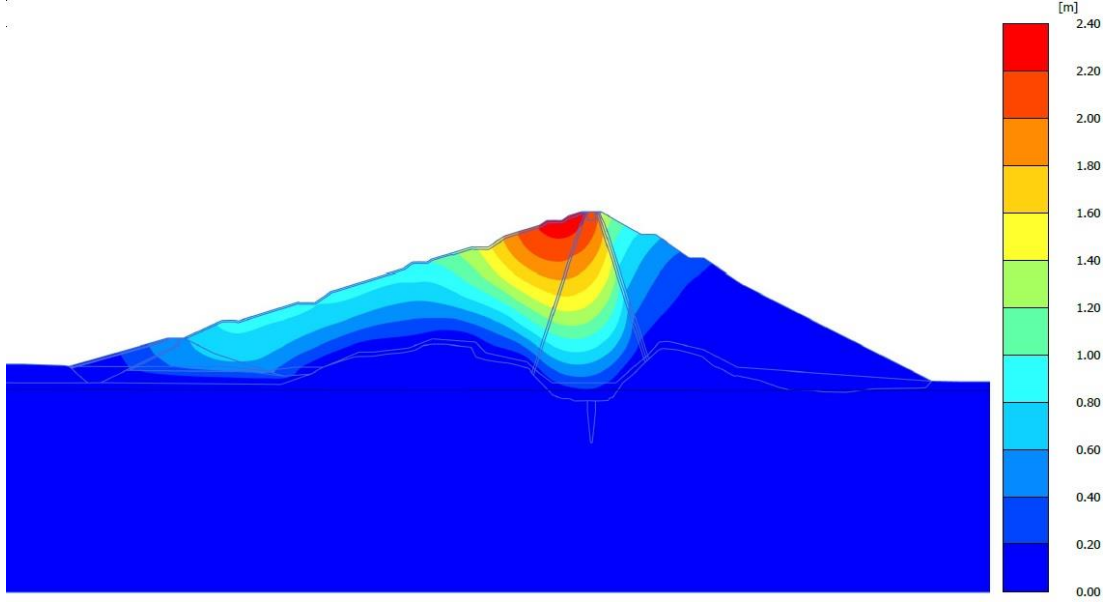
Şekil C.4. B3 kesitine ait 21.04.2015 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



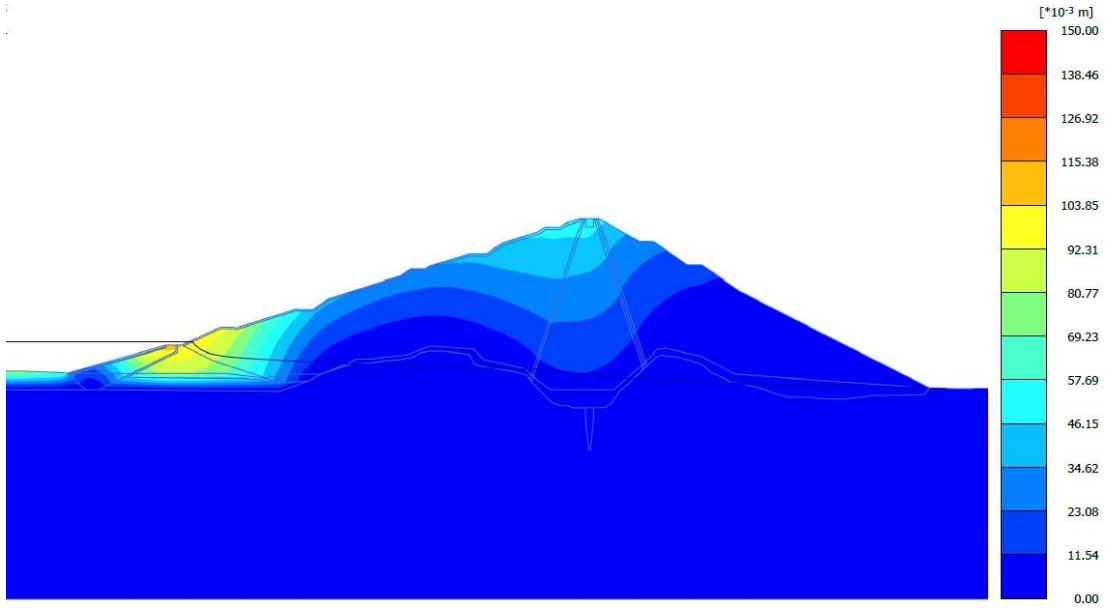
Şekil C.5. B3 kesitine ait 16.03.2017 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



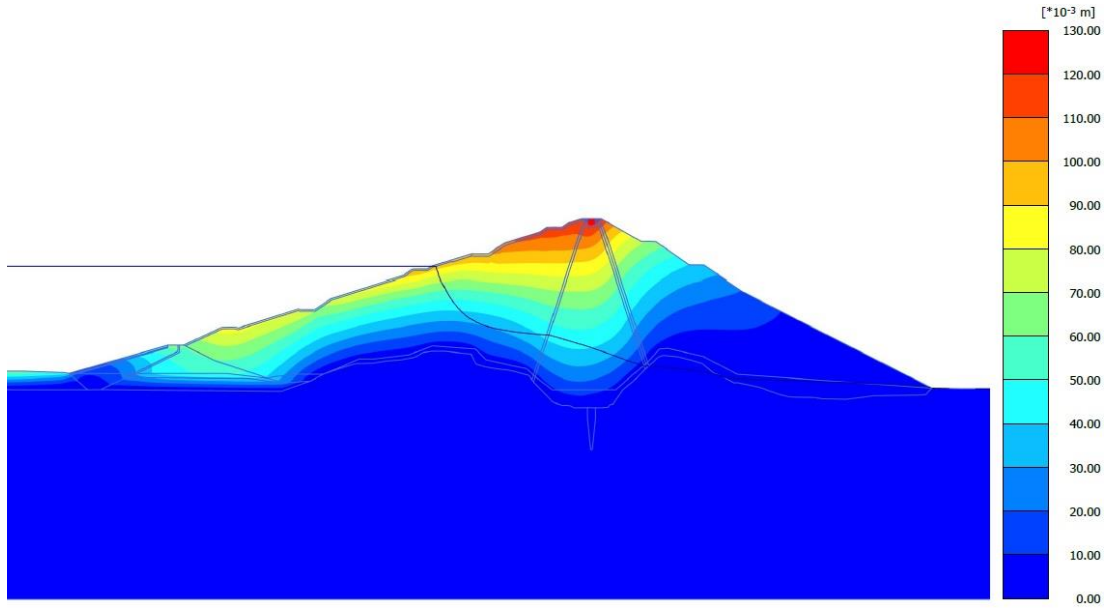
Şekil C.6. B3 kesitine ait 09.11.2022 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



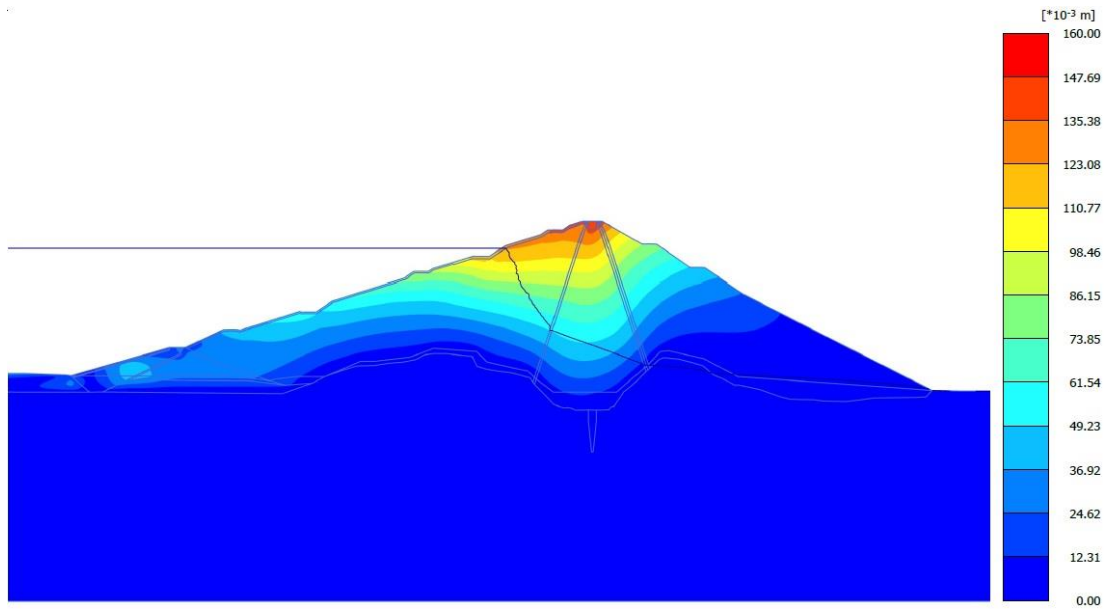
Şekil C.7. B4 kesitine ait 30.09.2009 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



