



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETON KEMER BARAJLARDAKİ DEFORMASYONLARIN JEODEZİK VE GEOTEKNİK YÖNTEMLERLE İZLENMESİ VE ERMENEK BARAJI ÖRNEĞİ

Salih ALÇAY

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2014
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Salih ALÇAY

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BETON KEMER BARAJLARDAKİ DEFORMASYONLARIN JEODEZİK VE GEOTEKNİK YÖNTEMLERLE İZLENMESİ VE ERMENEK BARAJI ÖRNEĞİ

Salih ALÇAY

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ayhan CEYLAN
Yrd. Doç. Dr. Cemal Özer YİĞİT

2014, 110 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Ayhan CEYLAN
Prof. Dr. Cevat İNAL
Prof. Dr. Özcan TAN
Prof. Dr. Halil ERKAYA
Y.Doç. Dr. İsmail ŞANLIOĞLU

Köprü, viyadük, baraj vb. büyük mühendislik yapılarının, beklenen hizmet ve faaliyet süreleri boyunca karşılaşabilecekleri olası tehlikelerin önüne geçebilmek için düzenli bir şekilde izlenmeleri gerekmektedir. Birçok izleme yöntemi mevcut olup, bunlar genel anlamda jeodezik ve geoteknik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışmanın amacı iki yöntemin avantajlarından yararlanarak barajın kapsamlı bir şekilde izlenmesidir. Bu çalışmada, Türkiye'nin en yüksek ikinci barajı olan Ermenek beton kemer barajında yapılan deformasyon izleme çalışmaları üzerinde durulmuş ve kullanılan jeodezik ve geoteknik yöntemlerle elde edilen bulgular incelenmiştir. Bu iki yöntem sayesinde baraj ve civarındaki olası hareketler detaylı olarak izlenmiştir. Hem jeodezik hem de geoteknik yöntemlerle belirlenen maksimum hareketler 1.5 cm nin altındadır. Jeodezik ve geoteknik yöntemlerle belirlenen hareketlerin mevsimsel sıcaklık ve rezervuar su seviyesi ile ilişkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca jeodezik veriler ile sarkaç ve klinometre verilerinin uyumluluğu, inklinometre ve jeodezik sonuçların birbirlerini tamamlama durumu, mesnetlerde bulunan yük hücresi ve ekstensometre verilerinin uyumu araştırılmıştır. Buna göre yöntemlerin bazı alanlarda birbirlerini test edebildiği, bazılarında ise tamamladığı görülmüştür. Elde edilen sonuçların sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan değerlerle de oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon, FEM, Geoteknik, Jeodezik,

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DEFORMATION MONITORING USING GEODETIC AND GEOTECHNICAL METHODS ON CONCRETE ARCH DAMS AND EXAMPLE OF ERMENEK DAM

Salih ALÇAY

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Assis. Prof. Dr. Cemal Özer YİĞİT
2014, 110 Pages

Jury
Assoc. Prof. Dr. Ayhan CEYLAN
Prof. Dr. Cevat INAL
Prof. Dr. Ozcan TAN
Prof. Dr. Halil ERKAYA
Assis. Prof. Dr. Ismail SANLIOGLU

Large engineering structures such as bridge, viaduct, dam etc, must be monitored regularly during their operation in order to prevent possible hazards. Several methods are used for monitoring however they can be classified into two; geodetic and geotechnical methods. The aim of this study is to monitor the dam in a full scale by utilizing the advantages of both systems. In this study, it was conducted on deformation monitoring studies on Ermenek concrete arch dam which is the second highest dam in Turkey. Results obtained by geodetic and geotechnical methods were investigated. Possible movements in and around the dam were monitored in detail by means of these two methods. Maximum displacements were obtained less than 1.5 cm for both geodetic and geotechnical methods. Correlation between movements, determined by geodetic and geotechnical methods, with seasonal temperature and reservoir level were analyzed in detail. In addition, compatibility between geodetic data, pendulum and clinometer data, completion of inclinometer and geodetic results, compatibility of load cell and extensometer values in abutments, were investigated. According to the results, it is observed that such methods were able to test and complete each other. Obtained results also illustrated good agreement with the predicted deformation obtained by Finite Element Method.

Keywords: Deformation, FEM, Geotecnical, Geodetic,

ÖNSÖZ

Farklı disiplinlerin birlikte çalışması, her bir disiplinin kendi kullandığı ölçme sisteminin bağlantılı disiplinlerde uygulama alanı bulması, katkıları ve bu durumun gerekliliği önemini gün geçtikçe arttırmaktadır. Her bir sistemin kendine has özelliklerinin göz ardı edilemez önemi olmasına karşın eksiklikleri de mevcuttur. Fakat sistemlerin birlikte kullanılması sonuçların karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede daha detaylı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bu tez kapsamında, jeodezik ve geoteknik yöntemlerin baraj izleme çalışmalarında birlikte kullanılabilirliği ve elde edilen sonuçların tutarlığı incelenmiştir.

Tezin hazırlanması süresince, bilimsel tecrübelerini aktaran ve bana her zaman yol gösteren danışman hocalarım Doç. Dr. Ayhan CEYLAN ve Yrd. Doç. Dr. Cemal Özer YİĞİT' e, yüksek lisans ve doktora çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Cevat İNAL'a, jeodezik ve geoteknik verilerin temin edilmesine ve kullanılmasına izin veren DSİ 4. Bölge Müdürlüğüne, bu zor ve sıkıntılı süreçte desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen başta eşim olmak üzere ailemin her bir üyesine çok teşekkür ederim. Ayrıca doktora eğitimim boyunca sağladığı burs desteği nedeniyle TÜBİTAK-BİDEB 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programına çok teşekkür ederim.

Salih ALÇAY
KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Çalışmanın Ana Hedefleri ve Bilime Katkısı 2
1.2. Tezin Genel Yapısı 3

2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALARA GENEL BİR BAKIŞ **4**

3. BARAJLAR VE ETKİYEN YÜKLER **10**

3.1. Barajlar 10
3.1.1. Dolgu ve beton baraj türleri 11
3.1.1.1. Dolgu barajlar 11
3.1.1.1.1. Toprak dolgu barajlar 11
3.1.1.1.2. Kaya dolgu barajlar 12
3.1.1.2. Beton barajlar 13
3.1.1.2.1. Beton ağırlık barajlar 13
3.1.1.2.2. Beton kemer barajlar 13
3.1.1.2.3. Payandalı beton barajlar 14
3.2. Barajlara Etkiyen Yükler 15
3.2.1. Beton kemer barajlara etkiyen yükler 16
3.2.1.1. Ölü yük 16
3.2.1.2. Hidrolik yük 16
3.2.1.2.1. Normal su yükü 16
3.2.1.2.2. Taşkın yükü 16
3.2.1.2.3. Kaldırma yükü 16
3.2.1.2.4. Silt, tortu yükü 17
3.2.1.2.5. Buz yükü 17
3.2.1.3. Termal yük 17
3.2.1.3.1. Sıcaklık dağılımı 17
3.2.1.3.2. Hava sıcaklığı 17
3.2.1.3.3. Rezervuar su sıcaklığı 17
3.2.1.3.4. Güneş radyasyonu 17
3.2.1.3.5. Beton sıcaklığı 18
3.2.1.4. Deprem yükü 18

4. BARAJLARIN JEODEZİK VE GEOTEKNİK YÖNTEMLERLE İZLENMESİ **19**

4.1. Jeodezik Yöntemler 20
4.1.1. Aliyman yöntemi 20

4.1.2. Hassas poligon yöntemi....21
4.1.3. Jeodezik ağ yöntemi....21
4.1.4. Hassas geometrik nivelman yöntemi....22
4.1.5. Trigonometrik nivelman yöntemi....22
4.1.6. Jeodezik ölçülerin değerlendirilmesi ve deformasyon analizi....22
4.1.6.1. Statik deformasyon modeli....23
4.1.6.1.1. S transformasyonu yöntemi ile deformasyon analizi....23
4.1.6.1.1.1. S transformasyonu yardımıyla anlamlı nokta hareketlerinin araştırılması....26
4.2. Geoteknik Yöntemler....27
4.2.1. Klinometre....28
4.2.2. Çatlak, Derz ölçer....28
4.2.3. Extensometre....29
4.2.4. İnklinometre....29
4.2.5. Sarkaç 30
4.2.6. Piyezometre....31
4.2.7. Debi ölçer....31
4.2.8. Manyetik oturma kolonları....31
4.2.9. Yük hücresi....32
4.2.10. Basınç hücresi....32
4.2.11. Teletermometreler....33

5. ERMENEK BARAJI VE KULLANILAN YÖNTEMLER....34

5.1. Ermenek Barajı Teknik Özellikleri....34
5.2. Ermenek Barajının İzlenmesinde Kullanılan Jeodezik ve Geoteknik Yöntemler....35
5.2.1. Jeodezik yöntemler....35
5.2.1.1. Yatay yönlü hareketlerin izlenmesi....35
5.2.1.2. Düşey yönlü hareketlerin izlenmesi....44
5.2.2. Geoteknik yöntemler....47
5.2.2.1. Beton ve ortam sıcaklıklarının izlenmesi....51
5.2.2.2. Deformasyon ölçmeleri....53
5.2.2.2.1. Sarkaç ölçümleri....53
5.2.2.2.2. Ekstensometre ölçümleri....55
5.2.2.2.3. Derz açıklık ölçümleri....61
5.2.2.2.4. Klinometre ölçümleri....71
5.2.2.3. Gerilim ve basınç ölçümleri....72
5.2.2.3.1. Gerilim ölçümleri....72
5.2.2.3.2. Basınç ölçümleri....76
5.2.2.4. Boşluk suyu basınç ölçümleri....77
5.2.2.5. Mesnetlerin izlenmesi....81
5.2.2.5.1. İnklinometre ölçümleri....82
5.2.2.5.2. Extensometre ölçümleri....84
5.2.2.5.3. Yük hücresi ölçümleri....85
5.2.2.6. Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplama....86

6. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA....90

6.1. Jeodezik Yöntemle Belirlenen Radyal Hareketlerin Sıcaklık ve Su Seviyesi ile İlişkisi....90

6.1.1. Mevsimsel Sıcaklık ve Rezervuar Su Seviyesi Etkilerinin Ayrıştırılması ...92
6.2. Sarkaç ile Belirlenen Hareketlerin Sıcaklık ve Su Seviyesi ile İlişkisi 94
6.3. Sarkaç, Klinometre ve Jeodezik Ölçülerin Karşılaştırılması 95
6.4. Kret Üzerindeki Memba ve Mansap Obje Noktalarının Karşılaştırılması.....101
6.5. İnklinometre Kuyularındaki Hareketlerin Jeodezik Noktalara Dayalı Olarak Yorumlanması 102
6.6. Ekstensometre ve Yük Hücresi Verilerinin Karşılaştırılması 103

7. Sonuçlar ve Öneriler 105

8. KAYNAKLAR 108

KISALTMALAR LİSTESİ

AVT : Ambient Vibration Test

FEM : Finite Element Method

ICOLD : International Commissions on Large Dams

IDF : Inflow Design Flood

NHWL : Normal High Water Level

STFT : Short Time Fourier Transform

LAS : Least Absolute Sum

IWST : Iterative Weighted Smilarity Trasnformation

RBF : Radial Basis Function

SAR : Synthetic Aperture Radar

INSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar

GNSS : Global Navigation Satellite System

GPS : Global Positioning System

DGPS : Differential GPS

EKK : En Küçük Kareler

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1. Kapulukaya barajı (http://www2.dsi.gov.tr/baraj/detay.cfm?BarajID=121) ..12

Şekil 3.2. Atatürk barajı (http://www2.dsi.gov.tr/baraj/detay.cfm?BarajID=149) 12

Şekil 3.3. Grande Dixence Barajı (http://hakankaya.wordpress.com/2010/01/13/baraj-ve-baraj-cesitleri/grande%20dixence_01/) 13

Şekil 3.4 Ermenek barajı (http://www2.dsi.gov.tr/bolge/dsi4/karaman.htm).....14

Şekil 3.5 Daniel Johnson barajı (http://imgur.com/xFfHN) 14

Şekil 4.1 Baraj izlemede kullanılan jeodezik ve geoteknik yöntemler 19

Şekil 4.2 Jeodezik ağı oluşturan noktalar 21

Şekil 4.3 Multivaryant ağ 24

Şekil 4.4. Klinometre örnekleri.....28

Şekil 4.5. Çatlak ve derz ölçerler 29

Şekil 4.6. Ekstensometre örnekleri (soldan sağa:çubuk, minyatürize edilmiş, şerit).....29

Şekil 4.7. İnklinometre aleti.....30

Şekil 4.8. Ters ve düz sarkaçlar 30

Şekil 4.9. Piyezometre örnekleri (soldan sağa: standpipe, titreyen telli, pnömatik).....31

Şekil 4.10. Debi ölçer 31

Şekil 4.11. Manyetik oturma kolonları.....32

Şekil 4.12 Yük hücresi örneği.....32

Şekil 4.13. Basınç hücreleri (toprak, hidrolik).....33

Şekil 4.14. Betonlama öncesi yerleştirilen teletermometre 33

Şekil 5.1 Ermenek barajı ve konumu (hava fotoğrafları(sağ) Google Earth'den alınmıştır (http://www.google.com/earth/)) 34

Şekil 5.2 Oluşturulan mikro jeodezik ağ 36

Şekil 5.3. Mansap tarafında baraj gövdesi üzerine tesis edilen obje noktalarının dağılımı 37

Şekil 5.4. Memba tarafında baraj gövdesi üzerine tesis edilen obje noktalarının dağılımı 37

Şekil 5.5 Obje noktaları için tasarlanan hedef 38

Şekil 5.6 Leica TCA 1800 ve tribrah üzerine monte edilmiş GPH1P hassas yansıtıcı...38

Şekil 5.7 Açı ve doğrultu gözlemlerinin yapıldığı hedef sistemi.....39

Şekil 5.8. Referans noktasında alet ve prizma(7-8), obje noktasında prizma.....39

Şekil 5.9 Koordinat dönüşümü (Mansap tarafı pozitif yönü göstermektedir).....41

Şekil 5.10 Sağ uç kesitteki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap).....42

Şekil 5.11 Sağ uç kesit ile orta kesit arasındaki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap).....42

Şekil 5.12 Orta kesitteki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap).....42

Şekil 5.13 Sol uç kesit ile orta kesit arasındaki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap).....43

Şekil 5.14 Sol uç kesitteki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap).....43

Şekil 5.15 Memba tarafında balkon üzerinde bulunan noktaların radyal ve teğetsel hareketleri.....44

Şekil 5.16 Memba tarafında 696 m kotunda bulunan noktaların radyal ve teğetsel hareketleri.....44

Şekil 5.17. Ermenek barajı yükseklik ağı referans ve obje noktaları.....45

Şekil 5.18 Ölçülerde kullanılan Leica DNA03 nivosu.....45

Şekil 5.19. a,b) Referans (Rs) ve c) obje noktalarında yapılan tesisler.....46

Şekil 5.20. Nivelman noktalarının periyotlara göre hareketleri.....46

Şekil 5.21. Noktaların birbirlerine göre bağıl hareketleri.....47

Şekil 5.22. Baraj gövdesindeki geoteknik aletlerin konumu.....48

Şekil 5.23. Galeri 4 deki geoteknik ölçme aletlerinin konumu.....50

Şekil 5.24. Galeri 3 deki geoteknik ölçme aletlerinin konumu.....50

Şekil 5.25. Galeri 2 deki geoteknik ölçme aletlerinin konumu.....51

Şekil 5.26. Galeri 1 deki geoteknik ölçme aletlerinin konumu.....51

Şekil 5.27. Farklı yüksekliklere yerleştirilmiş teletermometre verileri ile hava sıcaklığı değerleri.....53

Şekil 5.28. Galeri 2 de bulunan düz sarkaç (sol) ve galeri 4 de bulunan ters sarkaç (sağ) odaları.....54

Şekil 5.29. Düz ve ters sarkaç verileri.....55

Şekil 5.30 Gövdeye giriş yerlerindeki galerilerde bulunan ekstensometreler (galeri 3).56

Şekil 5.31. Gövdeye yakın yerlerdeki galerilerde (sağ) bulunan ekstensometreler.....58

Şekil 5.32. Gövdeye yakın yerlerdeki galerilerde (sol) bulunan ekstensometreler 60

Şekil 5.33. Galeri 4 de bulunan ekstensometre.....60

Şekil 5.34 Tek ve üç boyutlu derz ölçerler (Galeri 1).....61

Şekil 5.35. Galeri 1 deki derz ölçer verileri.....66

Şekil 5.36. Galeri 2 deki derz ölçer verileri.....68

Şekil 5.37. Galeri 3 deki derz ölçer verileri.....70

Şekil 5.38 Galeri 4 deki derz ölçer verileri.....71

Şekil 5.39. Yüksek duyarlılıklı klinometre.....72

Şekil 5.40. Galerilerde bulunan klinometre verileri.....72

Şekil 5.41. Baraj gövdesine yerleştirilmiş gerilimölçer verileri 76

Şekil 5.42. Basınç ölçer verileri.....77

Şekil 5.43. Baraj alanındaki piyezometre kuyularının genel görünümü 78

Şekil 5.44. Galerilerdeki boşluk suyu basınç değerlerinin değişimi.....80

Şekil 5.45. Basınç değeri yüksek olan piyezometrelerin su seviyesi ile ilişkisi.....81

Şekil 5.46. Sol ve sağ sahile yerleştirilmiş geoteknik ölçme aletleri.....82

Şekil 5.47 Sol ve sağ sahilde pilyelerin yanına inklinometre ölçümü için açılmış sondaj delikleri.....83

Şekil 5.48. 07.04.2011-19.07.2012 tarihleri arasında sağ ve sol inklinometre kuyularındaki değişimler 83

Şekil 5.49. Ekstensometre değerleri.....85

Şekil 5.50. Sağ sahildeki yük hücresi değerleri 86

Şekil 5.51. Sol sahildeki yük hücresi değerleri.....86

Şekil 5.52. Abaqus yazılımının işlem adımları (URL-3) 87

Şekil 5.53. Tüm sonlu elemanlar modeli.....88

Şekil. 5.54. Hesaplanan radyal deformasyonlar (Mayer ve Güven, 2012).....89

Şekil 6.1. Periyotlara göre rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri.....90

Şekil 6.2. Orta kesitteki noktaların birbirlerine göre bağıl hareketleri.....92

Şekil 6.3. Lineer trendin yok edilmesi ile orta kesitteki noktaların radyal hareketleri ...93