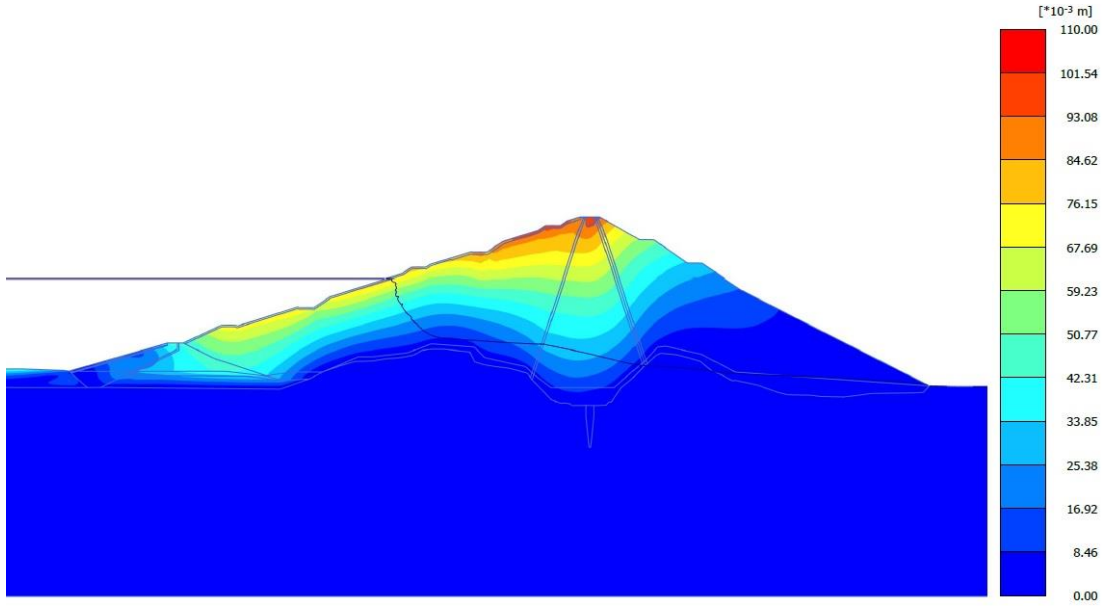
Şekil C.8. B4 kesitine ait 27.12.2010 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



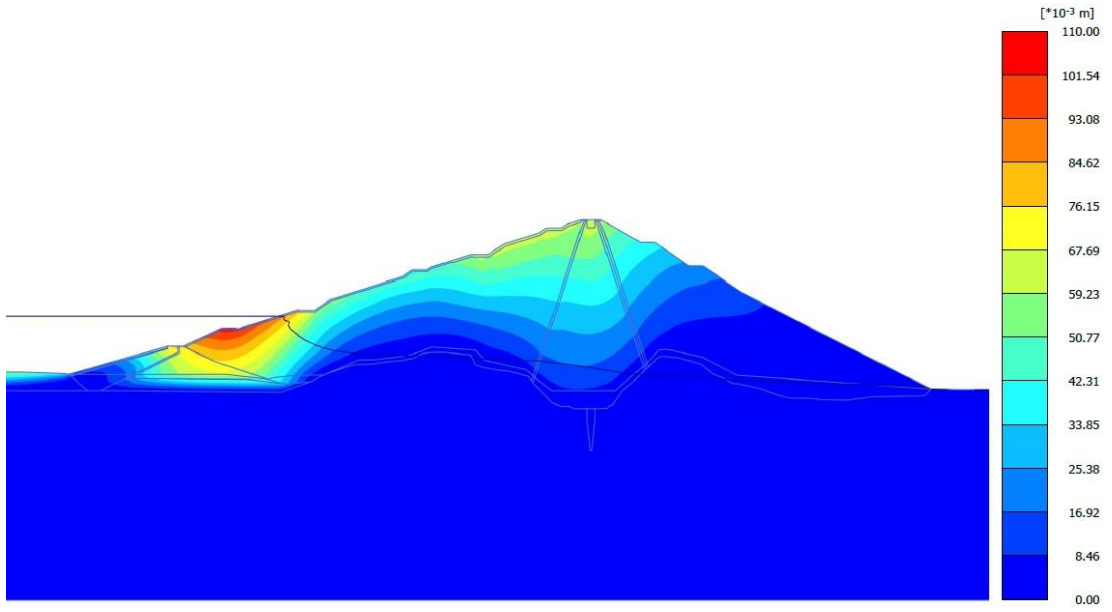
Şekil C.9. B4 kesitine ait 24.01.2013 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



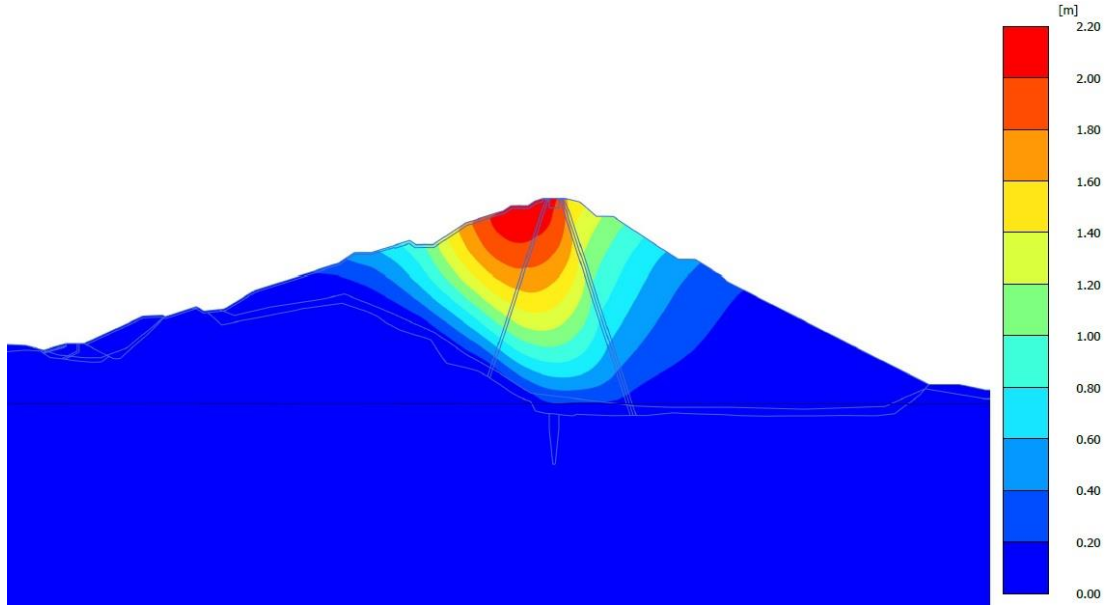
Şekil C.10. B4 kesitine ait 21.04.2015 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



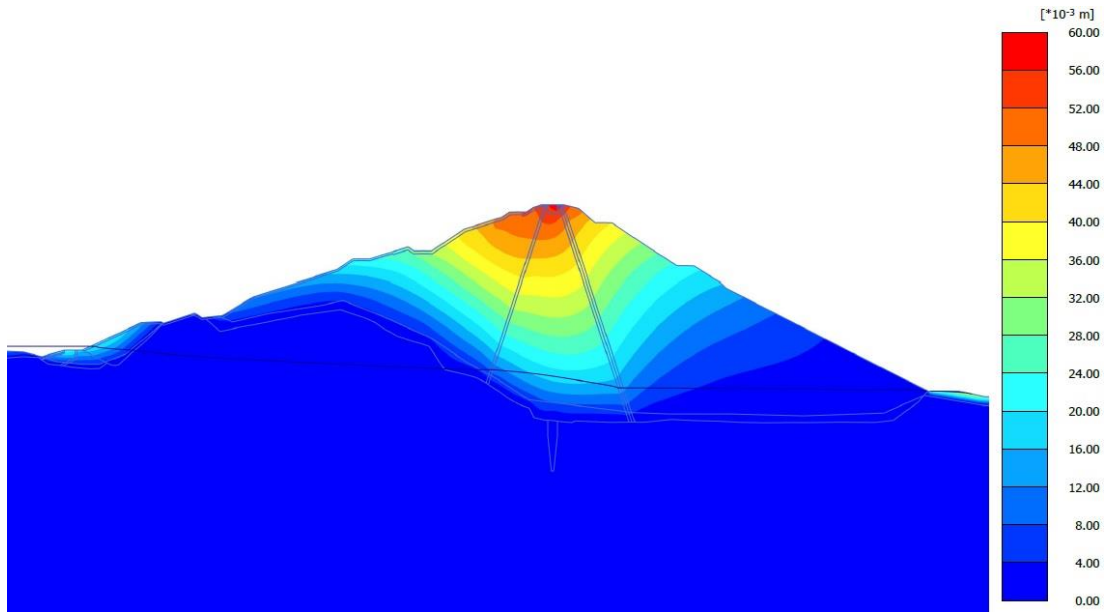
Şekil C.11. B4 kesitine ait 16.03.2017 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



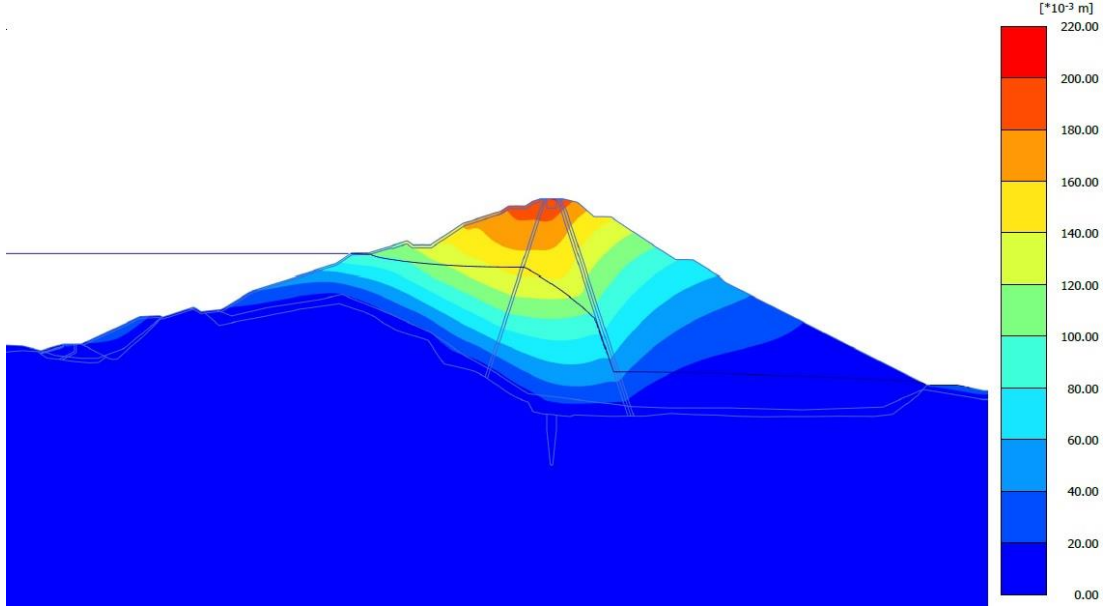
Şekil C.12. B4 kesitine ait 09.11.2022 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



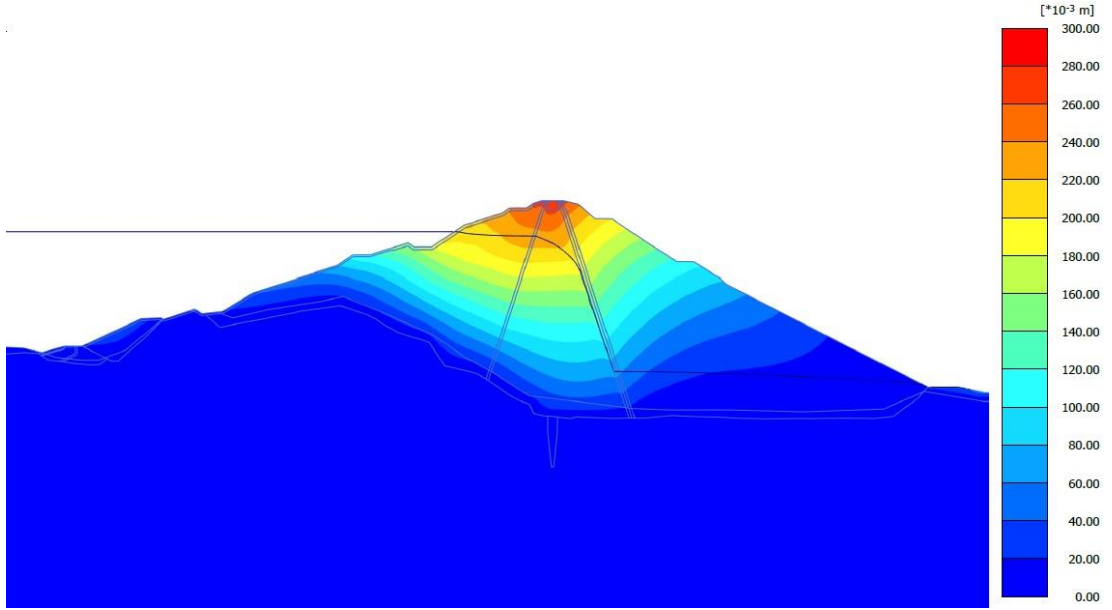
Şekil C.13. B5 kesitine ait 30.09.2009 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



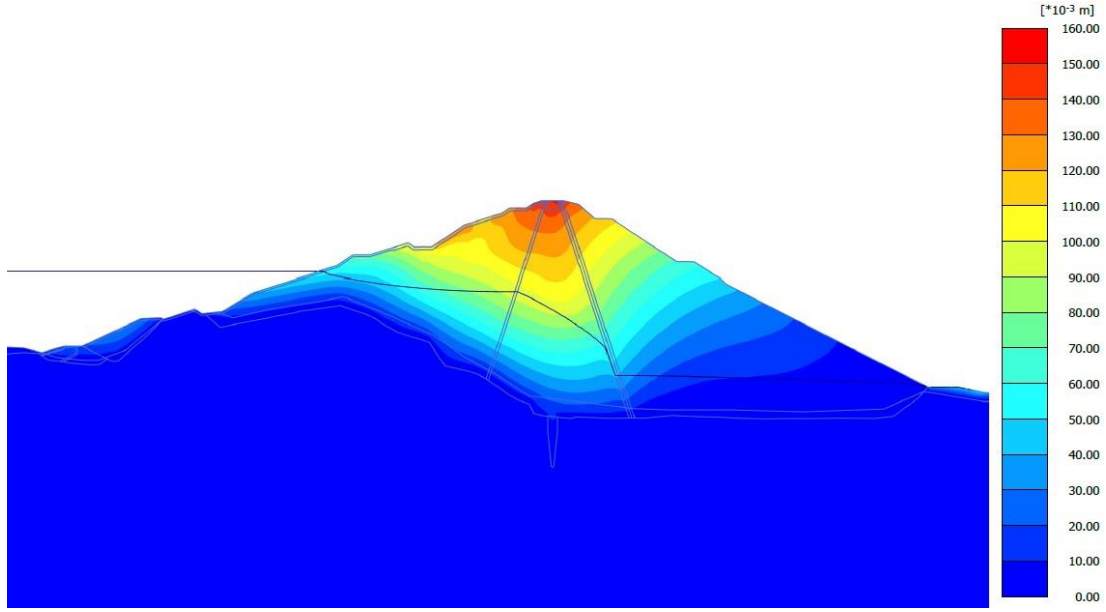
Şekil C.14. B5 kesitine ait 27.12.2010 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