Şekil 6.4. Orta kesitteki noktaların birbirlerine göre bağıl hareketleri.....93

Şekil 6.5. G1-G2 sarkaç verileri ile aynı tarihlerdeki sıcaklık ve su seviyesi verileri 94

Şekil 6.6. G2-G3 sarkaç verileri ile aynı tarihlerdeki sıcaklık ve su seviyesi verileri ...95

Şekil 6.7. Periyotlara göre sarkaç hareketleri 99

Şekil 6.8. Memba tarafındaki obje noktalarının hareketleri 100

Şekil 6.9. Mansap tarafındaki obje noktalarının hareketleri.....100

Şekil 6.10. Galeri 1' deki klinometre verileri ("-" üst kısmın alt tarafa göre memba hareketi) 101

Şekil 6.11. Memba ve mansap tarafındaki noktaların radyal hareketleri.....102

Şekil 6.12. 07.04.2011-07.06.2012 tarihleri arasında sağ ve sol inklinometre kuyularındaki değişimler 103

Şekil 6.13. Mesnetteki ekstensometre ve yük hücresi verileri.....104

TABLO LİSTESİ

Çizelge 5.1 Ermenek barajının teknik özellikleri.....34

Çizelge 5.2 Obje noktalarının yükseklikleri 38

Çizelge 5.3 Gerçekleştirilen jeodezik ölçü periyotları ve tarihleri 40

Çizelge 5.4 Periyot ölçülerine ilişkin standart sapmalar 40

Çizelge 5.5 Geoteknik aletler ve teknik özellikleri.....49

Çizelge 5.6 Sarkaçların koordinat sistemleri 54

Çizelge 5.7 Piyezometreler ile memba su seviyesi arasındaki korelasyon katsayıları....81

Çizelge 5.8 Beton ve kayanın materyal özellikleri 88

Çizelge 6.1 4 ve 10 numaralı obje noktalarını hareketleri.....102

1. GİRİŞ

Artan nüfusla birlikte su ve su yapılarının önemi her geçen gün artmaktadır. Suyun biriktirilmesi, içme suyu sağlama, hidroelektrik enerji üretimi, sulama gibi birçok amaca hizmet eden barajlar önemli mühendislik yapılarındandır. Ülkemizde çok sayıda baraj bulunmakta olup son yıllarda ise artan ihtiyaçları karşılamak amacıyla daha büyük barajlar inşa edilmektedir. Büyük barajların birçok avantajı olmasına rağmen meydana gelecek olası bir tehlikenin boyutları da benzer ölçüde büyük olacaktır. Bu nedenle barajların düzenli bir şekilde izlenmesi, yapıya ilişkin mutlak ve bağıl deformasyonların tespit edilmesi ve yapının normal sınırlar içerisinde tepkiler verip vermediğinin belirlenmesi gerekmektedir. Ancak ülkemizde diğer ülkelere nazaran barajların gözetimine gereken önem verildiği söylenemez. Örneğin ABD ve İngiltere büyük can ve mal kayıplarıyla sonuçlanan baraj kazalarından sonra baraj güvenliğini yasal prosedüre bağlayan ülkelerin başında gelmektedirler (Demirkaya, 2003). Ülkemizde ise barajların çoğunda baraj güvenliğine ilişkin ölçüler yapılmayıp, barajlar tam anlamıyla kaderlerine terk edilmiştir. Bu eksikliğe rağmen günümüze kadar önemli bir tehlikenin ortaya çıkmamış olması sadece şanstan ibarettir. Ülkemizde ayrıca barajların yakından izlenmesiyle ilgili bir birim olmayıp, ölçülerin yapıldığı nadir durumlarda ise sonuçları değerlendirecek ve yorumlayacak nitelikli eleman bulunmamaktadır (Demirkaya, 2003).

Barajların izlenmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemler barajın yapısına ve beklenen deformasyonun büyüklüğüne göre değişmektedir. Bu yöntemler genellikle jeodezik ve geoteknik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Jeodezik yöntemler; klasik ölçme yöntemleri, uydu teknikleri, lazer tarama ve radar interferometri vb içermektedir. Geoteknik yöntemler ise fiziksel ve geometrik ölçmeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Chrazanowski ve Massiera, 2006). Fiziksel ölçmeler; piyezometre kullanarak yapılan boşluk suyu basınç ölçmeleri, basınç ve yük hücresi yardımıyla gerilme ve gerginlik ölçmelerini içermektedir. Geometrik yöntemler ise inklinometre veya klinometre kullanarak eğim ölçmeleri, extensometre kullanarak deplasman ölçmeleri, sarkaç kullanarak yatay yönlü hareketlerin belirlenmesi, çatlak ve derzölçerler kullanarak çatlak ve derz açıklıklarının belirlenmesi şeklindedir.

Çalışmalarda genellikle ya jeodezik yöntem ya da geoteknik yöntem kullanılarak deformasyon izleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajlarının yanı sıra dezavantajları da söz konusudur. Örneğin jeodezik yöntemle

yüzey deformasyonları belirlenebiliyor iken geoteknik yöntemlerde böyle bir kısıtlama söz konusu değildir. Ancak geoteknik yöntemlerle sadece bağıl deformasyonlar belirlenebiliyorken jeodezik yöntemlerle aynı zamanda gerekli olan mutlak deformasyonlarda belirlenebilmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi iki yöntemin avantajlarından faydalanarak barajın kapsamlı bir şekilde izlenmesi elde edilecek bulguların doğru yorumlanması açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle ülkemizdeki diğer barajların da izlenmesinde bu iki yöntemin birlikte kullanılması büyük önem taşımaktadır.

1.1. Çalışmanın Ana Hedefleri ve Bilime Katkısı

Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak her iki yöntemin avantajlarından faydalanabilmek için jeodezik ve geoteknik yöntemler birlikte kullanılarak kapsamlı bir deformasyon izleme çalışması yapılması hedeflenmiştir. Bu amaçla;

- Jeodezik ve geoteknik yöntemlerle barajdaki zamana bağlı mutlak ve bağıl hareketler belirlenmiştir.
- Jeodezik yöntemler kullanılarak barajın orta kesitinde elde edilen nokta hareketleri geoteknik ölçme aletlerinden sarkaç ve klinometre verileriyle olan uyumu karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.
- İnklinometre ve jeodezik yöntemle beklenen hareketlerin mutlak ve bağıl anlamda birbirini nasıl tamamladıkları gösterilmiştir.
- Mesnetlerde bulunan yük hücresi ve extensometre verilerinin birbirleriyle olan uyumu incelenmiştir.
- Elde edilen radyal hareketlerin mevsimsel sıcaklık değişimi ve su seviyesi ile ilişkisi araştırılmıştır.
- Ayrıca elde edilen hareketlerin sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan değerlerle uyumu incelenmiştir.

Bu çalışmanın bilime katkısı aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Jeodezik ve geoteknik yöntemlerin birlikte kullanılmasının ne tür avantajlarının olduğu ortaya çıkarılmıştır.
- Deformasyonların izlenmesinde bu iki yöntemin birbirini test edebilmesiyle daha gerçekçi sonuçların elde edilebildiği belirlenmiştir.
- Yöntemlerin birbirlerini sadece test amacıyla değil, bazı alanlarda birbirlerini tamamlaması amacıylada kullanılabileceği gösterilmiştir.

- Yüzeydeki deformasyonların jeodezik yöntemlerle, yüzey altındaki deformasyonların ise geoteknik yöntemlerle izlenmesiyle barajın geniş kapsamlı bir şekilde nasıl izlenebileceği gösterilmiştir.

1.2. Tezin Genel Yapısı

Tez toplam 6 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde barajların izlenme gereksinimleri ve önemi, yapılan çalışmaların amacı ve bilime katkısı ile tezin genel yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ise tez çalışmasıyla ilgili olarak daha önce yapılmış ve önemli yerlerde yayınlanmış bazı çalışmalara ilişkin özetler sunulmuştur. Üçüncü bölümde baraj türleri ve barajlara etkiyen yükler hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde, barajların jeodezik ve geoteknik yöntemlerle izlenmesinde kullanılan ölçme aletleri tanıtılmıştır. Beşinci bölümde Ermenek barajının teknik özelliklerinin yanı sıra jeodezik ve geoteknik yöntemlerle elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Altıncı bölümde ise jeodezik ve geoteknik yöntemlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı bir yaklaşımla verilerek elde edilen bulgular özetleyici bir dille değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALARA GENEL BİR BAKIŞ

Barajların izlenmesi ve değerlendirilmesi üzerine yapılmış birçok araştırma mevcuttur. Literatürde birbirinden farklı amaçlar için gerçekleştirilmiş çalışmalarla karşılaşılabilir. Barajlardaki deformasyonların izlenmesinde kullanılan yöntemler genel anlamda jeodezik ve geoteknik yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Aşağıda baraj izlemede kullanılan yöntemlere ilişkin çalışmalardan örnekler verilmiştir.

Kalkan (2012), Atatürk barajında 2006–2010 yılları arasında meydana gelen radyal deformasyonların büyüklüğünü ve yönünü belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada jeodezik yöntemlerden GPS ve klasik ölçme yöntemleri kullanılmıştır. 32 referans ve 200 obje noktasından oluşan bir deformasyon ağı oluşturulmuştur. Noktalardaki radyal hareketlerin yanı sıra bu hareketlerin rezervuar su seviyesiyle olan ilişki de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, GPS ve klasik yöntemlerle elde edilen sonuçların uyum içinde olduğu ve obje noktalarının %71 inde radyal hareketin gerçekleştiği görülmüştür. En büyük radyal hareket 14.08 cm ile memba tarafındaki obje noktasında gerçekleşmiştir. Noktaların hızları genelde zamanla azalan bir hareketin varlığını işaret etmektedir. Ayrıca radyal hareket ve rezervuar su seviyesi arasında dikkate değer bir korelasyon belirlenmemiştir.

Taşçı (2008), Altınkaya barajındaki deformasyonları belirlemek amacıyla GPS ölçü yönteminden faydalanmıştır. Bu amaçla 6 referans ve 11 obje noktasından oluşan deformasyon ağında 4 periyot statik oturum yapılarak 2 boyutlu deformasyon analiz gerçekleştirilmiştir. Hareketlerin gerçek doğrultularını belirlemek amacıyla WGS 84 kartezyen koordinatlar toposentrik koordinatlara dönüştürülmüştür. Noktalarda periyotlar arasında meydana gelen değişimler IWST (Iterative Weighted Smilarity Transformation) ve LAS (Least Absolute Sum) yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. En büyük hareket kret'in ortasındaki obje noktasında meydana gelmiştir. Ayrıca LAS ve IWST yöntemleri karşılaştırılarak LAS' in IWST' ye göre daha etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Erkaya ve ark. (2009), beton kemer barajlardaki deformasyonların modern ölçme teknikleri ile belirlenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla Oymapınar barajındaki yatay ve düşey yönlü değişimleri jeodezik ölçü yöntemleri kullanarak izlemişlerdir. Yatay yönlü hareketleri izlemek amacıyla klasik ölçü yöntemleri ve aynı zamanda GPS ölçüleri kullanmışlardır. Düşey yönlü hareketler ise

hassas nivelman, hassas trigonometrik nivelman ve GPS nivelmanı yöntemleri kullanarak izlenmiştir.

Gonzalez-Aguilera ve ark. (2008), büyük barajların üç boyutlu lazer tarayıcılar ile izlenebilirliği üzerine bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Bu amaçla Las Cogotas beton barajında ilk ölçüler baraj su tutmaya başlamadan önce olmak üzere toplam 3 periyot ölçü gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, sadece yersel lazer tarayıcı kullanarak büyük barajların yapısal kontrollerinin yapılmasının yeterli olmadığı, nedeni olarak da farklı ölçü periyotlarında aynı noktanın taranmasının mümkün olmadığı gösterilmiştir. Bu amaçla yersel lazer tarayıcının doğruluğunu arttırmak için 3 boyutlu modelleme yaklaşımı üzerinde durularak, RBF (Radial Basis Function) fonksiyonlarına dayalı 3 boyutlu bir yüzey modelinin büyük barajların kapsamlı biçimde izlenmesine olanak sağlayacağı belirtilmiştir.

Bayrak (2007), yaptığı çalışma ile Yamula barajındaki düşey hareketlerin su seviyesiyle olan ilişkisini incelemiştir. Bu amaçla 6 referans ve 9 obje noktasından oluşan ağda gerçekleştirilen 4 periyot ölçü, statik, kinematik ve dinamik analiz teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu üç teknikle yapılan değerlendirme sonucunda, obje noktalarında oluşan hareketlerin yönlerine bakıldığında aynı sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ayrıca dinamik model yardımıyla barajdaki düşey deformasyon ile rezervuar su seviyesi arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre su seviyesindeki artışın obje noktalarındaki çöküş hızını arttırdığı belirlenmiştir. Sonuç olarak Yamula barajındaki düşey yönlü deformasyonlar için rezervuar su seviyesindeki değişimin tetikleyici bir faktör olduğu vurgulanmıştır.

Wang ve ark. (2010), yaptıkları çalışmada Three Gorges baraj bölgesindeki deformasyonları SAR görüntüleri kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Görüntülerden geometrik bilginin çıkartılması amacıyla, PS (Permanent Scatterer) ve QPS (Quasi Permanent Scatterer) zaman serili InSAR görüntü analizi gerçekleştirilmiştir. 2003–2008 yılları arasında 40 SAR görüntüsü kullanılmıştır. Sonuçlara göre barajın sol tarafındaki deformasyonlar durma noktasına gelmekle birlikte, barajdaki deformasyonların barajı besleyen nehirdeki su seviyesiyle ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçların klasik yöntemlerle elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu belirtilmiştir.

He ve ark.(2004), yaptıkları çalışma ile geliştirdikleri GPS çoklu anten sisteminin performansını test etmişlerdir. Test işlemini Xiaolangdi barajında gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ±1-2 mm civarında bir konum doğruluğunu

işaret etmektedir. Ayrıca bu sistem sayesinde baraj deformasyon ağlarında olduğu gibi çok sayıda uydu alıcısına gereksinim duyulan hallerde, daha az sayıda uydu alıcısı kullanılacağından, daha ekonomik sonuç elde edilebileceği belirtilmiştir.

Ehiorobo ve Ehigiator (2011), Ikpoba toprak dolgu barajındaki yatay yönlü hareketleri DGPS (Differential GPS) tekniği kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. 2008, 2009 ve 2010 yıllarında yapılan üç periyot ölçü LEICA SKI PRO-2 yazılımıyla değerlendirilmiştir. Dengeleme işlemi sonunda periyotlar arasında nokta koordinatlarında oluşan farklar belirlenmiştir. Yapılan analizle bu farkların noktasal hareketten mi? yoksa ölçü hatalarından mı? kaynaklandığı belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz sonucu ağdaki tüm noktaların hareket ettiği belirlenmiştir. Ayrıca toprak dolgu barajların üç boyutlu olarak izlenmesinde DGPS tekniğinin kısa bazlar söz konusu olması halinde uygun bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

Güler ve ark. (2006), 1987–1991 ve 1991–1996 yılları arasında Alibey toprak dolgu barajındaki yatay ve düşey yönlü deformasyonları jeodezik yöntemlerden klasik ölçme yöntemi kullanarak belirlemişler ve aynı zamanda belirtilen zaman dilimlerindeki olası hareketleri sonlu elemanlar yöntemi kullanarak hesaplamaya çalışmışlardır. Elde edilen değerlere göre 1987–1991 yılları arasında meydana gelen yatay ve düşey yönlü hareketlere bakıldığında bu hareketlerin 1991–1996 yılları arasında meydana gelenlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan yatay yönlü deformasyonlara bakıldığında ise, bu değerlerin jeodezik yöntemle bulunan değerlerden daha büyük olduğu, düşey yönlü deformasyonlar için ise tam tersi bir durumun oluştuğu belirtilmiştir.

Ding ve Qin (2000), yaptıkları çalışma ile baraj gibi yapıların izlenmesinde kullanılan geoteknik ölçme aletlerini irdelemişlerdir. Ayrıca deformasyon ölçümlerinde kullanılan extensometre, inklinometre, sarkaç, ters sarkaç ve eğimölçer ölçme aletlerine ayrıntılı olarak değinmişlerdir. Yapıların izlenmesinde kullanılan bu ölçme aletlerinin avantaj ve dezavantajlarını jeodezik yöntemlerle karşılaştırarak detaylı olarak vermektedirler.

Gikas ve Sakellariou (2008), yaptıkları çalışma ile Mornos toprak dolgu barajındaki oturmaları sonlu eleman yöntemi, jeodezik yöntemlerden hassas geometrik nivelman yöntemi ve geoteknik ölçme aletlerinden manyetik extensometreler kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Değerlendirme sürecinde 30 yıllık bir izleme süreci göz önüne alınmıştır. Bu süreç içerisinde yapım aşamasının bir bölümü, ilk su tutma aşaması ve çoğunluk olarak da işletme süreci yer almaktadır. Kret üzerinde 17 noktadan

oluşan yükseklik ağında hassas geometrik nivelman yöntemiyle düşey yönlü hareketler belirlenmeye çalışılmıştır. Değerlendirme sonucunda en büyük hareketin kretin orta noktasında olduğu belirlenmiştir. Toplam hareketlere bakıldığında bu hareketlerin % 60 'ının yapım sonrası ve ilk su tutma sırasında olduğu, % 40 'ının ise barajın işletime başlamasından sonra olduğu belirlenmiştir. Baraj içerisindeki düşey yönlü harekeler ise manyetik extensometreler kullanılarak izlenmiştir. Bu ölçü aletleri ile de yine en büyük oturmanın yapım aşaması sırasında gerçekleştiği belirtilmiştir. Ayrıca düşey yönlü tahminler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ağırlık yükü, su basıncı ve sızıntı kuvvetleri olmak üzere üç farklı yük kombinasyonu göz önüne alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ölçü değerleri ile hesaplanan değerlerin uyum içinde olduğu belirtilmiştir.

Yanmaz ve Arı (2011), barajların sağlıklı izlenebilmesi için kullanılan geoteknik ölçme aletlerine değinerek, Gökçekaya beton kemer barajında kullanılan geoteknik ölçme aletlerini incelemişlerdir. İyileştirmenin gerektiği belirtilerek, kullanılacak ölçme aletlerinin hangi özellikte olması gerektiği, ayrıca otomatik veri toplama ve uzaktan izleme sisteminin önemi vurgulanmıştır.