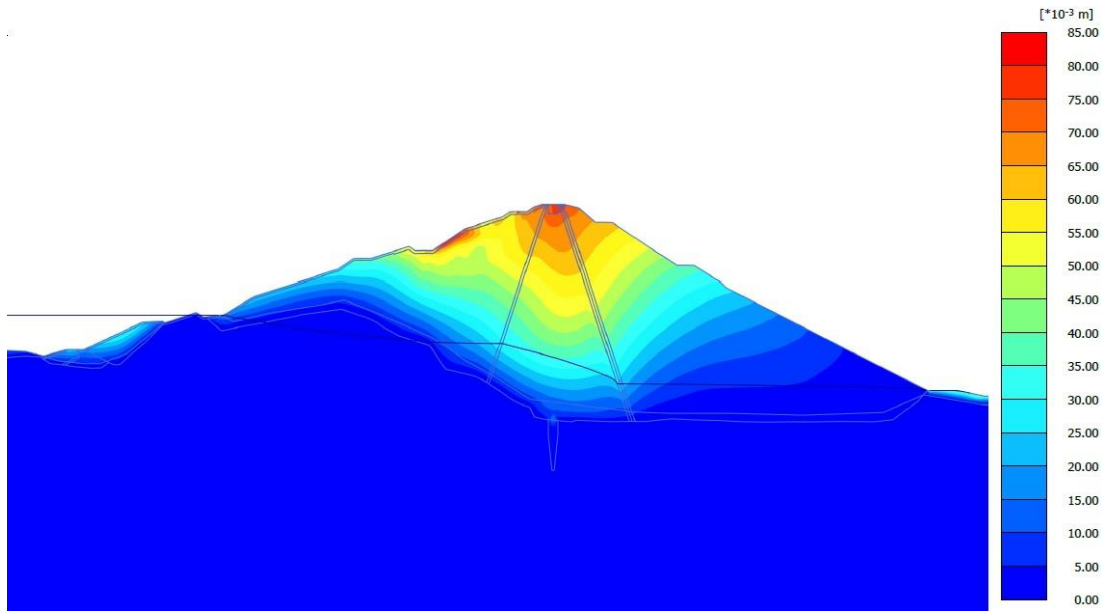
Şekil C.15. B5 kesitine ait 24.01.2013 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



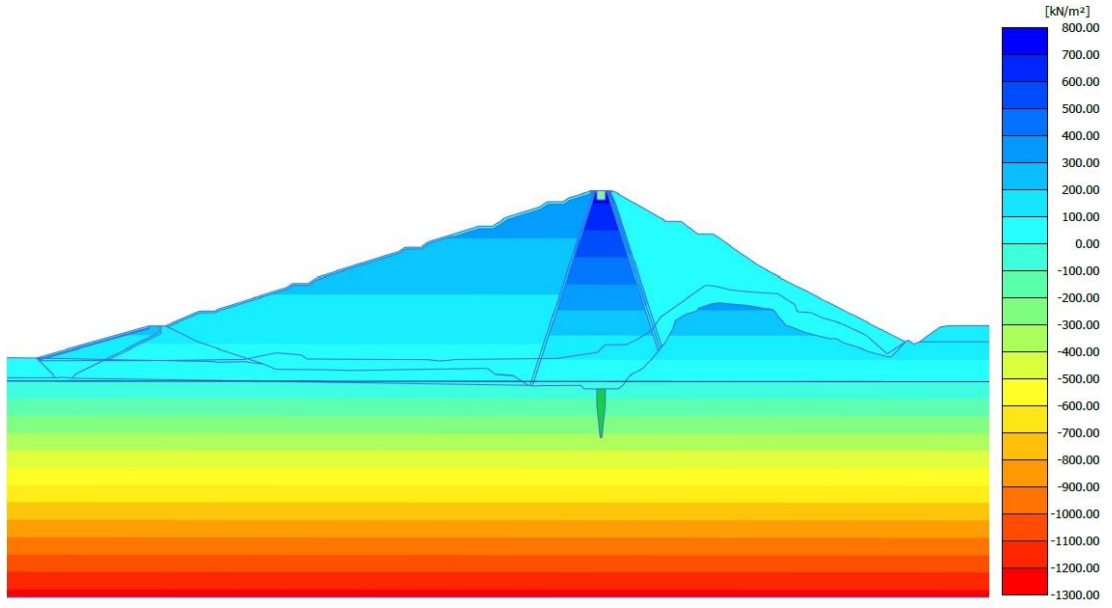
Şekil C.16. B5 kesitine ait 21.04.2015 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



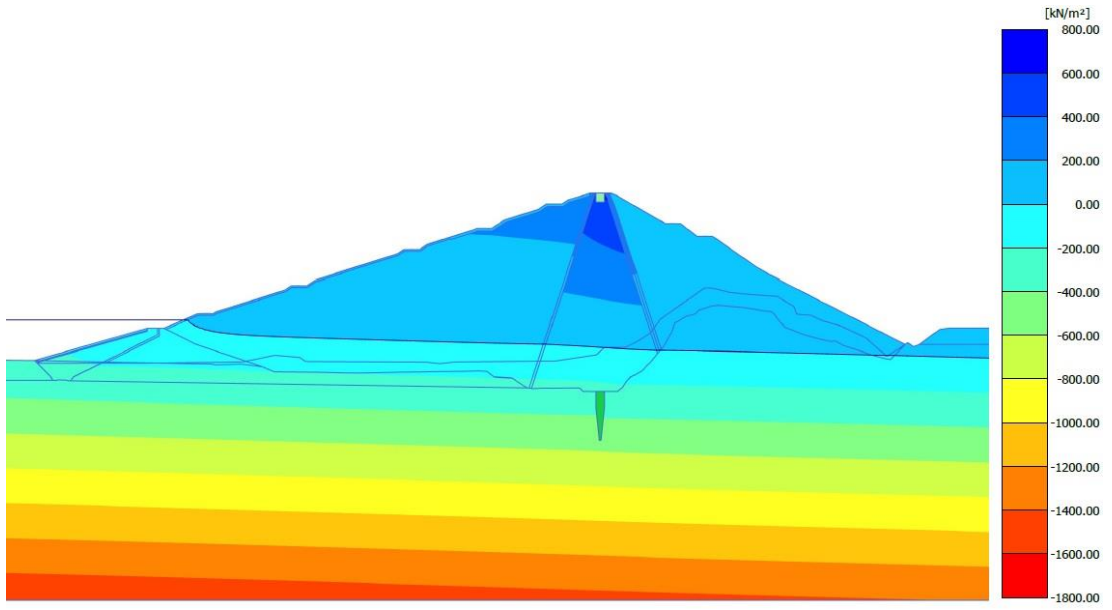
Şekil C.17. B5 kesitine ait 16.03.2017 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



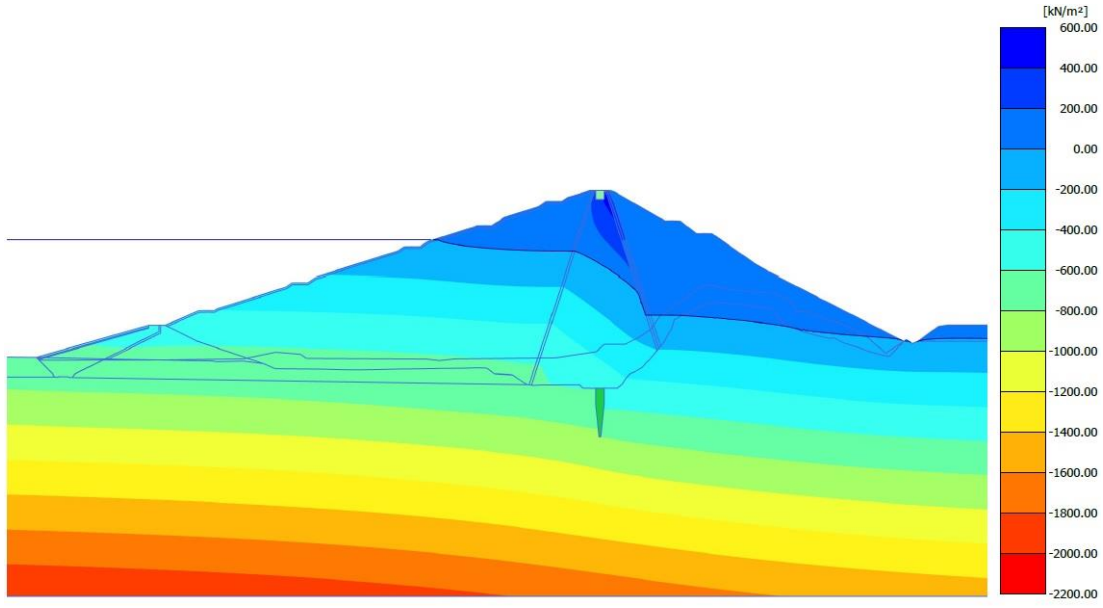
Şekil C.18. B5 kesitine ait 09.11.2022 tarihli maksimum toplam deformasyon analiz çıktısı.



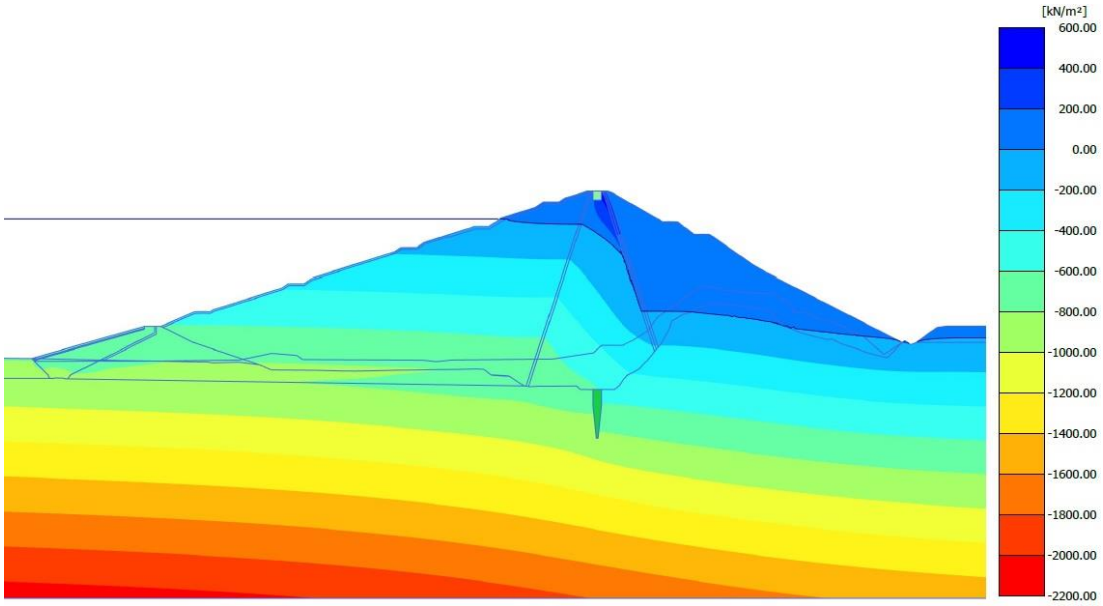
Şekil C.19. B3 kesitine ait 15.04.2010 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



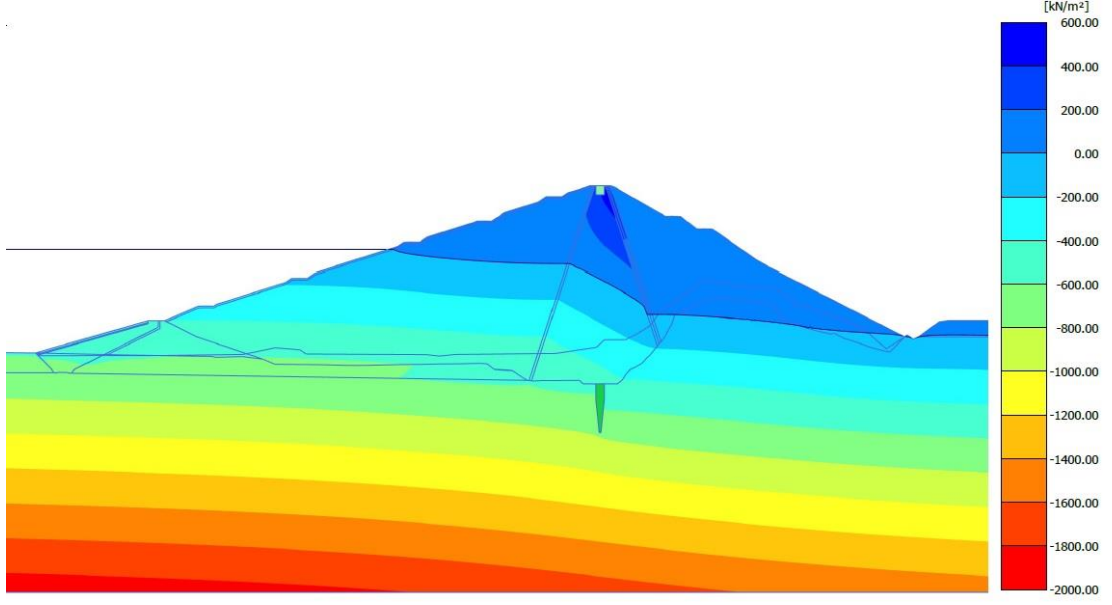
Şekil C.20. B3 kesitine ait 06.01.2011 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



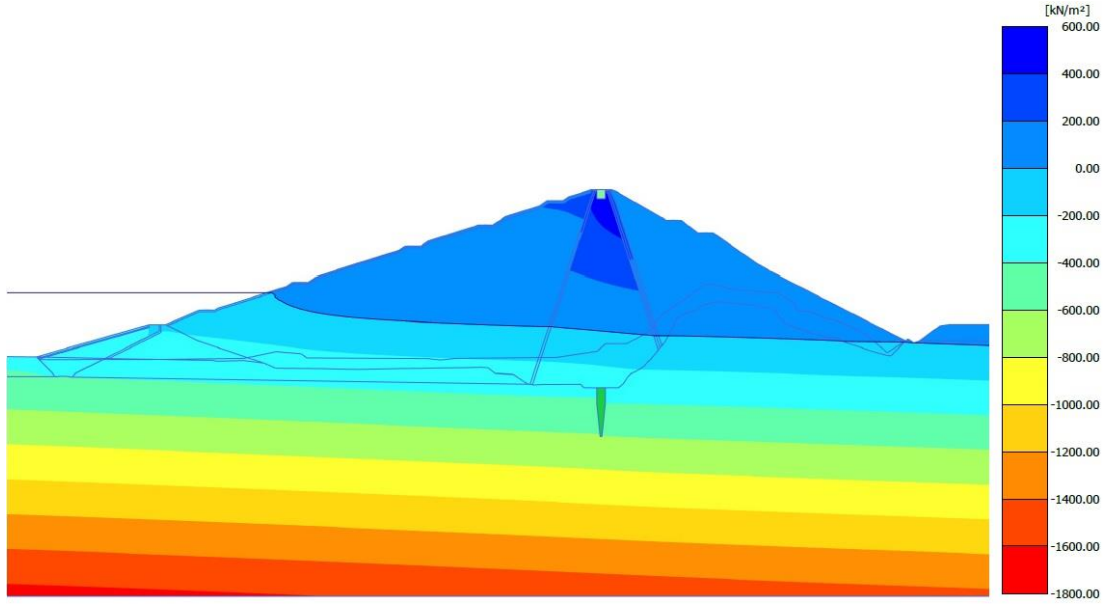
Şekil C.21. B3 kesitine ait 02.09.2014 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



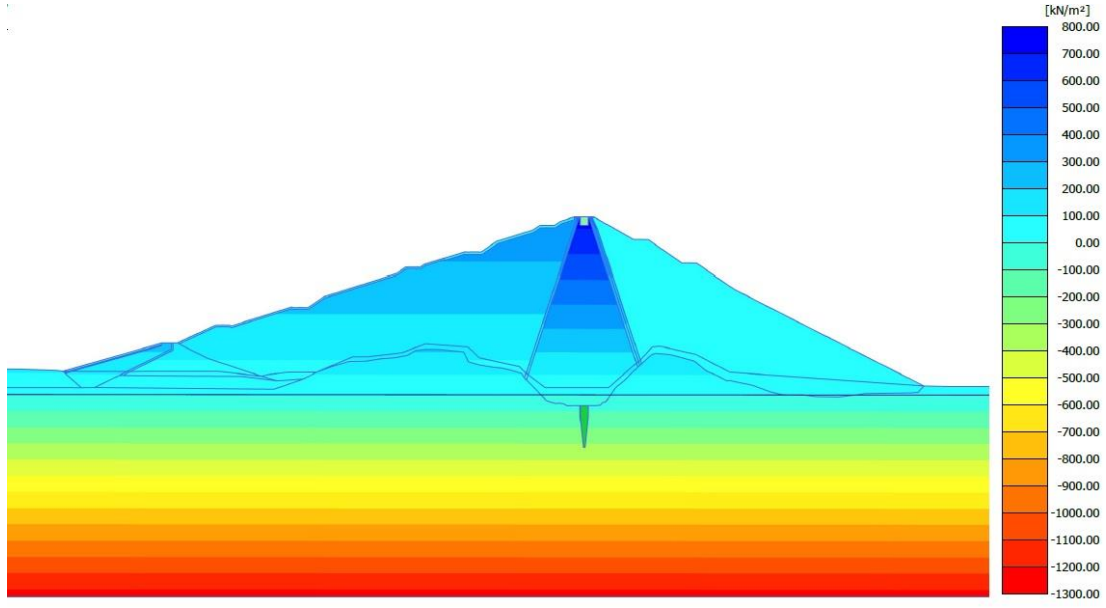
Şekil C.22. B3 kesitine ait 15.05.2015 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