Akanmu ve ark. (2011), Nijerya'daki barajların izlenmesi üzerine gelişmeleri, bu amaçla kullanılan geoteknik ölçme aletlerini ve önemini ayrıntılı olarak açıklamışlardır. Ayrıca uygulama alanı olarak seçtikleri Kainji barajındaki sarkaç, piyezometre ve extensometre verilerini irdelemişlerdir.

Wieland ve Kirchen (2012), yaptıkları çalışmada Punt dal Gall kemer barajını geoteknik ölçme aletleri kullanarak izlemişlerdir. Barajdaki deformasyonları belirlemek amacıyla 5 adet ters sarkaç, ayrıca 57 adet derz ölçer ve çok sayıda termometre ve piyezometre kullanılmıştır. Yapılan değerlendireme sonucunda, mevsimsel sıcaklık değişim etkisinin yoğun olması nedeniyle maksimum radyal hareket 25 mm olarak belirlenmiştir. Ancak su seviyesinin azalmasına rağmen bu hareket kış aylarında gerçekleşmiştir. Ayrıca derz ölçer verilerine göre derz açıklıklarının kış aylarında artıp, yaz aylarında azaldığı belirlenmiştir.

Özkuzukıran ve ark. (2006) yaptıkları çalışmada Kurtun kaya dolgu barajındaki olası hareketler iki boyutlu sonlu elemanlar analizi gerçekleştirerek belirlenmiştir. Analiz hem yapının tamamlanmış durumu (EoC) ve ful rezervuar durumu (RFC) koşulları göz önüne alınarak yapılmıştır. EoC için maksimum yatay hareket 19.5 cm, RFC için ise 36.09 cm olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan düşey yönlü hareketlere göre

yatay yönlü hareketlerin oldukça küçük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca hesaplanan değerlerin ölçü değerleriyle de oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Mata ve ark. (2013), hava sıcaklığının günlük değişiminin beton bir baraj üzerindeki etkisini ve bu duruma barajın yapısal tepkisini incelemişlerdir. Bu amaçla STFT (Short Time Fourier Transform) analizinden yararlanmışlardır. Yapılan uygulamada Alto Lindoso beton barajına yerleştirilmiş sarkaçlardan birinin 2008–2011 yılları arasında meydana gelen yatay yöndeki hareketleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak barajda oluşan yatay yönlü hareketin günlük değişimi ile hava sıcaklığının ilişkisi tanımlanmıştır.

Sevim ve ark. (2012), sonlu elemanlar yöntemi kullanarak Berke kemer barajında deprem nedeniyle oluşacak etkiyi, 1998 yılında meydana gelen Adana-Ceyhan depremi göz önüne alınarak AVT (Ambient Vibration Test) yardımıyla belirlemişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi kalibre edilerek, kalibrasyon öncesi ve sonrası olmak üzere barajın deprem hareketi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre maksimum hareket 14.6 cm (ilk model), 10.3 cm (kalibre edilmiş model) olarak belirlenmiştir. Bu hareketin kretin orta noktasında olduğu ve temelden yukarıya doğru hareketin arttığı, mesnetlere doğru ise azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca yapılan analizlerle maksimum gerilme miktarı olarak 15.4 MPa (ilk model) ve 12.5 MPa (kalibre edilmiş model) elde edilmiştir.

Latifi ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada Alborz toprak dolgu barajındaki, boşluk suyu basınç değerlerini, toplam basınç ve oturma değerlerini geoteknik ölçme aletleri kullanarak belirlemişlerdir. En büyük boşluk suyu basınç değerine barajın temeliyle birleştiği yerde rastlanmıştır. Ayrıca yapım aşaması ilerledikçe yani dolgu artışı ile boşluk suyu basıncındaki değişimin doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Gerilmeleri ölçmek amacıyla 44 adet basınç hücresinden faydalanılmıştır. Benzer şekilde temele yakın yerde yüksek basınç değeriyle karşılaşılmıştır. Barajın tamamlanmasıyla birlikte 135 cm' lik bir oturmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

Wittke ve ark. (2012), URFT ağırlık barajının güven durumunu geoteknik ölçme aletlerinden ve üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminden faydalanarak test etmişlerdir. Barajın izlenmesi sıcaklık, boşluk suyu basıncı ve deformasyon ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 14 ölçüm kesiti oluşturulmuştur. Buralara sıcaklık sensörleri, piyezometreler, ekstensometreler ve sarkaçlar yerleştirilmiştir. Sıcaklık verilerine göre barajın çekirdeğinin yaz ve kış aylarında yaklaşık 9 ºC seviyesinde olduğu ve en büyük sıcaklık farkının ise mansap ve memba su seviyesinin üzerinde

olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yaz ile kış ayları arasında krette 16 ºC'lik bir sıcaklık farkının da oluştuğu belirtilmiştir. Sızıntı verilerine bakıldığında baraj su seviyesiyle arasında lineer bir ilişkinin olduğu vurgulanmıştır. Barajın hareketinin sıcaklık ve su seviyesi ile ilişkili olduğu, sıcaklık değişimine bağlı olarak 10-15 mm lik bir yatay hareketin olduğu belirtilmiştir. Benzer bulgular üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle de elde edilmiştir.

Yanmaz ve Sezgin (2009), Türkiye'deki ilk katı dolgu baraj olan Cindere barajına yerleştirilmiş olan geoteknik ölçme aletlerinin veri toplama yöntemlerini incelemişlerdir. Klasik (manuel) veri toplama yöntemi ile otomatik veri toplama sistemi arasındaki avantaj ve dezavantajları maliyet yönünü de göz önüne alarak değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, Cindere barajında manuel olarak veri toplama yönteminin uygulamada yaygın ve uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Otomatik sistemin ise biraz daha fazla maliyetli olduğu ancak sağladığı imkan açısından çok daha faydalı olduğu belirtilmiştir.

3. BARAJLAR VE ETKİYEN YÜKLER

3.1. Barajlar

Baraj, su biriktirmek üzere akarsu vadisine kurulan bir mühendislik yapısıdır. Barajlar, sulama ve içme suyu sağlama, hidroelektrik enerji üretimi, taşkın önleme vb. amaçlar için inşa edilmektedir. Birden çok amaca hizmet eden barajlar özellikle gelişmekte olan ülkeler için ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir. Uluslar arası büyük barajlar komisyonunun (International Commission on Large Dams, ICOLD) 2013' de yayınladığı rapor verilerine göre dünya genelindeki barajlardan 26938 i bir tek amaç için, 9321 i ise birden çok amaca hizmet için inşa edilmişlerdir. Barajları çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür.

- Büyüklüklerine göre sınıflandırma

Temelden yüksekliği 15 m den daha fazla olan barajlar büyük baraj olarak tanımlanmaktadır. Eğer baraj yüksekliği 10 m ile 15 m arasında değişirse ve aşağıda belirtilen şartlardan en az birini sağlarsa böyle bir barajda yine büyük baraj olarak sınıflandırılır.

- Rezervuar hacmi 1000000 m^3 'ten büyük ise,
- Tepe uzunluğu 500 m' den uzun ise,
- Temel inşaatında özel zorluklar varsa,
- Taşkın debisi 2000 m^3/s' den büyük ise,
- Projesi alışılmış türde değil ise,

Bu şartlardan hiç birini sağlamayan barajlar ise küçük baraj ya da gölet olarak sınıflandırılır.

- Yüksekliklerine göre sınıflandırma

Yüksekliği 100 m 'den fazla olan barajlar yüksek baraj, yüksekliği 50 m - 100 m arasında olan barajlar orta yükseklikte baraj, yüksekliği 50 m den az olan barajlar ise alçak baraj olarak isimlendirilir.

- Yapılış amaçlarına göre sınıflandırma

Barajlar yapılış amaçlarına göre, sulama barajı, enerji üretim barajı, taşkın koruma barajı vb. şeklinde sınıflandırılabilirler

- Fonksiyonlarına göre sınıflandırma

Barajlar fonksiyonlarına göre de biriktirme, taşkın geciktirme ve kabartma olmak üzere sınıflandırılırlar.

- Gövdenin statik projelendirmesine göre sınıflandırma

Buna göre barajlar, ağırlık barajı, kemer ağırlık barajı, payandalı baraj, dolgu barajı, ön germeli baraj şeklinde sınıflandırılır.

- Hidrolik özelliğine göre sınıflandırma

Bu tür barajlar üzerinden su akan baraj ve su akmayan baraj olarak iki şekilde sınıflandırılır.

- Gövde malzemesine göre sınıflandırma

Barajlar gövde malzemesine göre kagir baraj, beton baraj, dolgu baraj, ahşap baraj, çelik baraj, lastik baraj olmak üzere sınıflandırılır (Ağıralioğlu, 2004).

Barajlar sınıflandırılırken çoğunlukla gövde malzemesi dikkate alınmaktadır. Günümüzde yaygın olarak beton ve dolgu barajlar kullanılmaktadır. Bu nedenle gövde malzemesine göre barajlardan dolgu ve beton baraj türleri aşağıda detaylı olarak verilmektedir.

3.1.1. Dolgu ve beton baraj türleri

- Dolgu Barajlar
  - Toprak dolgu barajlar
  - Kaya dolgu barajlar
- Beton Barajlar
  - Beton ağırlık barajlar
  - Beton kemer barajlar
  - Payandalı beton barajlar

3.1.1.1. Dolgu barajlar

3.1.1.1.1. Toprak dolgu barajlar

Dolgu malzemesinin %50 sinden fazlası toprak olan barajlar toprak dolgu baraj olarak adlandırılır. Bu tip barajlar, toprağın aynı tarzda ve ince tabakalar halinde serilip, toprağın nemini istenen seviyeye indirecek şekilde makinelerle sıkıştırılması ile oluşturulan yapılardır (Ağıralioğlu, 2005). Şekil 3.1' de enerji ve içme suyu amaçlı Kırıkkale'de Kızılırmak üzerine inşa edilen Kapulukaya toprak dolgu barajı verilmektedir.



Şekil 3.1. Kapulukaya barajı (http://www2.dsi.gov.tr/baraj/detay.cfm?BarajID=121)

3.1.1.1.2. Kaya dolgu barajlar

Dolgu malzemesinin %50 sinden fazlası kaya türü malzemenin sıkıştırılması ile oluşan baraj türüdür. Bu tür barajlarda geçirimsizliği sağlamak için asfalt, beton veya kil türü malzeme kullanılmaktadır. Sulama ve enerji amacıyla Şanlıurfa'da Fırat nehri üzerine inşa edilmiş, dünyanın sayılı büyük barajlarından biri olan Atatürk barajının gövde yapısı kaya dolgu malzemeden oluşmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Atatürk barajı (http://www2.dsi.gov.tr/baraj/detay.cfm?BarajID=149)

3.1.1.2. Beton barajlar

3.1.1.2.1. Beton ağırlık barajlar

Baraj gölündeki hidrostatik yükü gövde ağırlığı ile karşılayan baraj türüdür. Bu nedenle barajın sağlam temele oturması önemlidir. İsviçre'deki Grande Dixence barajı 285 m yüksekliğinde beton ağırlık tipinde bir baraj olup dünyanın sayılı büyük barajları arasındadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Grande Dixence Barajı (http://hakankaya.wordpress.com/2010/01/13/baraj-ve-baraj-cesitleri/grande%20dixence_01/)

3.1.1.2.2. Beton kemer barajlar

Haznedeki su yükünü ve barajın kendi ağırlığını kemer etkisi ile büyük oranda vadideki yamaçlara aktaran baraj türüdür. Bu nedenle yamaçlar(mesnetler) oldukça sağlam olmalı ve kemer yamaç içerisine iyice kenetlenmelidir. Kemer barajlar sabit merkez açılı, sabit yarıçaplı ve çift eğrilikli olmak üzere üç türden oluşmaktadır. Karaman'da enerji üretmek amacıyla göksu nehri üzerine inşa edilen ve Türkiye'nin ikinci en yüksek barajı olan Ermenek barajı bu türden bir barajdır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Ermenek barajı (http://www2.dsi.gov.tr/bolge/dsi4/karaman.htm)

3.1.1.2.3. Payandalı beton barajlar

Bu tip barajların memba tarafı düz ya da az eğimli betonarme bir perde şeklindedir. Mansap tarafında ise su basıncını temele ileten payandalar vardır. Bu tür barajlar ağırlık barajların özel bir türü olup, ağırlık barajlara oranla daha az betona ihtiyaç duyulur ve temel kazısı daha az olur (Kılıç, 2011). Kanada'daki 214 m yüksekliğe sahip Daniel Johnson barajı bu türden bir baraj niteliğindedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Daniel Johnson barajı (http://imgur.com/xFfHN)

3.2. Barajlara Etkiyen Yükler

Barajlar çeşitli yüklere maruz kalırlar. Bu yükler genel anlamda statik ve dinamik yükler olmak üzere ikiye ayrılır. Statik yükler sürekli yüklerdir. Değişmezler ya da yapının titreşiminin doğal periyoduna göre oldukça yavaş değişirler. Statik yüke, barajın kendi yükü, normal ve sel durumundaki hidrolik yük örnek verilebilir. Dinamik yükler ise doğada geçicidir. Bu yüklerin etki hızlarından dolayı, barajın atalet ve sönümleme karakteristik özelliği barajın hareketini etkilemektedir. Dinamik yüklere örnek olarak, deprem yükü, patlamaya bağlı kuvvetler verilebilir.

Aşağıda dolgu ve beton barajlar için özellikle analizlerde kullanılan yükler verilmektedir.

Dolgu Barajlar

- İnşaat sonu yükleme durumu
- Ani su seviyesi düşmesi durumu
- Kararlı su akış durumu
- Kısmi rezervuar yükü durumu
- Deprem etkisi

Beton barajlar

- Ölü yük
- Hidrolik yük
  - Normal su yükü
  - Taşkın yükü
  - Kaldırma yükü
  - Silt, tortu yükü
  - Buz yükü
- Termal Yük
  - Sıcaklık dağılımı
  - Hava sıcaklığı
  - Rezervuar su sıcaklığı
  - Güneş radrasyonu
  - Beton sıcaklığı
- Deprem yükü

Bu tezde beton kemer baraj incelendiği için aşağıda beton barajlara etkiyen yükler ayrıca detaylı olarak açıklanmıştır.

3.2.1. Beton kemer barajlara etkiyen yükler

3.2.1.1. Ölü yük

Kemer barajlarda ölü yük; barajın kendi ağırlığı ile birlikte köprü, kapak gibi ilave yapıları da içermektedir. Barajın kendi ağırlığı ile karşılaştırıldığında ilave yapıların ağırlığı gerilme analizi de dahil ihmal edilebilir (URL-2).

3.2.1.2. Hidrolik yük

3.2.1.2.1. Normal su yükü

Normal su yükü, hidroelektrik projede normal işlem sırasında memba ve mansap suyundan dolayı baraj yüzeyinde meydana gelen hidrostatik basınçtan oluşmaktadır. Rezervuar seviyeleri maksimum normal yüksek su seviyesine (NHWL) karşılık gelmelidir. Bu da genellikle dolu savak kret seviyesini işaret etmektedir. Normal su yükünün hesaplanmasında memba (headwater) ve mansap (tailwater) suyu basınçlarının derinlik ile doğru orantılı olarak değiştiği düşünülür (URL-2). Bayrak, (2007), yaptığı çalışmada su seviyesindeki artış ve azalmanın baraj hareketlerini benzer oranda etkilediğini göstermiştir.

3.2.1.2.2. Taşkın yükü

Temel taşkın yükü, akış durumu (IDF, Inflow Design Flood) süresince oluşan rezervuar ve giden su seviyelerinden dolayı meydana gelen, barajın karşılaştığı hidrostatik basıncı işaret etmektedir. Akış nedeniyle oluşan su yüklerinin, derinliğe bağlı olarak lineer değişim gösterdiği varsayılmaktadır (URL-2).

3.2.1.2.3. Kaldırma yükü

Kaldırma yükü veya boşluk suyu basınçları, suyun baraj gövdesindeki veya temel eklemlerindeki çatlaklardan içeri girmesi ile oluşur. Kemer baraj ve temeldeki kayalar arasındaki bağlantı yüzeylerinde meydana gelen kaldırma yükü piyezometre değerleri veya sızıntı analizi ile belirlenir. Genelde kaldırma yüklerinin dağılımı, baraj tabanın yanındaki temel kayaların jeolojik durumundan etkilenmektedir (URL-2).

3.2.1.2.4. Silt, tortu yükü

Kemer barajlar genellikle uzun yıllar boyunca rezervuarın tabanında biriken tortul malzeme nedeniyle silt basıncına maruz kalır. Etki eden yükün etkisi tortu kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. V şeklindeki barajlarda tortu kalınlığı baraj yüksekliğinin 1/3 ünden az olması durumunda ihmal edilmektedir (URL-2).

3.2.1.2.5. Buz yükü

Buz yükü baraj yüzeyine etki eden önemli bir yük durumundadır. Buzlanmanın beklendiği rezervuar bölgesinde buz basıncının etkisi göz önüne alınmalıdır. Buz yükü statik ve dinamik yük olarak iki şekilde değerlendirilir. Statik yük durumunda rezervuarın tamamen buzla kaplı olması durumu göz önüne alınır. Dinamik yük durumunda ise yüzen buz kütlelerinin baraja çarpma etkisi göz önüne alınır (URL-2).

3.2.1.3. Termal yük

3.2.1.3.1. Sıcaklık dağılımı

Barajdaki sıcaklık dağılımı gövdenin kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle ince kemer barajlarda memba tarafındaki rezervuar sıcaklığından mansap yüzeyindeki hava sıcaklığına kadar lineer sıcaklık dağılımı, makul bir yaklaşım sağlamaktadır. Lineer sıcaklık dağılımı sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenebilmektedir (URL-2).

3.2.1.3.2. Hava sıcaklığı

Bir baraj yerindeki hava sıcaklığı tahminleri, baraj ya da civarında önceden ölçülen hava sıcaklıklarına dayanmaktadır (URL-2).

3.2.1.3.3. Rezervuar su sıcaklığı

Rezervuar su sıcaklığı, derinlik ve mevsime bağlı olarak değişmektedir. Sıcaklıklar rezervuarın baraj gövdesine yakın kısmında ölçülmektedir (URL-2).

3.2.1.3.4. Güneş radyasyonu

Güneş ışınlarına maruz kalan baraj yüzeyi normalden çok daha fazla ısınmaktadır. Bu nedenle güneş radyasyonu kış şartlarında sıcaklık yükünü düşürücü etkiye, yaz durumunda ise artırıcı etkiye sahiptir (URL-2).

3.2.1.3.5. Beton sıcaklığı

Hava veya su tarafındaki beton sıcaklığının genliği ve değişim aralığı sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenebilmektedir (URL-2).