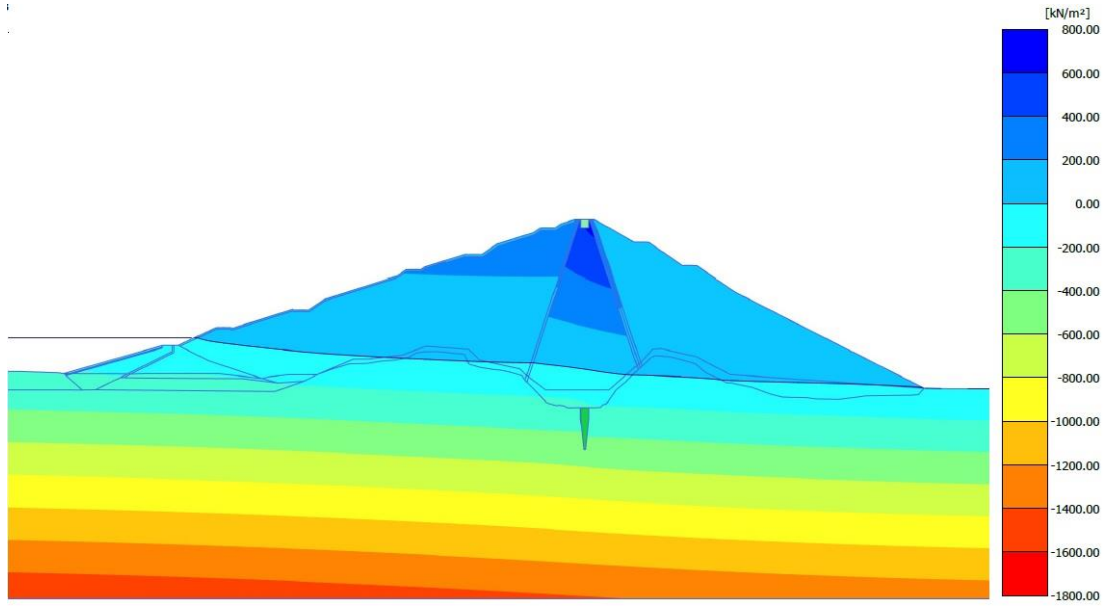
Şekil C.23. B3 kesitine ait 31.05.2017 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



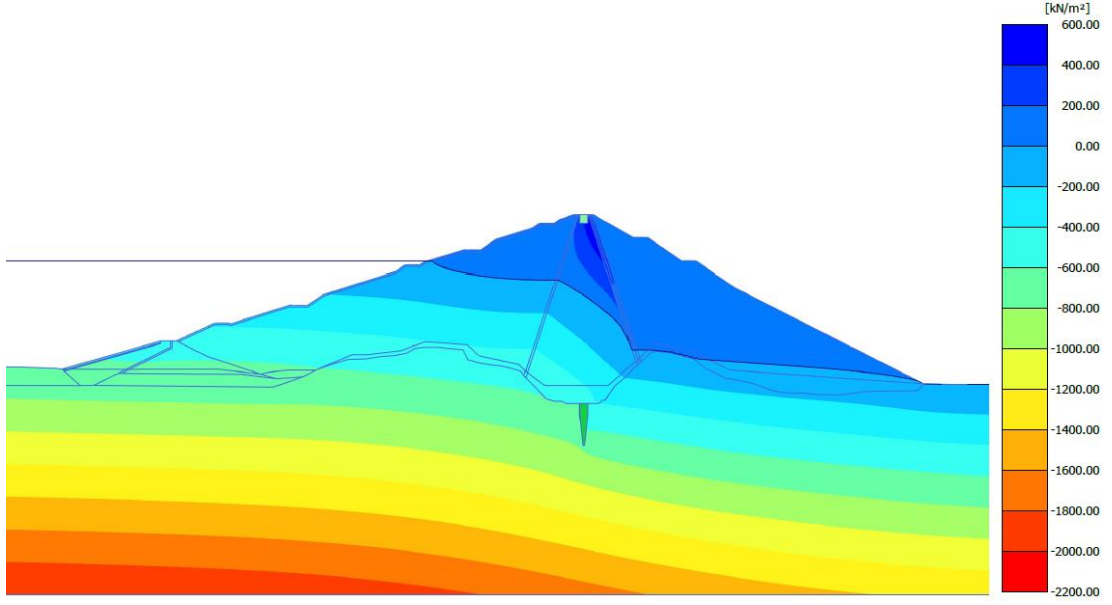
Şekil C.24. B3 kesitine ait 08.11.2022 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



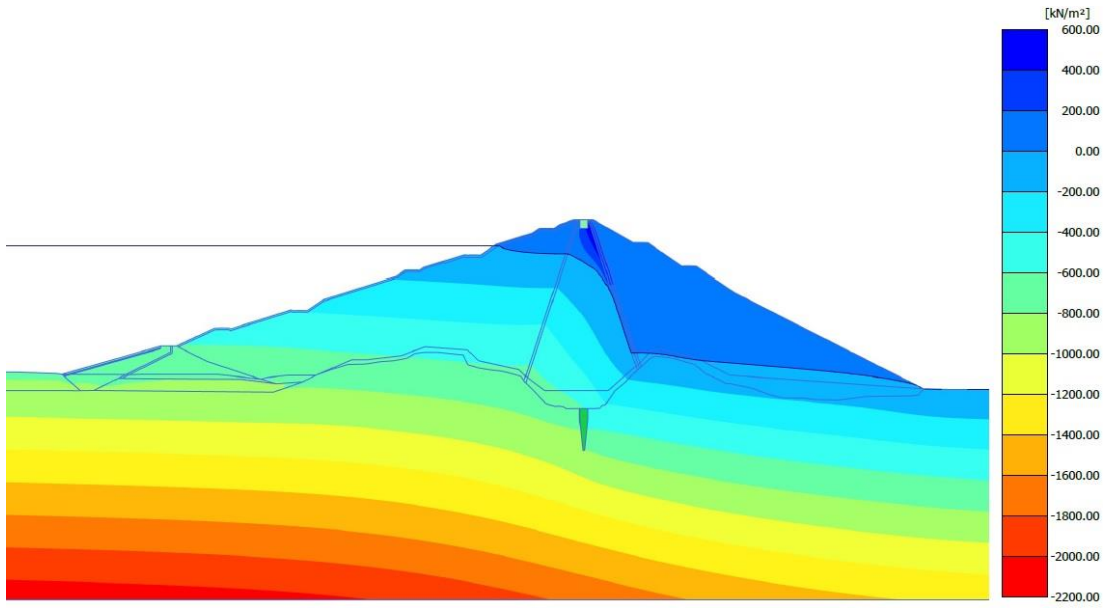
Şekil C.25. B4 kesitine ait 15.04.2010 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



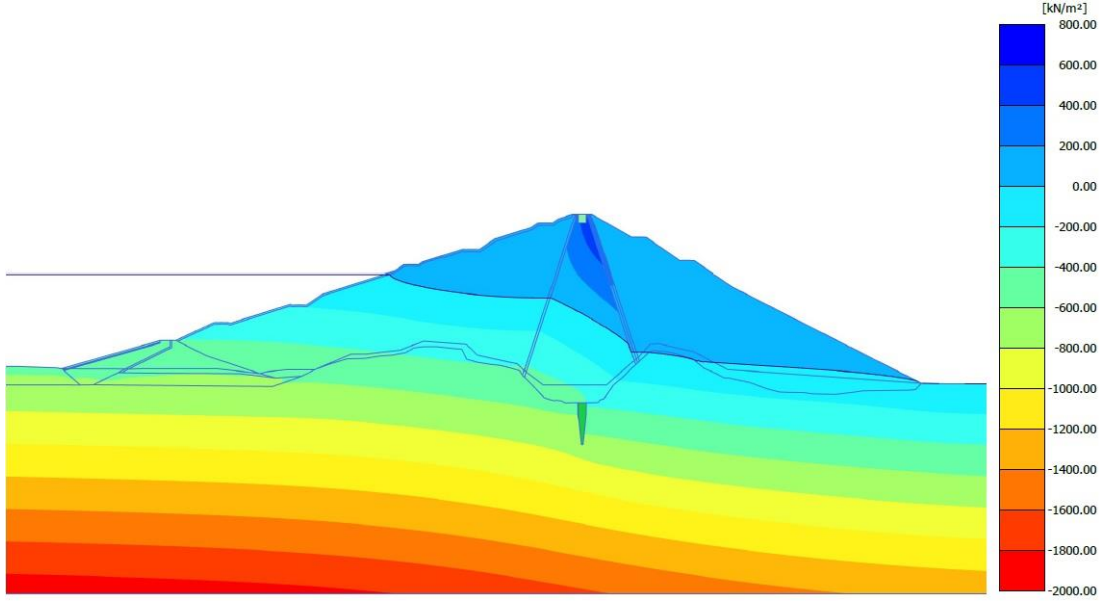
Şekil C.26. B4 kesitine ait 06.01.2011 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