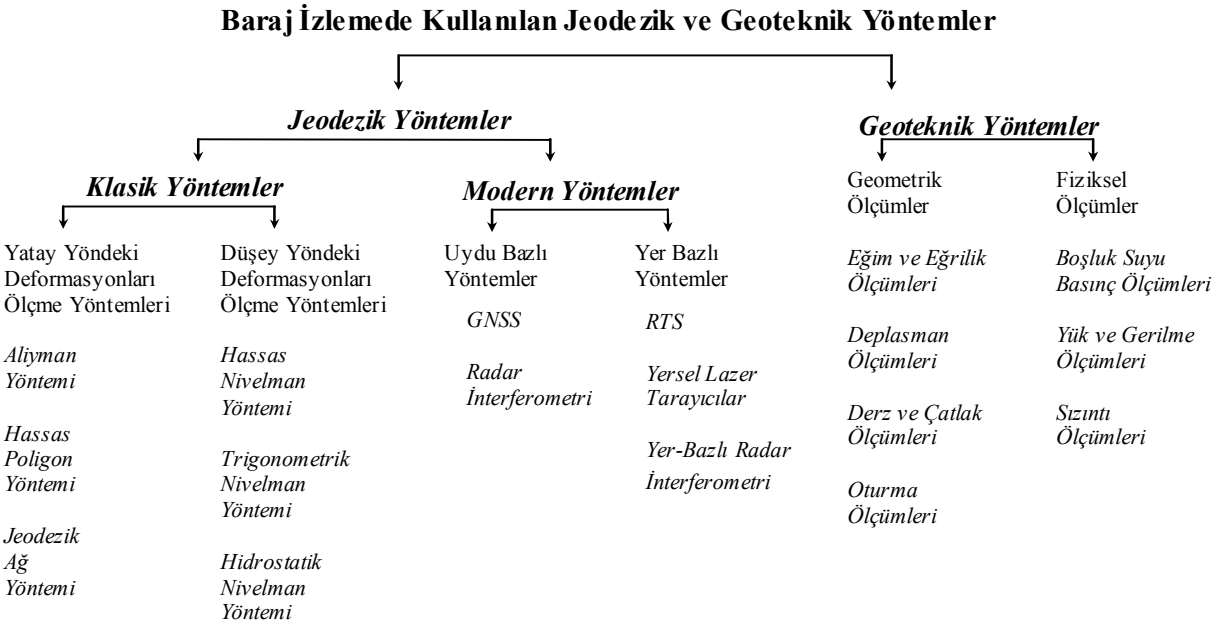
3.2.1.4. Deprem yükü

Projelendirmede genellikle yatay ve düşey deprem yükleri göz önüne alınır. Baraj gölünün dolu olması durumu, yerkabuğunu membaya ve aşağı doğru hareketi sırasında oluşur. Deprem memba'dan mansab'a doğru oluşursa, su ve toprağın mansaba doğru olan basıncı artar. Ayrıca barajın ağırlığı sebebiyle mansaba doğru yatay doğrultuda atalet kuvveti oluşur. Deprem yerkabuğunu aşağı yönde hareket ettirirse, aşağıdan yukarıya doğru oluşan atalet kuvvetleri nedeniyle, eğik yüzeyler üzerinde bulunan su ve toprak ağırlığı ile barajın kendi ağırlığı azalır. Deprem kuvvetlerini hesaplamak için, barajı etkileyebilecek depremin şiddetini bilmek gerekir (Gedik, 2013).

4. BARAJLARIN JEODEZİK VE GEOTEKNİK YÖNTEMLERLE İZLENMESİ

Baraj ve çevresinde çeşitli faktörlerden dolayı deformasyonlar meydana gelmektedir. Bunları iç ve dış faktörler olarak ikiye ayırmak mümkündür. Dış faktörlere örnek olarak deprem, sel, patlama vb. verilebilir. İç faktörlere ise baraj temelindeki desteklenemeyen jeolojik yapılar, çeşitli kusurlar, malzeme yapısı, uzun süreli işletim nedeniyle oluşan yapısal bozukluklar örnek verilebilir. Bu faktörlerin yanı sıra su yükü, su basıncı etkisi ve sıcaklık değişimleri deformasyonlara neden olan faktörler arasındadır (Vladimir ve Milos, 2004).

Yukarıda bahsedilen faktörler nedeniyle barajların izlenmesi, varsa değişimlerin belirlenmesi ve bu değişimlerin önemli olup olmadığının istatistiksel olarak belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla barajlar günümüzde çeşitli yöntemler ile izlenmektedir. Bu yöntemleri genel anlamda jeodezik ve geoteknik yöntemler olarak ikiye ayırmak mümkündür (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Baraj izlemede kullanılan jeodezik ve geoteknik yöntemler

Bu iki yöntemi karşılaştıracak olursak;

- Jeodezik yöntemlerle baraj izleme anlamında sadece deformasyon belirleme çalışması yapılabilmekte iken, geoteknik yöntemler ile deformasyon ölçülerinin

yanı sıra yük değerleri, gerilme ve boşluk suyu basıncı gibi önemli parametreler de elde edilebilmektedir.

- Jeodezik yöntemler ile genelde yüzey deformasyonları belirlenebiliyor iken geoteknik yöntemlerde böyle bir kısıtlama söz konusu olmayıp yüzey altındaki deformasyonlarda belirlenebilmektedir.
- Çoğu geoteknik aletin verileri otomatik olarak toplanmakta olup, verilere uzaktan erişim de söz konusu olabilmektedir.
- Extensometre, inklinometre gibi çoğu geoteknik ölçme aletleri ile sadece bağıl değişimler belirlenebiliyorken jeodezik yöntemler ile ilave olarak mutlak değişimler de belirlenebilmektedir.
- Birçok geoteknik ölçme aletinin bozulması durumunda bulunduğu yerden çıkarıp tamir etmek pek mümkün olmamaktadır. Böyle bir durum jeodezik ölçme aletlerinde söz konusu değildir.

Yukarıda belirtildiği gibi, yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları söz konusudur. Her iki yöntemin avantajları göz önüne alındığında baraj bölgesinin geniş kapsamlı olarak izlenmesi ve elde edilecek bulguların doğru yorumlanmasında büyük katkı sağlayabilir.

4.1. Jeodezik Yöntemler

Jeodezik yöntemler, klasik ölçme yöntemleri ve modern yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Klasik yöntemlerden yatay yönlü deformasyonları belirlenmesinde, aliyman yöntemi, hassas poligon yöntemi ve jeodezik ağ yöntemi kullanılmaktadır. Düşey yönlü deformasyonların belirlenmesinde ise; hassas geometrik nivelman yöntemi, trigonometrik nivelman yöntemi ve hidrostatik nivelman yöntemi kullanılmaktadır. Modern yöntemler ise uydu bazlı yöntemler ve yer bazlı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Uydu bazlı yöntemler; GNSS ve radar interferometridir. Yer bazlı yöntemler ise RTS (Robotik Total Station), yersel lazer tarayıcılar ve yer bazlı radar interferometridir.

4.1.1. Aliyman yöntemi

Bu yöntemde sabit bir doğrultudan olan yatay yöndeki deformasyonlar kolaylıkla ve doğrudan belirlenir. Aliyman doğrultusu beklenen deformasyon yönüne dik seçilmelidir. Aliyman uç noktaları sağlam zemine sabit nokta olarak tesis edilir.

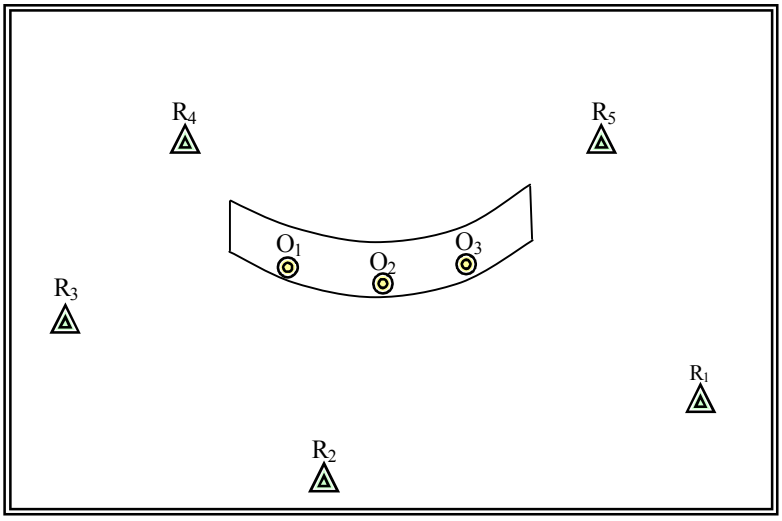
Aliyman doğrultusu üzerinde mümkün olduğunca eşit aralıklarda obje noktaları belirlenir. Bu yöntem genellikle barajlarda kret üzerinde uygulanır. Aliymanın bir ucuna teodolit diğer ucuna gözlem levhası yerleştirilir. Doğrultudan olan sapmalar, doğrultuya olan uzaklıkların doğrudan ölçülmesi ile (direkt yöntem) ya da sapma açılarının ölçülmesi ile (açı yöntemi) belirlenir (İnal, 2010).

4.1.2. Hassas poligon yöntemi

Kenarları ve açıları yüksek doğrulukta ölçülmüş poligon demektir. Noktalar kret üzerine ya da varsa kontrol galerilerine tesis edilir. Poligon dizisi oldukça gergin olmalıdır. Poligon kenar uzunlukları birbirine eşit olacak şekilde 20-50 m arasında seçilmelidir. Geçki yönü x ekseni olarak alınırsa, buna dik olan eksen y ekseni olarak alınır. Böylece y ekseni enine kaymayı ifade etmektedir. Poligon noktalarının koordinatları en küçük kareler yöntemine (EKK) göre dengeleme ile belirlenir (İnal, 2010).

4.1.3. Jeodezik ağ yöntemi

Bu yöntemde jeodezik ağ ölçülerle birbirine bağlı noktalardan oluşur. Jeodezik ağdaki noktalar; referans noktaları (R_1,R_2…) obje noktalarından(O_1,O_2…) oluşmaktadır. (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Jeodezik ağı oluşturan noktalar

Jeodezik ağ, doğrultu ağı, kenar ağı, doğrultu-kenar ağı ya da GNSS ağı olarak oluşturulabilir. Ölçümlere başlamadan önce ölçme yöntemi ve kullanılacak aletler

belirlenir. Aletlerin eksen kontrolleri yapılır, varsa hatalar giderilir. Ölçü sırasında sıcaklık, basınç gibi etkiler göz önüne alınır.

4.1.4. Hassas geometrik nivelman yöntemi

Bu yöntem baraj gövdesi ve yakın çevresindeki çökmelerde kullanılır. Ölçülerin yüksek duyarlılıkla elde edilmesi için hata kaynaklarının araştırılıp, giderilmesi gerekir. Ölçmelerde çift bölümlü invar miralar kullanılır. Ölçmelerde nivoların eksen kontrollerinin yapılması gerekir. Özel ölçme yöntemleri kullanılmaktadır. Hassas nivelmanda yüksek doğruluk elde etmek için;

- Alet sağlam zemine kurulmalıdır,
- Gözleme uzaklıkları eşit ve maksimum 30 m olmalıdır,
- Refraksiyon etkisini azaltmak amacıyla ölçüm ışını yerden en az 70 cm yukarıdan geçmelidir,
- Mira bölüm başlangıç hatasını en aza indirgemek için, ölçüm hangi mira ile başlamışsa o mira ile bitirilmelidir,
- Ölçü mümkünse kapalı havalarda yapılmalıdır,
- Tek taraflı çökmelere neden olmamak için ölçüm kısa sürede bitirilmelidir,

hususları göz önüne alınmalıdır (İnal, 2010).

4.1.5. Trigonometrik nivelman yöntemi

Trigonometrik nivelman, iki nokta arasındaki yükseklik farklarının düşey açı ve uzunluktan yararlanarak belirlenmesidir. Hedef uzaklığı 100 m den çok fazla değilse ve uzaklıklar yeterli doğrulukta belirlenebiliyorsa deformasyonların belirlenmesinde bu yöntem kullanılabilir. Hedef uzaklığı doğrudan ölçülemiyorsa, nokta konumları önden kestirme ile belirlenir (İnal, 2010).

4.1.6. Jeodezik ölçülerin değerlendirilmesi ve deformasyon analizi

Deformasyon araştırmasının son ve en önemli bölümü yukarıda belirtilen yöntemlerle elde edilen verilen değerlendirilmesi ve sonuçların yorumlanması aşamasıdır. Deformasyon araştırmasında t_1 ve t_2 zamanlarında yapılan periyot ölçüleri ayrı ayrı serbest dengelenir. Uyuşumsuz ölçüler ayıklanır. Ardından muhtemel hareketler kullanılan ölçme yöntemine ve beklenen hareketlerin durumuna göre çeşitli modeller ile incelenir. Bunlar;

- Zamana bağlı olmayan statik deformasyon modelleri
- Zamana ve konuma bağlı olan kinematik deformasyon modelleri
- Hareketin nedeninin de göz önüne alındığı zamana ve konuma bağlı dinamik deformasyon modelleri

şeklinde sıralanır.

4.1.6.1. Statik deformasyon modeli

Bu modelle deformasyonların belirlenmesinde obje farklı periyotlarda ölçülerek her periyottaki ölçüler ayrı ayrı dengelenmektedir. Ölçü periyotları arasındaki koordinat farkları hem objedeki deformasyonları hem de gözlem hatalarını yansıtmaktadır. Bu nedenle periyotlar arasındaki koordinat farkları istatistiksel yöntemlerle test edilerek deformasyon araştırması yapılır. Bu modelde her periyoda ilişkin ölçüler yapıldığı sırada herhangi bir hareketin olmadığı düşünülür.

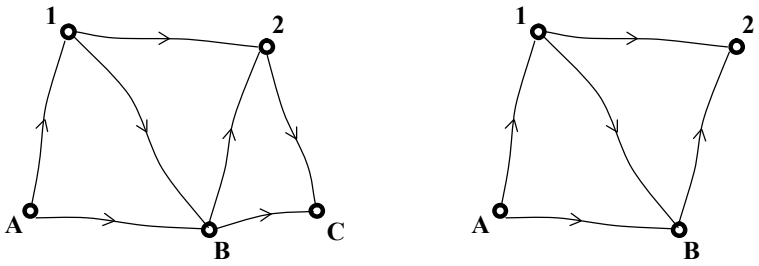
Statik deformasyon analizinde genellikle aşağıdaki yöntemlerden biri kullanılarak deformasyon analizi gerçekleştirilir,

- θ^2 ölçütü veya ortalama aykırılıklar yöntemi ile deformasyon analizi,
- Bağıl güven elipsleri yöntemi ile deformasyon analizi,
- S transformasyonu yardımı ile deformasyon analizi,
- Mierlo yöntemi ile deformasyon analizi
- Cholesky çarpanlara ayırma yöntemiyle deformasyon analizi.

Bu çalışmada defomasyon analiz işlemi gerçekleştirilirken S transformasyonu yöntemi kullanılmıştır. Bu nedenle S transformasyonu yöntemi ile deformasyon analizini kısaca açıklanmıştır.

4.1.6.1.1. S transformasyonu yöntemi ile deformasyon analizi

1950 yıllarında Baarda tarafından gerçekleştirilmiştir. S transformasyonu ile yeni bir dengelemeye gerek kalmadan bir datumdan diğer bir datuma geçiş sağlanır.



1. periyot (t_1 zamanı) 2. periyot (t_2 zamanı)

Şekil 4.3 Multivaryant ağ

Şekil 4.3 de görüldüğü üzere, t_1 ve t_2 zamanında gözlenen ağ geometrileri farklı ise global test yalnızca eşlenik noktalardan oluşan ağ bölümlerini kapsar. Başka bir ifade ile t_1 ve t_2 zamanında ölçülen ağlar eşlenik noktalara göre konumlandırılır.

Anlamlı nokta hareketlerinin araştırılmasında sürekli datum değişikliği zorunlu olduğundan karşılaştırılacak ağları önce herhangi bir datumda (defekt sayısı kadar parametreyi sabit alarak) dengelemek ve sonuçları istenen datuma dönüştürmek kolaylık sağlar. Bu durumda ölçülere gelen düzeltmeler (v_i), birim ağırlıklı ölçünün ortalama hatası sabit kalır. Değişen parametreler ise, yüksekliklere ait kofaktör matrisi ve nokta konum hataları olarak sıralanabilir.

t_n zamanda ölçülen bir ağda "e" ile tanımlanan eşlenik noktaların koordinat bilinmeyenleri ilk sırada, "b" ile tanımlanan diğer noktaların koordinatları ve başka bilinmeyenler ikinci sırada olmak üzere herhangi bir i datumunda serbest dengeleme ile belirlenmiş olsun. Buna göre i datumuna ilişkin X_i parametreler vektörü;

$$X_i = \begin{bmatrix} X_e^i \\ X_b^i \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

biçiminde iki alt vektöre ayrılır. Burada;

X_e^i : Eşlenik noktaların koordinat bilinmeyenleri

X_b^i : Diğer noktaların koordinat bilinmeyenleri ve başka bilinmeyenleri

göstermektedir. Bu duruma karşılık ağırlık katsayıları matrisi i datumunda

$$\underline{Q}_{xx}^i = \begin{bmatrix} Q_{ee}^i & Q_{eb}^i \\ Q_{be}^i & Q_{bb}^i \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

şeklinde belirlenir.

Yukarıda verilen ağa göre X_e^i içinde A, B, 1, 2' ye ilişkin bilgiler bulunmakta, X_b^i içinde ise C' ye ilişkin bilgiler bulunmaktadır. Ayrıca X_b^i içinde, bu ağ nivelman ağı değilde trigonometrik nivelman ağı olsaydı "k" kırılma katsayısı da dahil edilebilirdi.

Datum seçimi E matrisi köşegenin üzerinde datumu belirleyen nokta koordinatlarına karşılık bir "1" diğerleri için sıfır " 0" içeren bir köşegen matris olmak üzere

$$G = \begin{bmatrix} G_e \\ G_b \end{bmatrix} \text{ ve } B_j = E_j G = \begin{bmatrix} G_e \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

$$S_j = I - G\left(B_j^T G\right)^{-1} B_j^T \tag{4.4}$$

S_j transformasyon matrisi ile i datumundan ağın eşlenik noktalara göre konumlandırılmasını sağlayan j datumuna

$$X_j = S_j X_i \tag{4.5}$$

$$Q_{xx}^j = S_j Q_{xx}^i S_j^T \tag{4.6}$$

geçilir.

Datum işlemleri 1. ve 2. periyot için ayrı ayrı yapılarak aynı bir j datumunda eşlenik noktaların $\left(X_e^j\right)_1$, $\left(X_e^j\right)_2$ koordinat bilinmeyenleri ile bunların $\left(Q_{ee}^j\right)_1$ ve $\left(Q_{ee}^j\right)_2$ ağırlık katsayıları matrisleri bulunur.

Eşlenik noktaların global testi için;

$$H_0 = E\left(X_e^j\right)_1 = E\left(X_e^j\right)_2 \tag{4.7}$$

$$d_e = \left(X_e^j\right)_2 - \left(X_e^j\right)_1 \tag{4.8}$$

$$\left(Q_{dd}\right)_e = \left(Q_{ee}^j\right)_1 + \left(Q_{ee}^j\right)_2 \tag{4.9}$$

$$R_e = d_e^T \left(Q_{dd}\right)_e^+ d_e \tag{4.10}$$

ve R_e' nin serbestlik derecesi $h_e = u_e - d$ ile gösterilirse;

$$F = \frac{R_e}{m_0^2 h_e} \tag{4.11}$$

$F > F_{h_e,f,1-\alpha}$ ise ağın eşlenik noktalarından oluşan bölümünde deformasyon vardır (İnal, 2000).

4.1.6.1.1.1. S transformasyonu yardımıyla anlamlı nokta hareketlerinin araştırılması

Global test sonucu ağın bütününde ya da eşlenik noktalar bölümünün herhangi bir yerinde deformasyon olduğuna karar verilmişse hareketli noktaların araştırılmasına geçilir. Eşlenik noktalarda her birinin yer değiştirmiş olabileceği düşünülerek i datumunda serbest dengeleme ile belirlenmiş bir periyoda ilişkin (4.1) parametreler vektörü ve (4.2) ağırlık katsayıları matrisi uygun biçimde bölümlere ayrılır.

$$X_i = \begin{bmatrix} X_s^i \\ X_h^i \\ X_b^i \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

X_s^i : Sabit kabul edilen eşlenik nokta koordinatları

X_h^i : Hareket ettiği varsayılan nokta koordinatları

X_b^i : Eşlenik olmayan noktalara ilişkin parametreler ve diğer bilinmeyenler

$$\underline{Q}_{xx}^i = \begin{bmatrix} Q_{ss}^i & Q_{sh}^i & Q_{sb}^i \\ Q_{hs}^i & Q_{hh}^i & Q_{hb}^i \\ Q_{bs}^i & Q_{bh}^i & Q_{bb}^i \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

t_n zamanında ölçülen ağ şimdi koordinatları X_s içinde toplanan ve sabit kabul edilen noktalara göre konumlandırılmaktadır. Bu datum k ile gösterilirse (4.12) ve (4.13) ayrımına uygun olarak (4.3) yerine,

$$G = \begin{bmatrix} G_s \\ G_h \\ G_b \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad B_k = E_k G = \begin{bmatrix} G_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

matrisleri ile (4.4)' den S_k transformasyon matrisi bulunmalı ve her bir periyot için

$$\begin{bmatrix} X_s^k \\ X_h^k \\ X_b^k \end{bmatrix} = S_k \begin{bmatrix} X_s^i \\ X_h^i \\ X_b^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{ss}^k & Q_{sh}^k & Q_{sb}^k \\ Q_{hs}^k & Q_{hh}^k & Q_{hb}^k \\ Q_{bs}^k & Q_{bh}^k & Q_{bb}^k \end{bmatrix} = S_k \begin{bmatrix} Q_{ss}^i & Q_{sh}^i & Q_{sb}^i \\ Q_{hs}^i & Q_{hh}^i & Q_{hb}^i \\ Q_{bs}^i & Q_{bh}^i & Q_{bb}^i \end{bmatrix} S_k^T \tag{4.15}$$

transformasyonu yapılmalıdır.

Sabit kabul edilen noktaların,

$$H_0 = E\left(X_s^k\right)_1 = E\left(X_s^k\right)_2 \tag{4.16}$$

sıfır hipotezinin testi için (4.8), (4.9), (4.10) eşitliklerine uygun olarak iki periyoda ilişkin X_s alt vektörlerini d_s koordinat farkları

$$d_s = \left(X_s^k\right)_2 - \left(X_s^k\right)_1 \tag{4.17}$$

ve bunların ağırlık katsayıları

$$\left(Q_{dd}\right)_s = \left(Q_{ss}^k\right)_1 + \left(Q_{ss}^k\right)_2 \tag{4.18}$$

hesaplanır. Düzeltmelerin kareleri toplamı için artım miktarı,

$$R_s = d_s^T \left(Q_{dd}\right)_s^+ d_s \tag{4.19}$$

formülü elde edilir.

(4.12) - (4.19) işlemleri X_e alt vektöründeki noktalardan her biri için tekrarlanarak her defasında X_s ve X_h ayrımına karşılık bir R_s değeri bulunur. Global test sonucunda ağın herhangi bir yerinde deformasyon olduğuna karar verilmişse;

$\left(R_s\right)_{\min} = \min$ ($R_{s,i}$ i: 1, 2,…, p) (p: eşlenik nokta sayısı) (4.20)

$\left(R_s\right)_{\min}$ olan noktalardaki hareketi anlamlı olduğu görülür. (4.11)'e göre

$$F = \frac{R_s}{m_0^2 h_s} \tag{4.21}$$

test büyüklüğü hesaplanır. Tablo değeri ise $F_{tablo} = F_{h_s, f, 1-\alpha}$ şeklinde hesaplanır. $F > F_{tablo}$ ise $\left(R_s\right)_{\min}$ olan noktada %95 ihtimal ile deformasyon vardır. Sonraki adımlarda bu nokta X_b vektörü içine obje noktası alınarak test tekrarlanır (İnal ve Ceylan, 2002).

4.2. Geoteknik Yöntemler

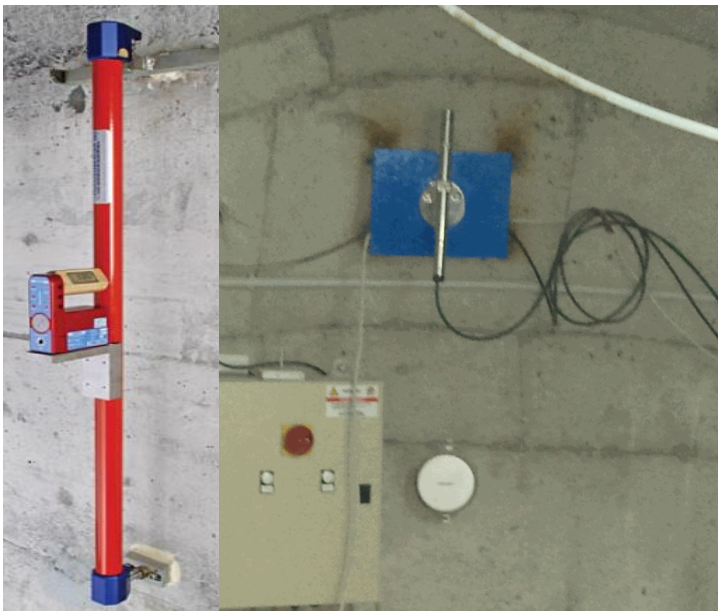
Geoteknik yöntemler genel anlamda fiziksel ve geometrik ölçmeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Chrazanowski ve Massiera, 2006). Fiziksel ölçümler: boşluk suyu basınç ölçümleri, yük ve gerilme ölçümleri, sızıntı ölçümleri vb., oluşmaktadır.

Geometrik ölçümler ise: eğim, eğrilik ölçümleri, deplasman ölçümleri, yatay hareket ölçümleri, derz ve çatlak ölçümleri, oturma ölçümleri vb.,'den oluşmaktadır.

Barajlarda beklenen hareketin büyüklüğüne göre farklı doğruluk ve hassasiyete sahip geoteknik ölçme aletleri kullanılmaktadır.

4.2.1. Klinometre

Yapılardaki eğim değişimlerini izlemek amacıyla kullanılan bir geoteknik ölçme aletidir. Hem manüel hem de otomatik türleri mevcuttur (Şekil 4.4). Genellikle beton baraj türlerinde sarkaç ölçüm noktalarının yakınına tesis edilirler. Bunun nedeni okunan değerlerin birbirini doğrulayıp doğrulamadığının araştırılmasına yardımcı olmaktır.



Şekil 4.4. Klinometre örnekleri

4.2.2. Çatlak, Derz ölçer

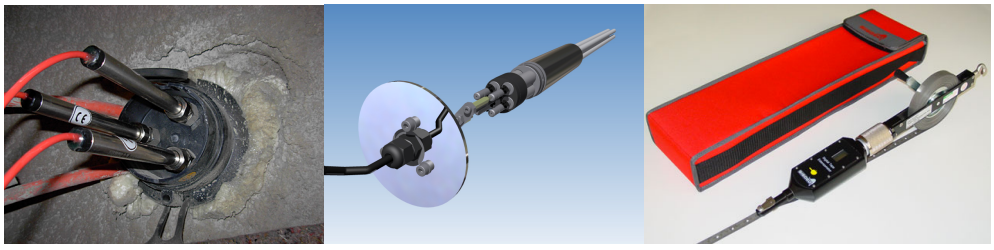
Kaya kütlelerinde oluşan çatlakların ölçülmesinde ya da özellikle beton barajlarda derz açıklıklarının izlenmesi amacıyla kullanılan geoteknik ölçme aletidir. Çatlak/Derz ölçerin, hareketi belirlenecek olan açıklığın iki tarafına sabit uçlarının yerleştirilmesiyle değişim otomatik olarak izlenmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Çatlak ve derz ölçerler

4.2.3. Extensometre

Ekstensometreler, deplasman ölçüleri için kullanılan geoteknik ölçme aletleridir. Çubuk, şerit, minyatürize edilmiş çok noktalı olmak üzere çeşitli türleri mevcuttur. Barajlarda genellikle galerilere ve mesnetlere yerleştirilirler. Bu sayede kaya hareketleri (uzama kısalma) ölçülebilmektedir. Şekil 4.6'de farklı ekstensometre türlerine örnekler verilmektedir.



Şekil 4.6. Ekstensometre örnekleri (soldan sağa:çubuk, minyatürize edilmiş, şerit)

4.2.4. İnklinometre

Yerleştirildikleri sondaj deliğinin eksenine dik yönde oluşan hareketlerin ölçülmesinde kullanılırlar. İnklinometre sayesinde sondaj deliğinin iki tarafında da oluşan sapmaların yeri, yönü ve büyüklüğü belirlenebilmektedir. İnklinometre aleti esnek bir boru içerisinde deliğe indirilen algılayıcı uç, kayıt cihazı ve bunlar arasındaki bağlantıyı sağlayan kablolardan oluşmaktadır. Düşey inklinometre algılayıcılarıyla yatay yönde meydana gelen sapmalar, yatay algılayıcılar ile ise düşey yönde meydana gelen şişme ve oturma büyüklükleri belirlenebilmektedir (Şekil 4.7). Sondaj delikleri barajlarda genellikle mesnetlere açılmaktadır.



Şekil 4.7. İnklinometre aleti

4.2.5. Sarkaç

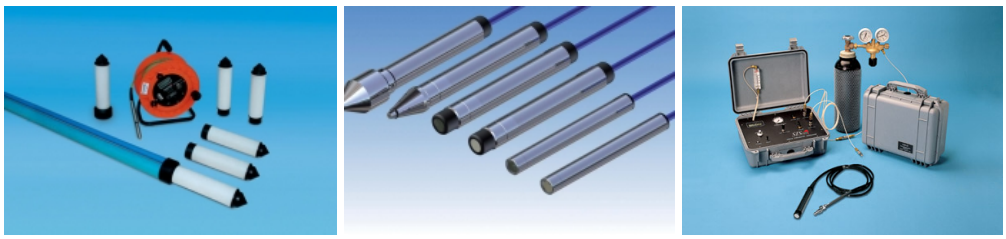
Sarkaç, barajlarda yatay yönde oluşan hareketleri belirlemek amacıyla kullanılır. Düz ve ters olmak üzere iki türü bulunmaktadır. Düz sarkaçda, çelik bir telin, bir tarafı yapının üst kısmına sabitlenmiştir. Diğer tarafı ise daha aşağıda içi sıvı dolu bir tank içerisinde bulunan ve hareket edebilen bir ağırlığa bağlanmaktadır. Ters sarkaçta ise telin sabitlenen kısmı yapının altındaki sağlam kaya kütlesine sabitlenmekte, üst kısmı ise tank içerisinde serbest hareket edebilen ve teli düşey olarak tutabilen bir yapıya bağlanmaktadır. Veriler genelde otomatik olarak toplanmakta olup, okuma üniteleri tankın hemen yakınında bulunmaktadır (Şekil 4.8). Barajdan beklenen hareketin büyüklüğüne göre kullanılan sarkaç telinin koordinat ölçüm cihazlarının doğrulukları değişmektedir. Örneğin oldukça yüksek doğruluğa sahip Tel-310S tele-koordinat ölçerin çözünürlüğü 0.005 mm olup, doğruluğu x ekseni için ±0.007 mm y ekseni için ise ±0.012 mm dir.



Şekil 4.8. Ters ve düz sarkaçlar

4.2.6. Piyezometre

Suya doygun ya da yarı doygun zeminlerde, yeraltı suyu seviyesinin ya da boşluk suyu basıncının izlenmesinde kullanılır. Dolgu ve beton barajlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Barajın farklı noktalarına yerleştirilen piyezometreler ile belirlenen basınç değerleri yardımıyla tehlike sınırını aşan yerler belirlenebilmekte ve ilgili yerlere açılan sondaj delikleri sayesinde de tehlike önlenebilmektedir. Standpipe, pnömatik ve titreyen telli olmak üzere çeşitli türleri mevcuttur (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Piyezometre örnekleri (soldan sağa: standpipe, titreyen telli, pnömatik)

4.2.7. Debi ölçer

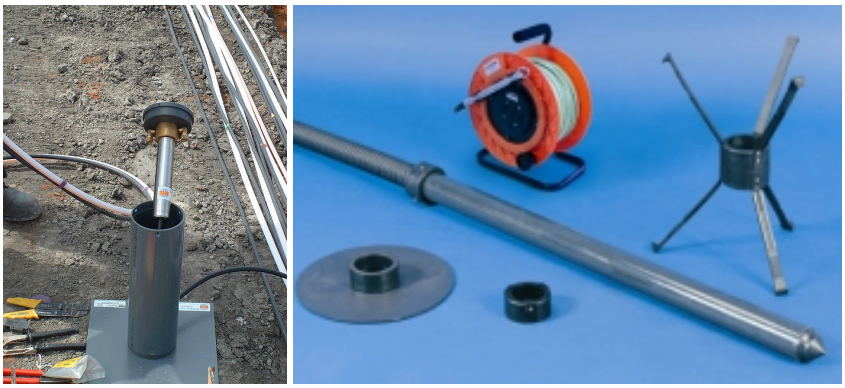
Barajlarda genellikle, piyezometrenin yüksek basınç gösterdiği yerlerde açılan sondaj deliklerinden çıkan suyun debisini ölçmek amacıyla kullanılan geoteknik ölçme aletidir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Debi ölçer

4.2.8. Manyetik oturma kolonları

Zemin içerisinde farklı derinliklerde meydana gelen düşey yönlü hareketlerin belirlenmesi için kullanılan geoteknik ölçme aletidir. Oturma kolonları açılan sondaj kuyusu içerisine yerleştirilen bir boruya bağlı manyetik halkalardan oluşur. Boru içerisine belirli aralıklarla indirilen algılayıcı uç sayesinde halkaların düşey hareketleri belirlenir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Manyetik oturma kolonları

4.2.9. Yük hücresi

Yük hücreleri kaya kütlesi, istinat duvarı, mesnet vb gibi yapılardaki yükleri ve yük değişimlerini belirlemek için kullanılan geoteknik ölçme aletleridir (Şekil 4.12). Barajlarda mesnetlere yerleştirilen bu aletler otomatik olarak yük değişim değerlerini belirlemektedir. Yakınlarına genelde extensometrelerin yerleştirilmesi ile verilerinin doğruluğu test edilebilmektedir.



Şekil 4.12 Yük hücresi örneği

4.2.10. Basınç hücresi

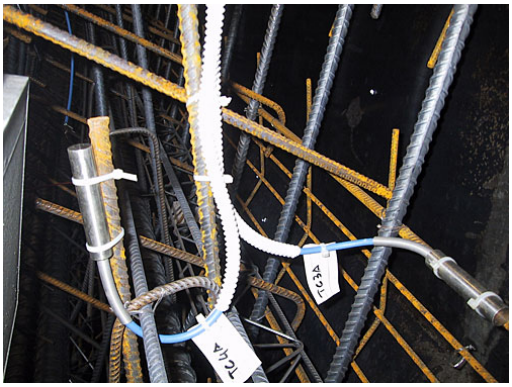
Basınç hücreleri, çeşitli yapılarda meydana gelen basınç miktarlarını belirlemek için kullanılırlar. Toprak basınç hücreleri ve hidrolik basınç hücreleri olmak üzere türleri mevcuttur. Toprak basınç hücreleri toprak dolgu barajlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrolik basınç hücreleri ise beton ya da kazı yüzeyinde oluşan gerilmeleri belirlemek için kullanılır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Basınç hücreleri (toprak, hidrolik)

4.2.11. Teletermometreler

Teletermometreler, özellikle beton barajlara yerleştirilen geoteknik ölçme aletidir. Yapı ile ilgili detayların incelenmesi sırasında oldukça önemli olan sıcaklık değerleri bu cihazlar sayesinde belirlenmektedir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Betonlama öncesi yerleştirilen teletermometre

5. ERMENEK BARAJI VE KULLANILAN YÖNTEMLER

5.1. Ermenek Barajı Teknik Özellikleri

Dünyanın sayılı yüksek barajlarından, Türkiye'nin ise ikinci en yüksek barajı olan Ermenek barajı çift eğrilikli asimetrik yapıya sahip, ince beton kemer bir barajdır. Gövde kalınlığı krette 7 m en alt kısımda ise 25 m dir. Baraj oldukça derin ve dar bir vadiye inşa edilmiştir. Genişliği en üst kesimde 150 m, en alt kesimde ise 5 m den daha azdır. Yapımına BM Mühendislik ve İnşaat A.Ş. tarafından 2002 yılında başlanmış olup, 2009 yılında tamamlanmıştır. Enerji üretmek amacıyla yapılan baraj Karaman sınırları içerisinde Göksu nehri üzerine kurulmuştur. Barajın konumu şekil 5.1' de teknik özellikleri ise çizelge 5.1' de verilmektedir.