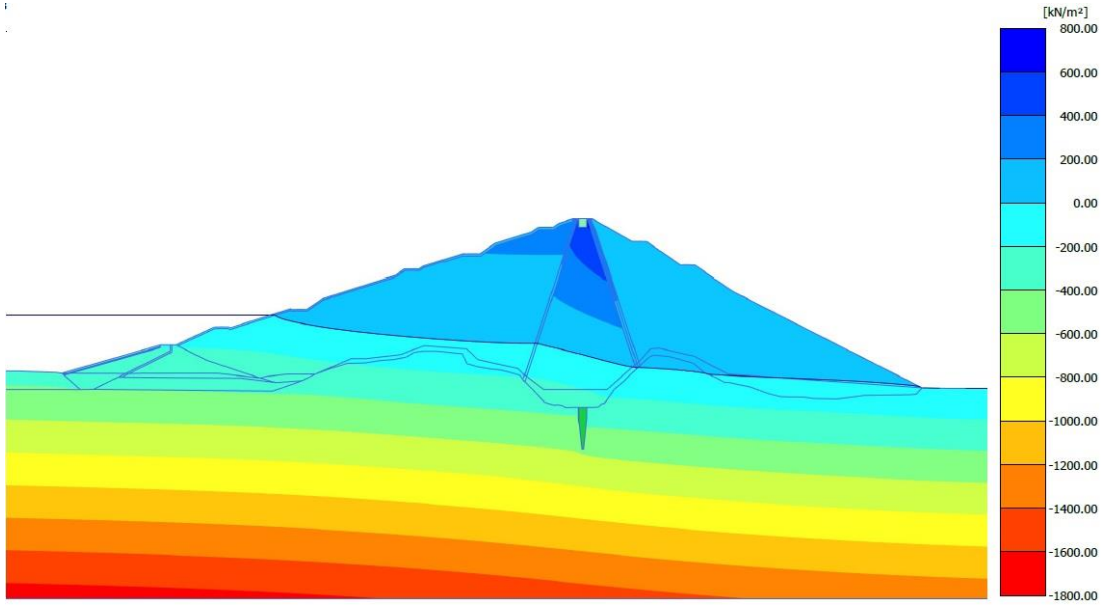
Şekil C.27. B4 kesitine ait 02.09.2014 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



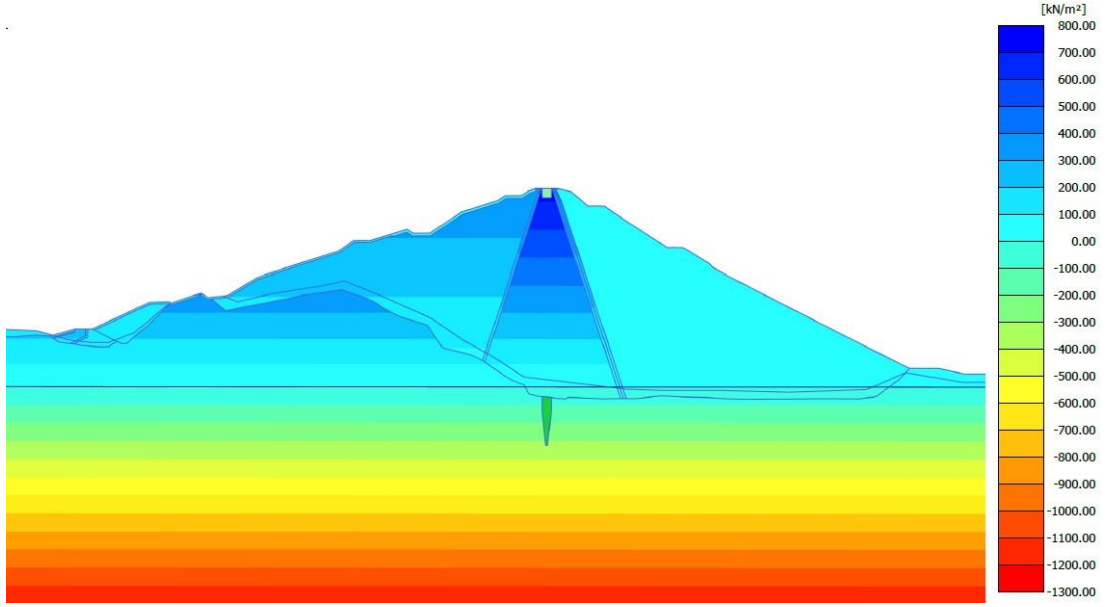
Şekil C.28. B4 kesitine ait 15.05.2015 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



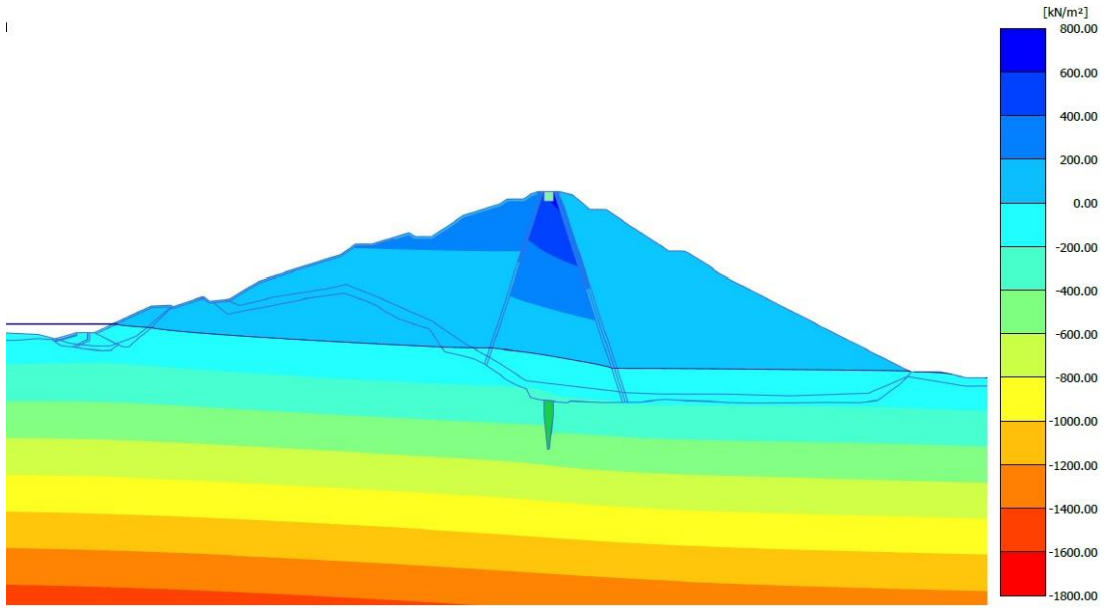
Şekil C.29. B4 kesitine ait 31.05.2017 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



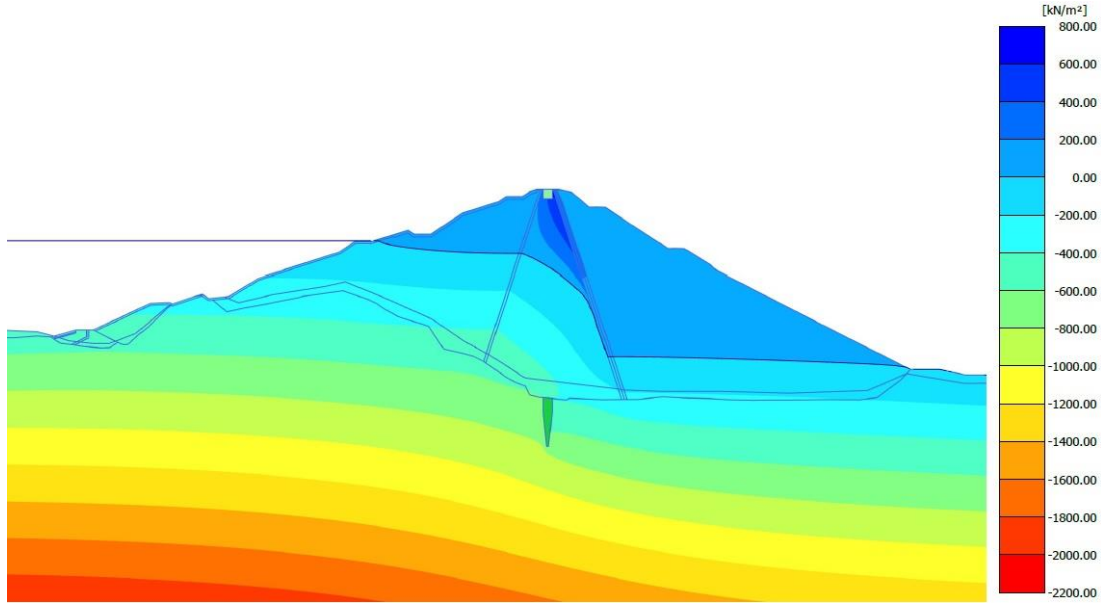
Şekil C.30. B4 kesitine ait 08.11.2022 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