Şekil 5.1 Ermenek barajı ve konumu (hava fotoğrafları(sağ) Google Earth'den alınmıştır (http://www.google.com/earth/))

Çizelge 5.1 Ermenek barajının teknik özellikleri

Yeri	*Karaman/TÜRKİYE*
Akarsu	*Göksu*
Amacı	*Enerji*
Yapım yılı (başlama-bitiş)	*2002-2009*
Gövde dolgu tipi	*İnce Beton Kemer*
Yüksekliği	*210 m*
Kret uzunluğu	*123 m*
Reservuar hacmi	*4582 hm³*
Reservuar alanı	*58.74 km²*
Elektrik üretim kapasitesi (yıllık)	*1047.86 Wh*

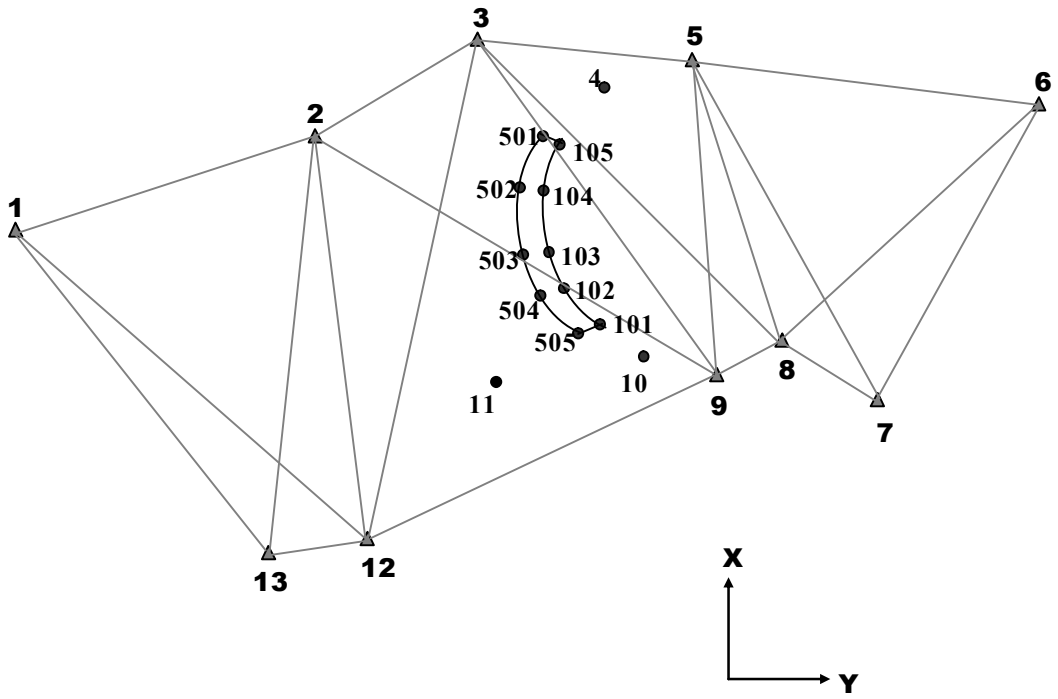
5.2. Ermenek Barajının İzlenmesinde Kullanılan Jeodezik ve Geoteknik Yöntemler

Ermenek barajındaki deformasyon izleme çalışmaları jeodezik ve geoteknik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Jeodezik yöntemler ile deformasyon izleme çalışmaları 03.01.2011 tarihinde başlamış olup, ölçümler periyodik olarak gerçekleştirilmektedir. Ancak geoteknik ölçümlerin başlama tarihleri ölçme aletlerinin yerleştirildikleri tarihlere göre değişmektedir. Bu cihazlar genelde inşaat aşamasında yerleştirilip ölçü alındığı için barajın alt kısımlarındaki ölçme aletlerinin ölçüm başlangıç tarihleri 2009-2010 yılları arasında değişmekte olup üst kısımlarda ise özellikle galeri 1 ve galeri 2 de ise ölçüler 2011 yılında başlamıştır. Mesnetlere yerleştirilen ekstensometre ve yük hücrelerinin ise ölçü başlangıç tarihleri 2006 dır.

5.2.1. Jeodezik yöntemler

5.2.1.1. Yatay yönlü hareketlerin izlenmesi

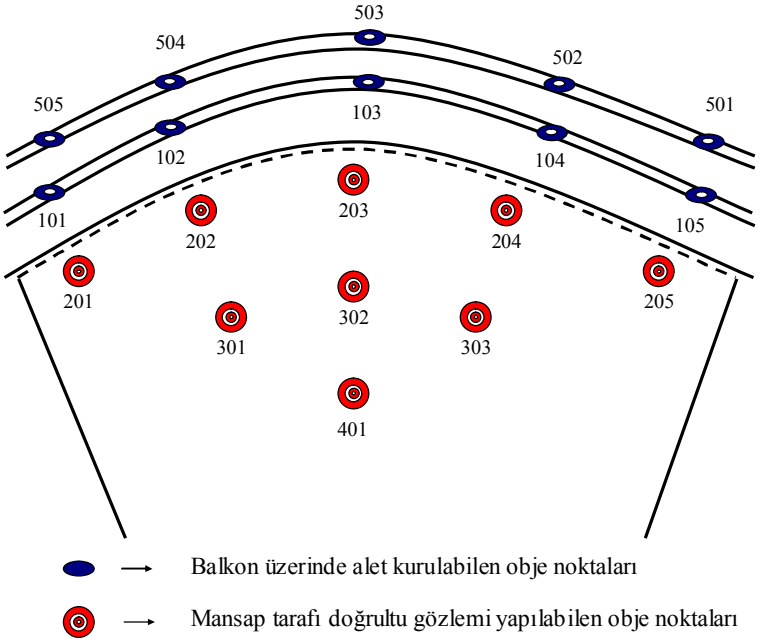
Ermenek barajında baraj su seviyesinin yükselmesi ve çevresel etkilerle oluşabilecek olası yatay yönlü hareketlerin izlenmesi ve analizi amacıyla 10 referans ve 27 obje noktasından oluşan mikro jeodezik bir ağ oluşturulmuştur (Şekil 5.2) (İnal ve ark, 2011). Referans noktaları BM mühendislik tarafından Pilye olarak sağlam zeminlere tesis edilmiştir. Obje noktalarının baraj üzerindeki yerlerinin seçimi ve ölçü planlaması, Selçuk Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof.Dr. Cevat İNAL, Gebze Y.T.E. öğretim üyesi Y.Doç.Dr. Cemal Özer Yiğit ve DSI-4. Bölge Müd. Etüt ve Planlama Daire Başkanlığı Harita Mühendisleri ve Ermenek Şubesi Mühendislerince gerçekleştirilmiştir.



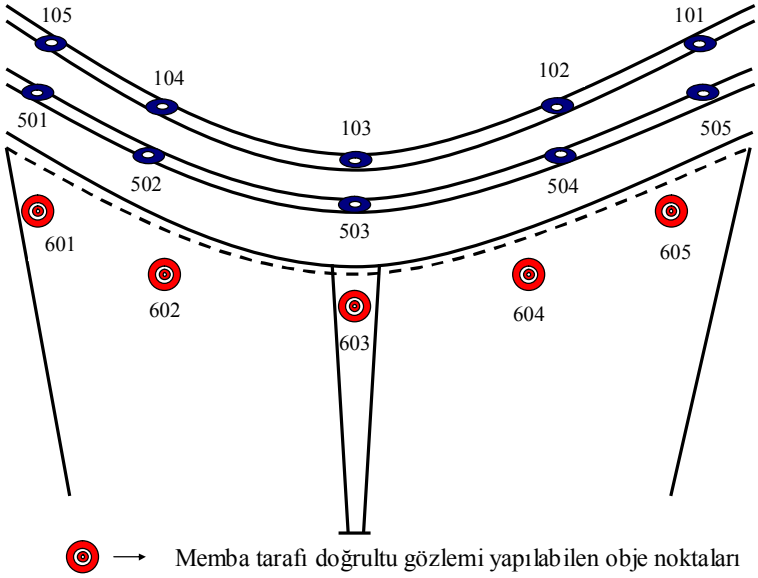
Şekil 5.2 Oluşturulan mikro jeodezik ağ

Şekil 5.2 de görüldüğü üzere 4, 10 ve 11 noktaları deformasyon bölgesi içerisinde olduğu düşünüldüğünden obje noktası, diğer noktalar ise (1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13) referans noktası olarak kabul edilmiştir. Şekilde, referans noktaları arasında ölçülmesi planlanan doğrultu ve uzunluk gözlemleri kesikli çizgilerle gösterilmiştir.

Pilye olarak tesis edilmiş 4, 10 ve 11 numaralı obje noktalarının yanı sıra yapı üzerinde, prizma ve tribrach kurulup uzunluk ve doğrultu ölçüsü yapılabilen; memba tarafında balkon üzerinde 5 ve mansap tarafında balkon üzerinde 5 olmak üzere toplam 10 adet obje noktası tesis edilmiştir. Söz konusu 101, 102, 103, 104, 105 (mansap) ve 501, 502, 503, 504, 505 (memba) numaralı noktaların baraj üzerindeki dağılımı şekil 5.2 ve 5.3 de gösterilmiştir. Ayrıca memba tarafında 5 adet (601, 602, 603, 604, 605) ve mansap tarafında ise 9 adet (201, 202, 203, 204, 205, 301, 302, 303, 401) olmak üzere toplam 14 adet sadece doğrultu ve düşey açı gözlemleri yapılabilen noktalar tesis edilmiştir. Bu noktaların baraj üzerindeki dağılımı şekil 5.3 ve şekil 5.4'de gösterilmiştir (İnal ve ark, 2011).



Şekil 5.3. Mansap tarafında baraj gövdesi üzerine tesis edilen obje noktalarının dağılımı



Şekil 5.4. Memba tarafında baraj gövdesi üzerine tesis edilen obje noktalarının dağılımı

Gövdenin yatay hareketi, farklı bölgelere ve farklı yüksekliklere yerleştirilen bu obje noktaları sayesinde rahatlıkla izlenebilmektedir. Noktaların yükseklikleri çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Obje noktalarının yükseklikleri

Memba Noktaları	Yükseklik	Mansap Noktaları	Yükseklik
501-505	700 m	101-105	700 m
601-605	696 m	201-205	690 m
		301-303	681 m
		401	675 m

Baraj gövde yüzeyi üzerinde sadece doğrultu ve düşey açı gözlemi yapılabilen obje noktalarına şekil 5.5' de görülen pirinç malzemeden yapılmış hedefler monte edilmiştir.



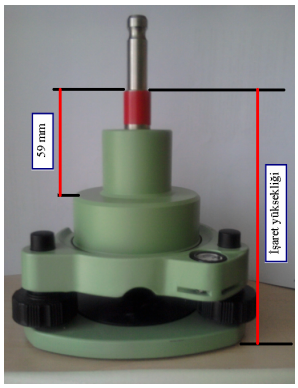
Şekil 5.5 Obje noktaları için tasarlanan hedef

Referans noktaları arası uzunluklar karşılıklı olarak, uygun olan referans noktalarından baraj üzerindeki obje noktalarına olan uzunluklar ise tek taraflı olarak Leica TCA 1800 elektronik aleti ve GPH1P hassas yansıtıcısı kullanılarak yapılmıştır. Uzunluk ölçmeleri sırasında her hangi bir merkezlendirme hatasının olmaması için yansıtıcılar tribrachlar üzerine sabitlenmiştir. Tüm uzunluk ölçüleri 5 bağımsız yöneltme gerçekleştirilmiştir. Uzunluk ölçmeleri sırasında sıcaklık ve basınç değerleri termometre ve barometre ile ölçülerek alete girilmiş ve meteorolojik düzeltme getirilmiş eğik uzunluklar ölçülmüştür. Kesin eğik uzunluk olarak 5 ölçünün ortalaması alınmıştır.



Şekil 5.6 Leica TCA 1800 ve tribrah üzerine monte edilmiş GPH1P hassas yansıtıcı

Yatay doğrultular ve düşey açılar Leica TCA 1800 ile ölçülmüştür. Yatay doğrultular 4 silsile, düşey açılar ise 3 silsile olarak ölçülmüştür. Hedef olarak tribrach kullanılmıştır. Düşey açılar tribrach üzerine yapıştırılan kırmızı renkli bandın üst kısmına yapılmıştır. Böylece işaret yüksekliği olarak pilye tablasından kırmızı bandın üst kısmına olan mesafe alınmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Açı ve doğrultu gözlemlerinin yapıldığı hedef sistemi

Alet, prizma ve hedef işaretleri kurulan noktaların tümü referans noktalarında pilye tesisi olup, baraj balkonu üzerinde obje noktaları betona gömülü tabla şeklindedir (Şekil 5.8). Alet ve işaret yükseklikleri tablanın iki farklı noktasından ölçülmüş ve ortalaması kaydedilmiştir.



Şekil 5.8. Referans noktasında alet ve prizma(7-8), obje noktasında prizma

Toplam 11 periyot ölçü gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3 Gerçekleştirilen jeodezik ölçü periyotları ve tarihleri

Periyotlar	Tarih	Periyotlar	Tarih
0. periyot	28 Aralık 2010 – 3 Ocak 2011	***6. Periyot***	3 – 7 Mayıs 2012
1. Periyot	21 – 25 Mart 2011	***7. Periyot***	4-7 Haziran 2012
2. Periyot	14 – 18 Haziran 2011	***8. Periyot***	15-19 Temmuz 2012
3. Periyot	19 – 23 Eylül 2011	***9.Periyot***	14-18 Ocak 2013
4. Periyot	20 – 23 Aralık 2011	***10.Periyot***	18-22 Mart 2013
5. Periyot	10 – 16 Nisan 2012	***11.Periyot***	4-6 Haziran 2013

Periyot ölçüleri ayrı ayrı serbest dengelenerek uyuşumsuz ölçüler Pope (1976) yöntemine göre ayıklanmıştır. Deformasyon analizi S transformasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucuna göre tüm noktalar hareket etmiştir. Ancak bu durum nokta hareketlerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığına karar verilirken kullanılan karesel ortalama hata değerlerinin oldukça küçük olmasından kaynaklanmaktadır (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4 Periyot ölçülerine ilişkin standart sapmalar

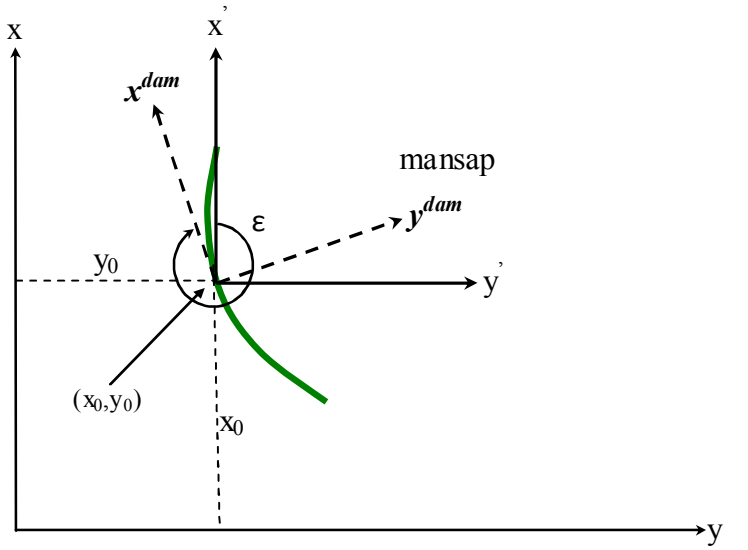
Periyotlar	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Tarih	03.01.11	25.03.11	18.06.11	23.09.11	23.12.11	16.04.12
Std	$2^{cc}.90$	$2^{cc}.70$	$2^{cc}.86$	$2^{cc}.92$	$2^{cc}.20$	$2^{cc}.31$
Periyotlar	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
Tarih	07.05.12	07.06.12	19.07.12	18.01.13	22.03.13	06.06.13
Std	$2^{cc}.20$	$2^{cc}.53$	$2^{cc}.13$	$1^{cc}.81$	$1^{cc}.49$	$2^{cc}.00$

Jeodezik olarak anlamlı olan bu hareketler inşaat mühendisliği için kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Çünkü hareketler 1 cm' nin altındadır. Bu sonuçların geoteknik yöntemlerle ve sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılabilmesi için jeodezik anlamda elde edilen vektörler, geoteknik analizde kullanılan değerlendirme koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Bunun için her bir noktanın koordinatı (x_i, y_i), şekil 5.9' a göre aşağıdaki eşitlikler kullanılarak grid koordinat sisteminden değerlendirme koordinat sistemine (x_i^{dam}, y_i^{dam}) dönüştürülmüştür.

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

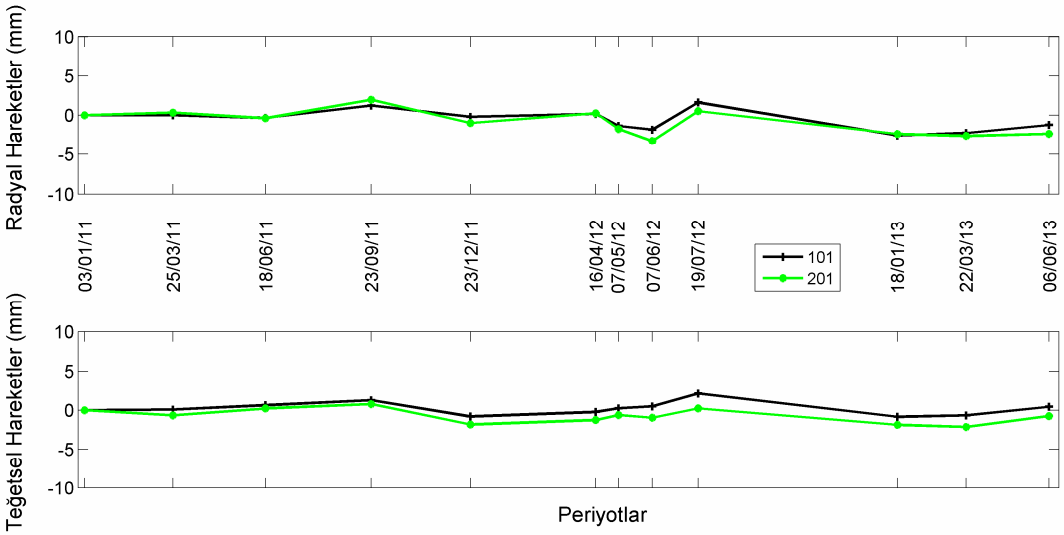
$$\begin{bmatrix} x_i^{dam} \\ y_i^{dam} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) & -\sin(\varepsilon) \\ \sin(\varepsilon) & \cos(\varepsilon) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

Burada, x_o, y_o referans periyot ölçülerinden elde edilen yerel (lokal) sistem merkezinin jeodezik sistemdeki koordinatlarıdır. i periyot numarasını göstermektedir.

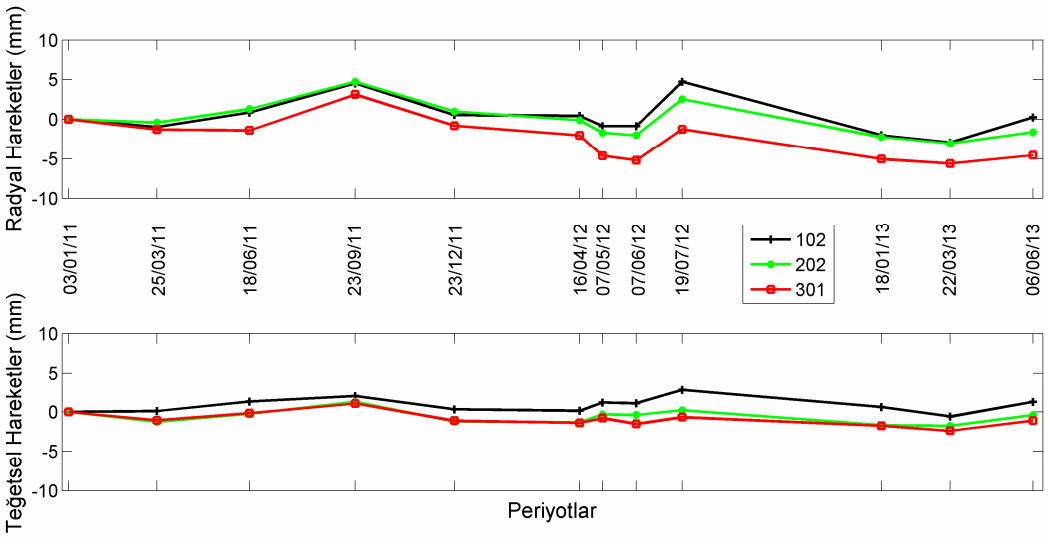


Şekil 5.9 Koordinat dönüşümü (Mansap tarafı pozitif yönü göstermektedir).

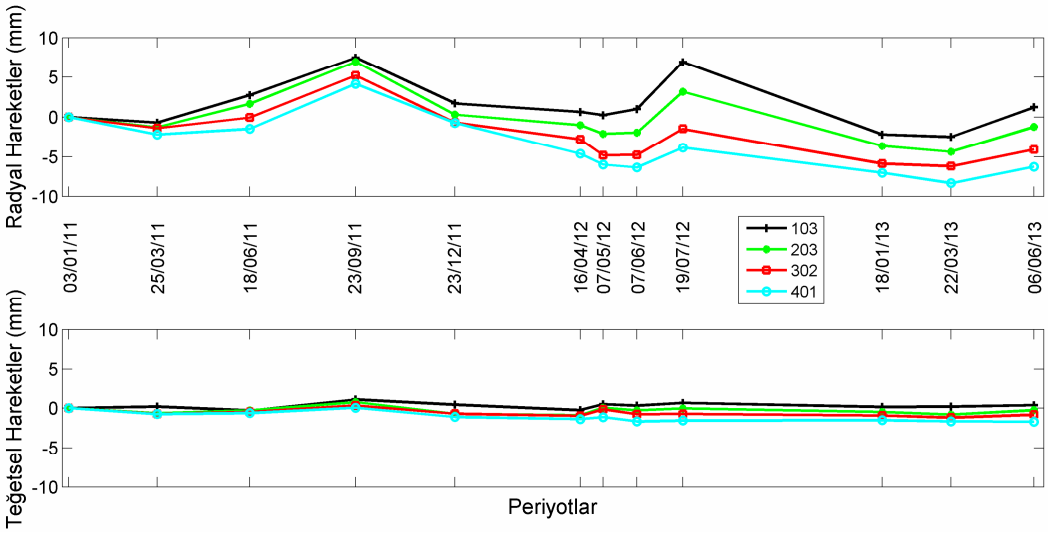
Şekil 5.10 'dan şekil 5.16 'ya kadar dönüşüm sonucunda obje noktalarında belirlenen radyal ve teğetsel hareketler verilmektedir. Şekil 5.10 ile şekil 5.14 arası mansap tarafındaki noktaların, şekil 5.15 ve şekil 5.16 de ise memba tarafındaki noktaların zamana bağlı hareketlerini göstermektedir. Radyal ve teğetsel hareketler için pozitif değerler sırasıyla mansap ve sol sahil hareketini temsil etmektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere, beklenildiği gibi radyal hareketler teğetsel hareketlere göre daha büyüktür. Barajın farklı yüksekliklerdeki mutlak hareketlerini görebilmek amacıyla mansap tarafındaki noktalar kesitler halinde verilmektedir. Buna göre barajdaki en büyük hareketlerin orta kesitte ve en üst kotta olduğu şekil 5.12'den de açıkça görülmektedir. Ayrıca uç kesitlerde ise hareketler yok denecek kadar azdır (Şekil 5.10 ve 5.14).



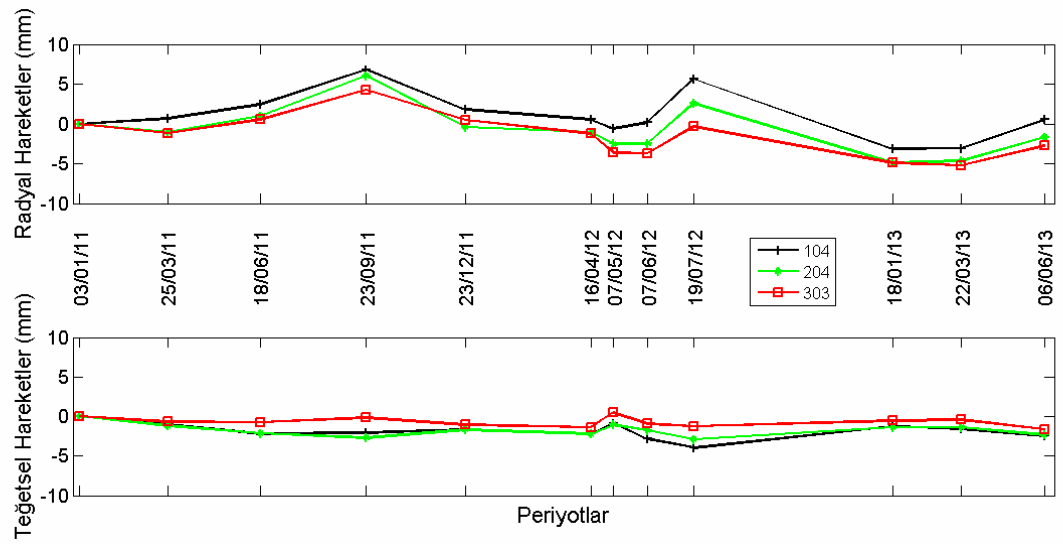
Şekil 5.10 Sağ uç kesitteki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap)



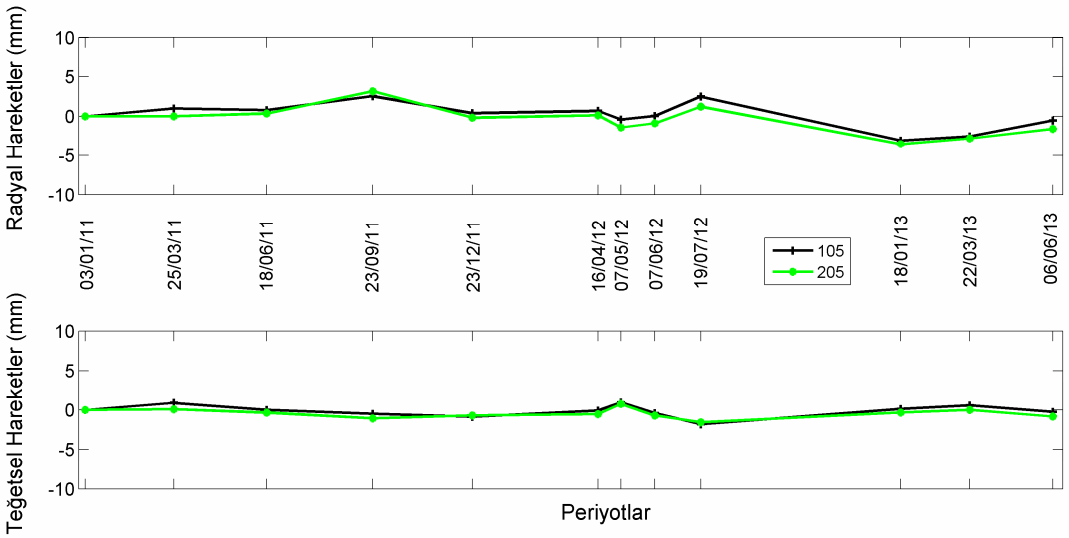
Şekil 5.11 Sağ uç kesit ile orta kesit arasındaki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap)



Şekil 5.12 Orta kesitteki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap)

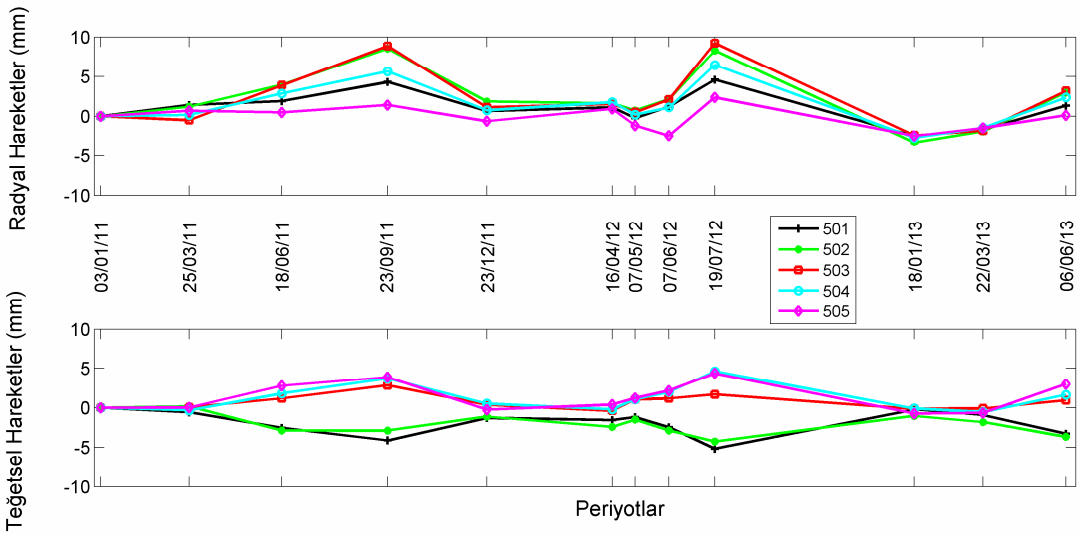


Şekil 5.13 Sol uç kesit ile orta kesit arasındaki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap)

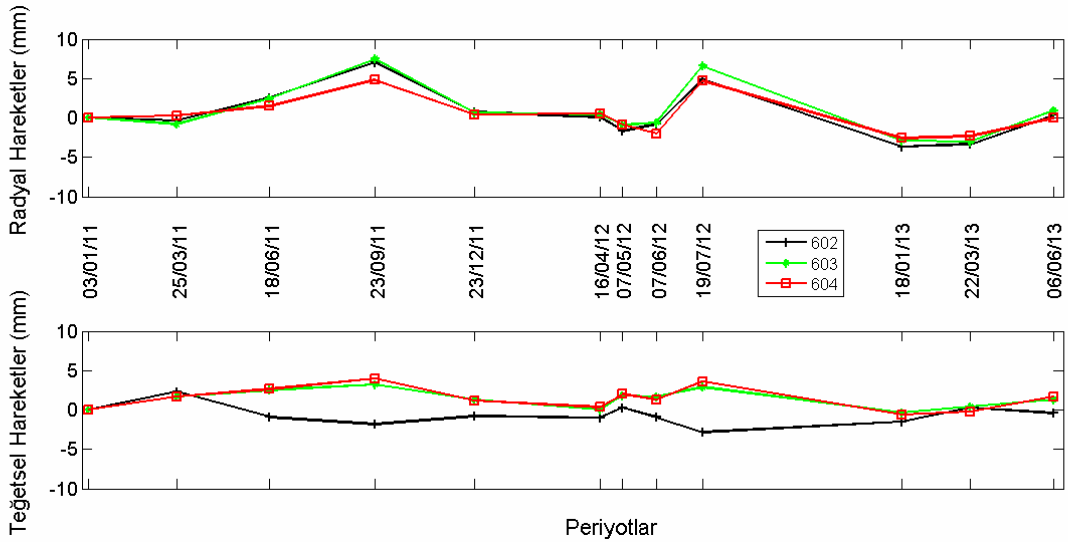


Şekil 5.14 Sol uç kesitteki noktaların radyal ve teğetsel hareketleri (Mansap)

Memba tarafındaki 500 lü ve 600 lü noktalar arasında sadece 4 metrelik yükseklik farkı olduğundan kesitsel olarak dikkate alınmamışlardır (Şekil 5.15, 5.16). Balkon üzerindeki noktalardan orta kesimdeki noktaların (503, 502) radyal hareketleri diğerlerine nazaran daha büyüktür (Şekil 5.15). Hareketin büyüklüğü daha az olmakla birlikte benzer durum daha düşük kottaki noktalar için de geçerlidir (Şekil 5.16).



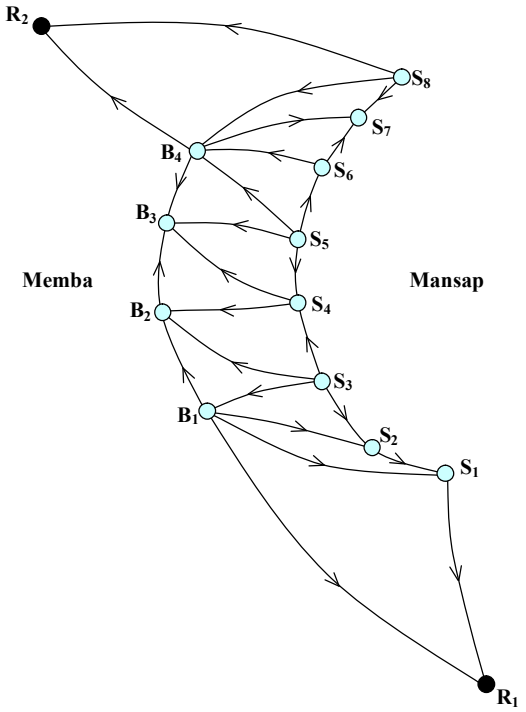
Şekil 5.15 Memba tarafında balkon üzerinde bulunan noktaların radyal ve teğetsel hareketleri



Şekil 5.16 Memba tarafında 696 m kotunda bulunan noktaların radyal ve teğetsel hareketleri

5.2.1.2. Düşey yönlü hareketlerin izlenmesi

Baraj gövdesinin düşey yönlü hareketlerin belirlenmesi amacıyla ise baraj deformasyon alanı dışında, düşey yönlü hareket beklenmeyen sert yerli kaya kütleleri üzerine, barajın hem sağ hem de sol tarafında olmak üzere iki referans noktası tesis edilmiştir. Baraj gövdesi üzerinde ise 4 tanesi memba, 8 tanesi mansap tarafında olmak üzere toplam 12 adet obje noktası tesis edilmiştir. Bu noktaların dağılımı ve ölçülen yükseklik farklarına ait nivelman ağı şekil 5.17'de verilmektedir.

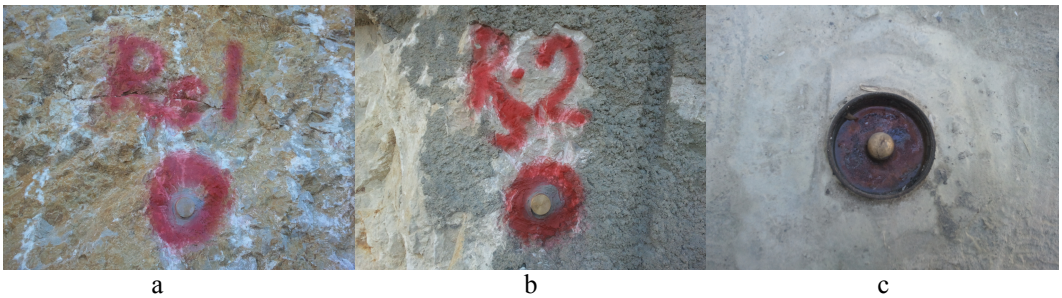


Şekil 5.17. Ermenek barajı yükseklik ağı referans ve obje noktaları

Nivelman ölçmelerinde Leica DNA03 ve iki adet 3 m uzunluğunda tek parça olan GPCL3 invar mira kullanılmıştır. Ölçmelerden önce alet kurulacak noktalar ve mira konulacak noktalar geri ve ileri mira gözleme uzaklıkları eşit ve 30 m' nin altında olacak şekilde önceden belirlenmiştir. Gidiş-dönüş ölçmelerinde aynı noktalara mira ve aletler kurulmuştur. Ölçüler geri-ileri-ileri-geri (GİİG) şeklinde ve her mirada 3 ölçü yapılmış ve ortalaması alınmıştır.