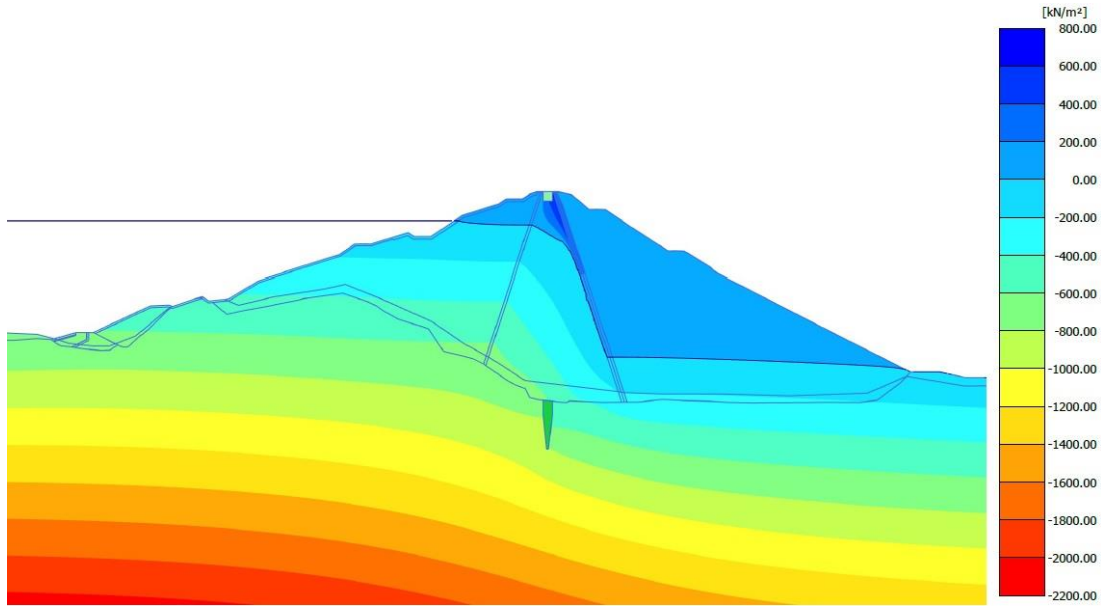
Şekil C.31. B5 kesitine ait 15.04.2010 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



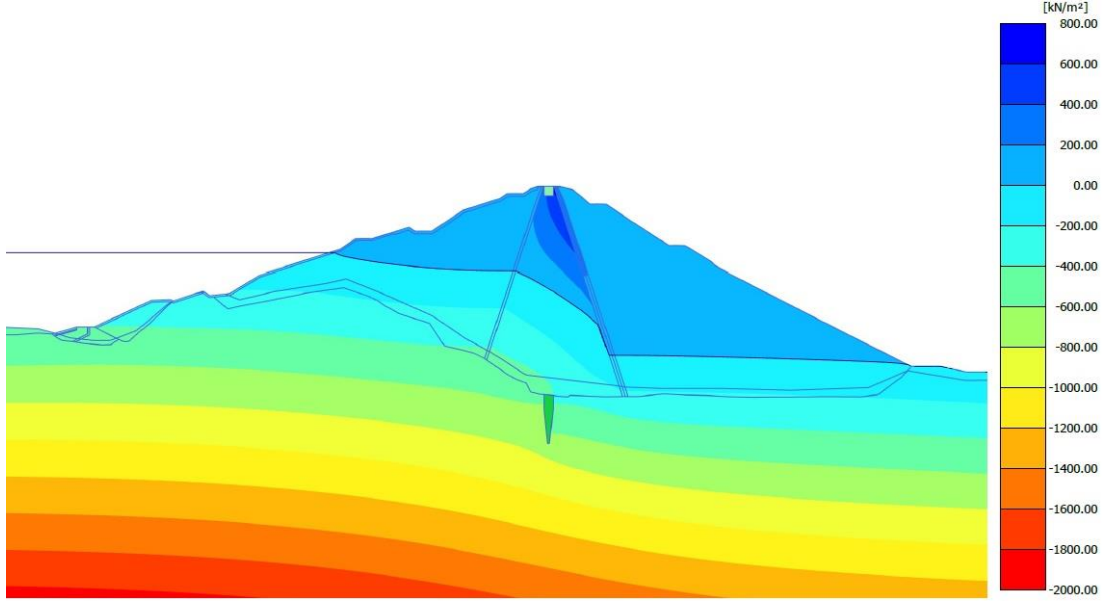
Şekil C.32. B5 kesitine ait 06.01.2011 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



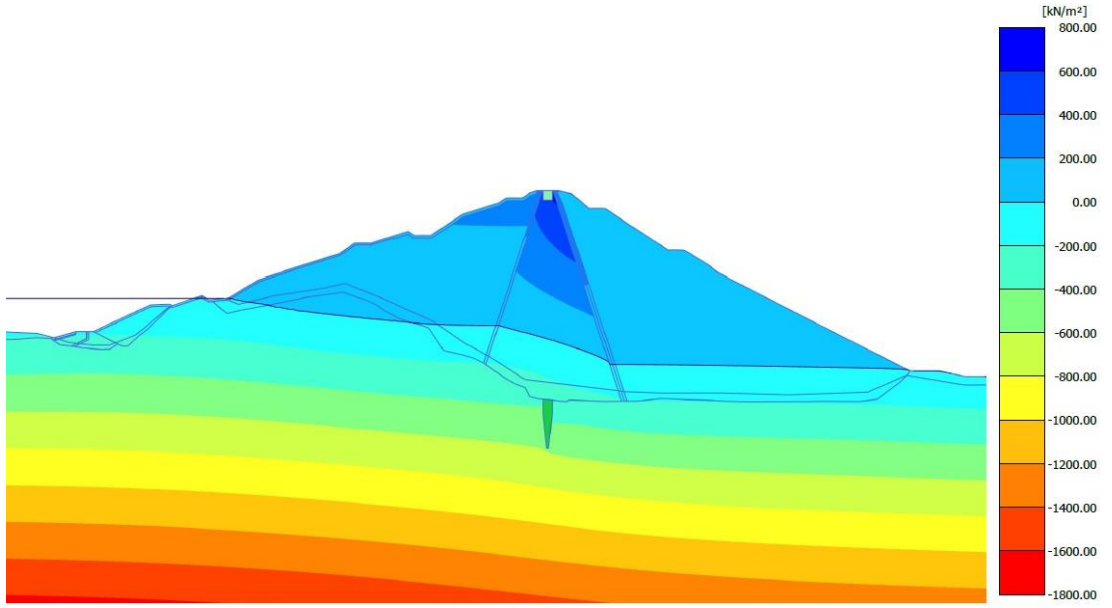
Şekil C.33. B5 kesitine ait 02.09.2014 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



Şekil C.34. B5 kesitine ait 15.05.2015 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



Şekil C.35. B5 kesitine ait 31.05.2017 tarihli su basıncı analiz çıktısı.



Şekil C.36. B5 kesitine ait 08.11.2022 tarihli su basıncı analiz çıktısı.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Süleyman SARAYLI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2012-2017 yılları arasında üst yapı inşaatı yapan firmalarda saha mühendisi ve şantiye şefi olarak çalıştı.
- 2017 yılından itibaren Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi'nde kentsel altyapı, su yapıları ve üst yapı alanlarında proje mühendisi ve yapı denetim görevlisi olarak çalışmaktadır.

DİĞER ESERLER:

- Dilbas, H., Erkılıç, H., Saraylı, S. ve Haktanır, T. 2011. Beton Mukavemet Deneyleri Değerlendirmesi İçin Bir İstatistiksel Çalışma, *Yapı Dünyası*, 2011(178).
- Akkaya, U., Saraylı, S., Doğan, E., Akçalı, E., Akpınar, A. ve Yıldırım, M.S. (2013, 24-26, Ekim). Rize Taşlıdere'nin Taşkın Analizinin Yapılması. *Taşkın ve Heyelan Sempozyumu*, Trabzon, Turkey.