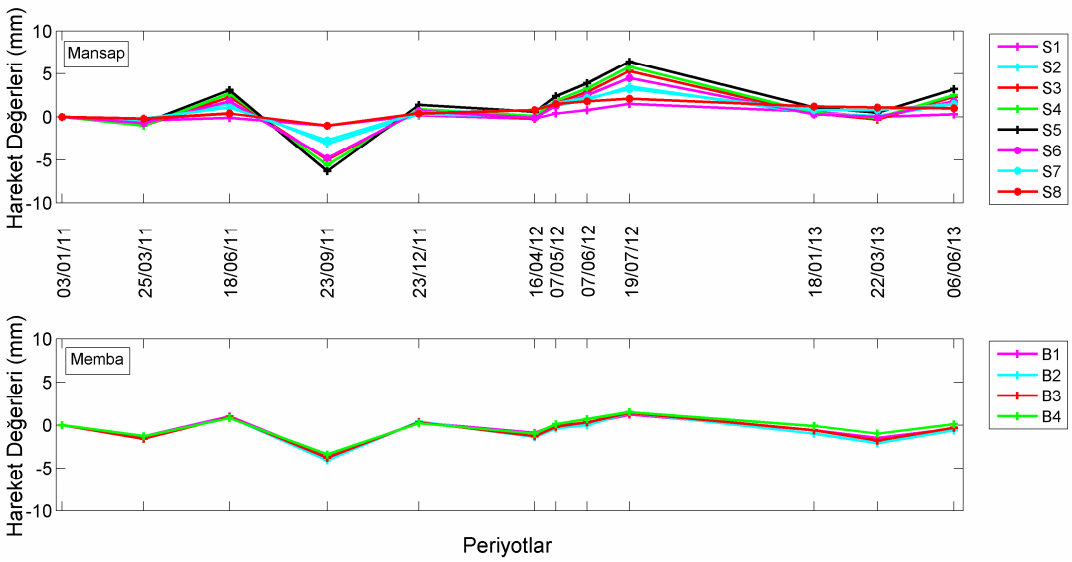


Şekil 5.18 Ölçülerde kullanılan Leica DNA03 nivosu



Şekil 5.19. a,b) Referans (Rs) ve c) obje noktalarında yapılan tesisler

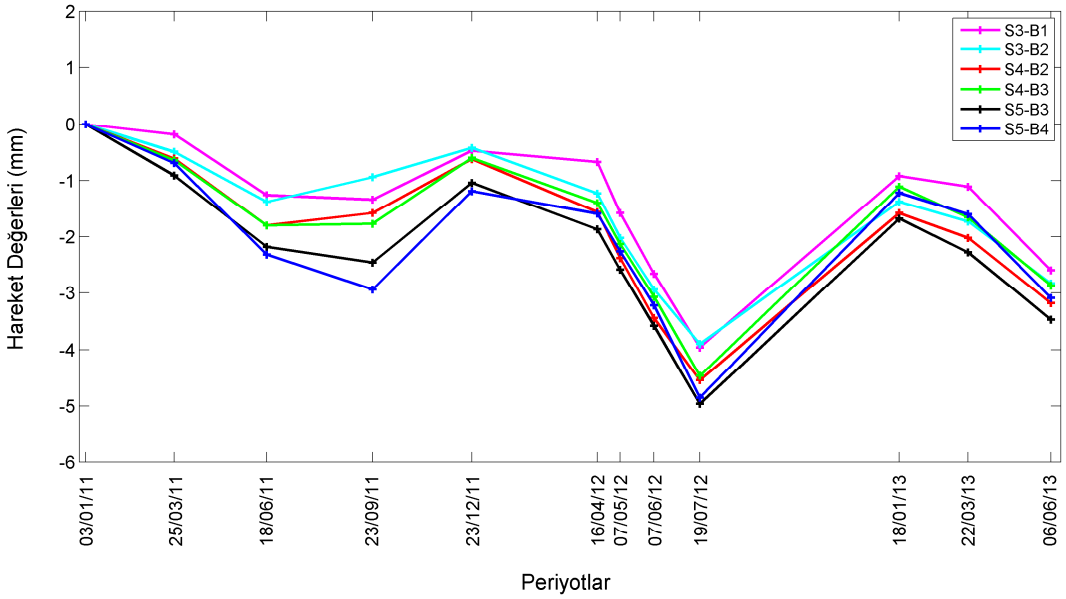
11 periyotluk nivelman ölçüleri yatay ağdakine benzer olarak değerlendirilmiş ve noktalara ilişkin hareket değerleri hesaplanmıştır (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. Nivelman noktalarının periyotlara göre hareketleri

Şekil 5.20' de görüldüğü üzere, en büyük hareketler üçüncü ve sekizinci periyotlarda gerçekleşmiştir. Mansap tarafındaki noktalardan orta kısımda bulunan S5 ve S4 noktalarındaki hareketler diğer noktalara göre daha büyüktür. S5 noktası -6.3 mm ile 6.4 mm arasında, S4 noktası ise -5.6 mm ile +5.8 mm arasında değişim göstermiştir. Memba tarafındaki noktalar ise birbirleriyle benzer hareketler göstermişlerdir. Ayrıca noktaların birbirlerine göre rölatif hareketleri incelenmiştir (Şekil 5.21). Buna göre mansap tarafındaki noktalar sabit alınıp (S) memba tarafındaki noktaların (B) hareketleri incelendiğinde negatif yönlü hareketlenme noktalar arasındaki yükseklik farkının azaldığını, pozitif yönlü hareketlenme ise bu farkın arttığını göstermektedir. Özellikle sekizinci periyotta noktalar arasındaki yükseklik farkının minimuma indiği

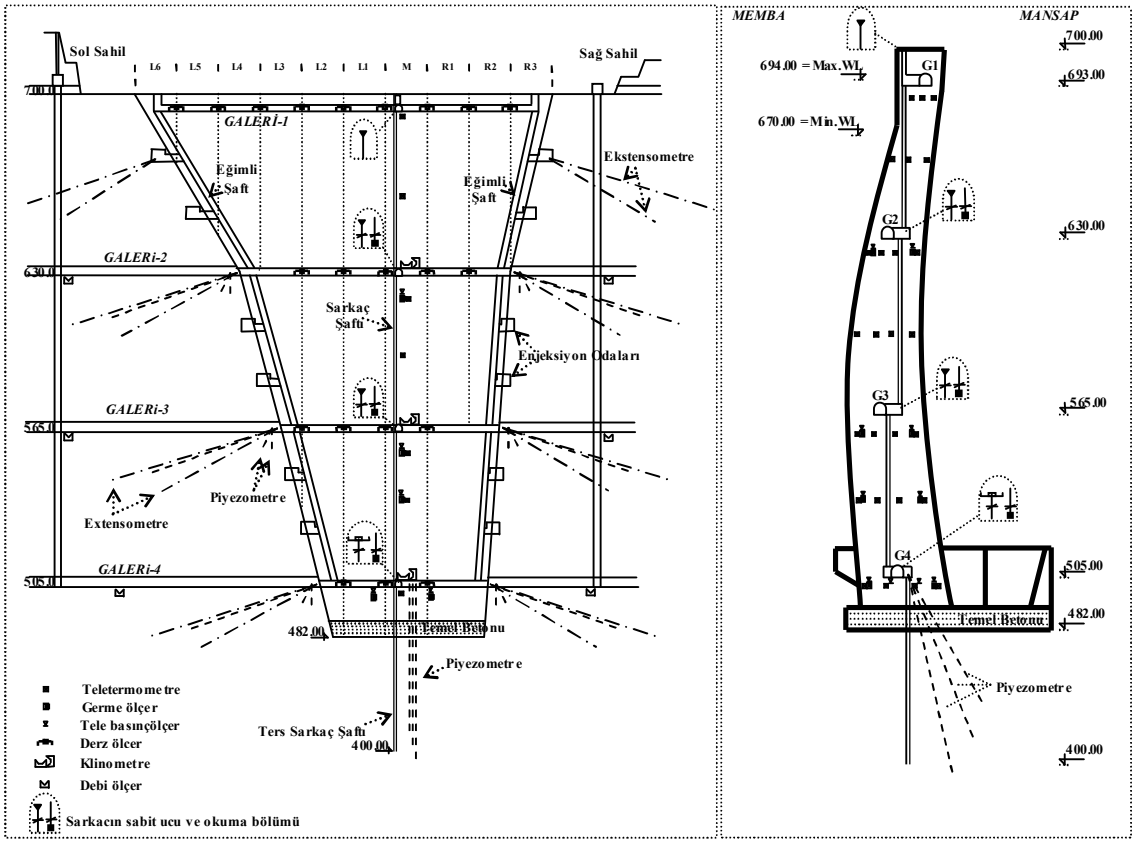
görülmektedir. Dokuzuncu periyotta mansap noktalarına göre memba noktaları yükselme eğilimi göstermiştir.



Şekil 5.21. Noktaların birbirlerine göre bağıl hareketleri

5.2.2. Geoteknik yöntemler

Ermenek barajının izlenmesi amacıyla kullanılan ölçme aletleri; sarkaç, ters sarkaç, çatlak/derz ölçer, klinometre, extensometre, inklinometre, piyezometre, debi ölçer, teletermometre, tele basınçölçer, gerilim ölçer, yük hücresidir. Bu geoteknik ölçme aletlerinden bazıları baraj gövdesinde (örn: sarkaç, derz ölçer, termometre), bazıları galerilerde (örn: extensometre, debi ölçer, piyezometre) bazıları ise mesnetlerde (extensometre, yük hücreleri, inklinometre) kullanılmaktadır. Baraj gövdesindeki geoteknik aletlerinin konumu şekil 5.22' de teknik özellikleri ise çizelge 5.5' de verilmiştir.



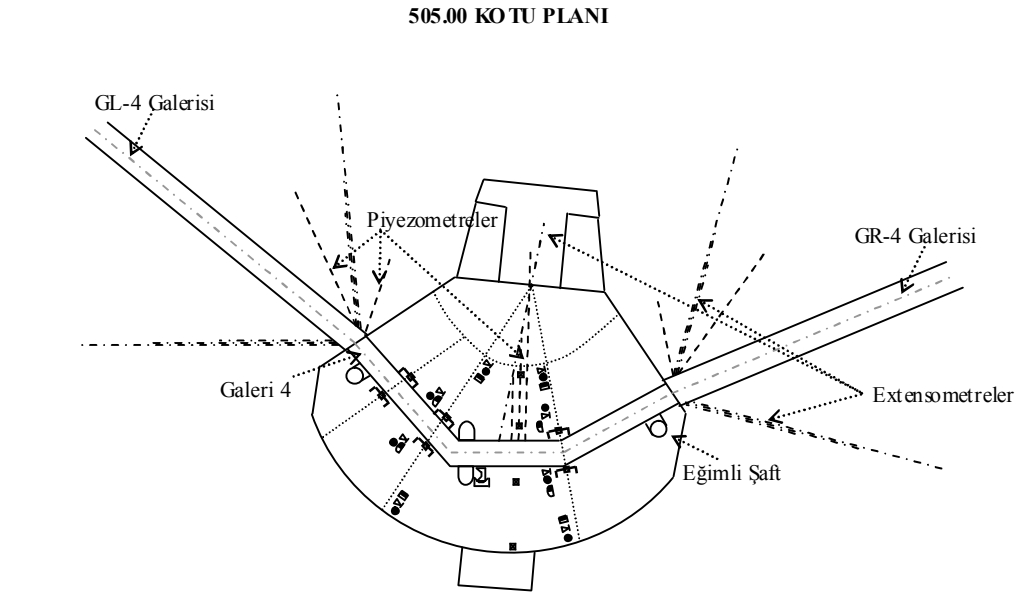
Şekil 5.22. Baraj gövdesindeki geoteknik aletlerin konumu

Şekil 5.22' de görüldüğü üzere, baraj gövdesinde farklı kotlarda 4 adet galeri bulunmaktadır. Radyal ve teğetsel hareketleri belirlemek amacıyla üç adet düz sarkaç, bu galeriler arasına yerleştirilmiştir. Ayrıca 400 m kotu ile galeri 4 arasına da ters sarkaç yerleştirilmiştir. Galeri 2, 3 ve 4 deki sarkaç tanklarının ve okuma ünitelerinin bulunduğu odalara eğim değişimlerini belirlemek amacıyla klinometreler yerleştirilmiştir. Derz açıklıklarını belirlemek amacıyla galerilere bir ve üç eksenli derz ölçerler yerleştirilmiştir. Ayrıca yine gövde içerisine belirli aralıklarla sıcaklık ve basınç değişimlerini belirlemek amacıyla teletermometreler, gerilimölçer ve basınçölçerler yerleştirilmiştir. Sol ve sağ galerilerden gövdeye giriş bölgelerinde, galerilerin memba ve mansap taraflarına, deplasmanları belirlemek amacıyla ekstensometreler ve ayrıca yakınlarına ise boşluk suyu basıncını belirlemek amacıyla da piyezometreler yerleştirilmiştir. Galerilerin sonlarına doğru ise piyezometrelerin yüksek basınç değeri gösterdiği bölgelerde açılan sondaj deliklerinden çıkan suyun debisini belirlemek amacıyla debi ölçerler yerleştirilmiştir.

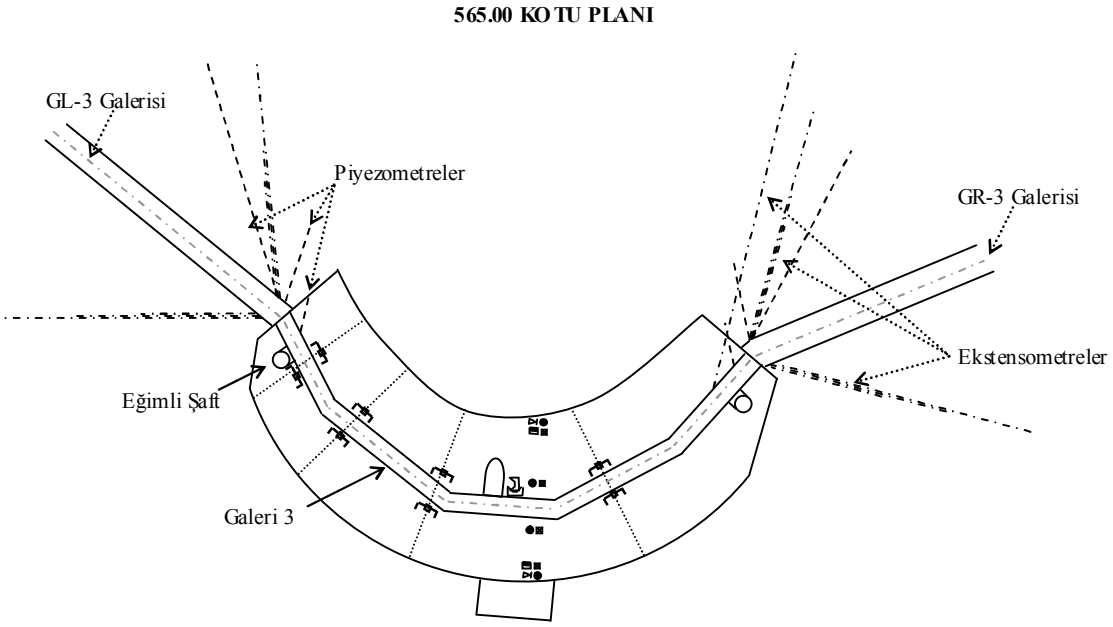
Çizelge 5.5 Geoteknik aletler ve teknik özellikleri

Ölçme Aleti	**Özellikler**	
Sarkaç (Tel-310S)	***Ölçüm aralığı***	*X-ekseni : 0 - 145 mm*
		Y-ekseni : 0 - 60 mm
	Çözünürlük	*0.005 mm*
	Doğruluk	*X-ekseni : ± 0.007 mm*
		Y-ekseni : ± 0.012 mm
İnklinometre (veri kaydedici ile birlikte)	***Ölçüm aralığı***	*± 30°*
	Çözünürlük	*± 0.0025 mm x 500 mm*
	Doğruluk	*± 3.00 mm x 30 m*
Rod Ekstensometre (with displacement transducer)	***Tam ölçek (FS)***	*100 mm*
	Çözünürlük	*0.01 mm*
	Doğruluk	*< 0.5% FS*
Klinometre	***Cihaz uzunluğu***	*1 m*
	Ölçüm aralığı	*± 20 mm / m*
	Hata sınırı < 0.5 FS	*maks. ölçülen değerin 1% 'i*
	Hata sınırı > 0.5 FS	*maks. (2x ölçülen değer -0.5 FS)'in 1%' i*
Titreyen telli piyezometre	***Ölçüm aralığı***	*170 kPa - 3.5 Mpa*
	Duyarlılık	*0.025 % FS*
	Doğruluk	*< 0.25 % FS*
Derz ölçer (lineer dönüştürücü ile)	***Ölçüm aralığı***	*100 mm*
	Çözünürlük	*0.01 mm*
	Doğruluk	*< 0.5 % FS*
Debi ölçer (basınç iletici)	***Ölçüm aralığı***	*suyun 1.000 mm'si*
	Doğruluk	*< 0.5 % FS lineer sensor faktörü ile*
		< 0.4 % FS polinomal sensor faktörü ile
Debi ölçer (seviye dönüştürücü)	***Ölçüm aralığı***	*suyun 1.000 mm'si*
	Doğruluk	*< 0.3 % FS lineer sensor faktörü ile*
		< 0.2 % FS polinomal sensor faktörü ile

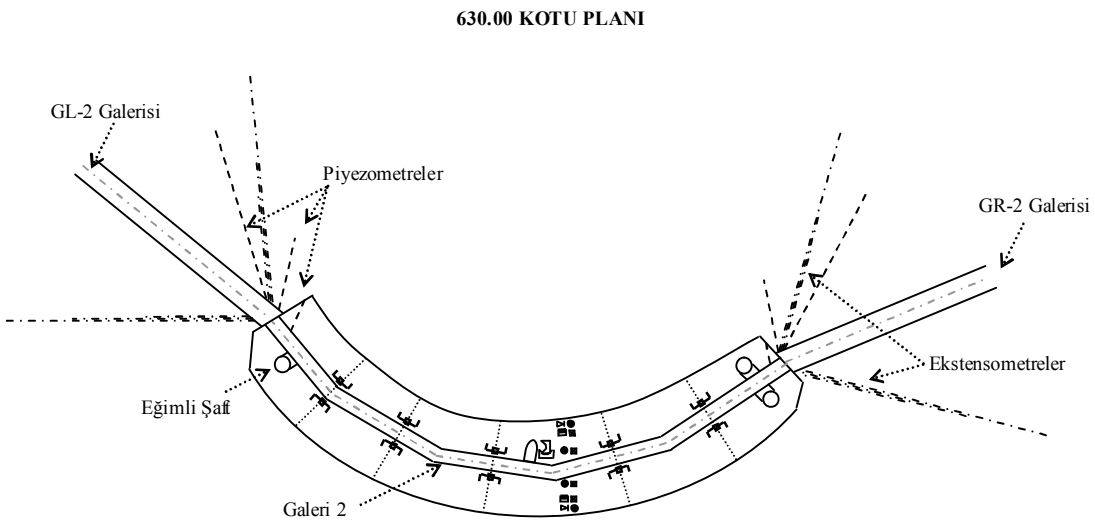
Şekil 5.23' den Şekil 5.26 ya kadar galerilere yerleştirilmiş ölçme aletlerinin konumu ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



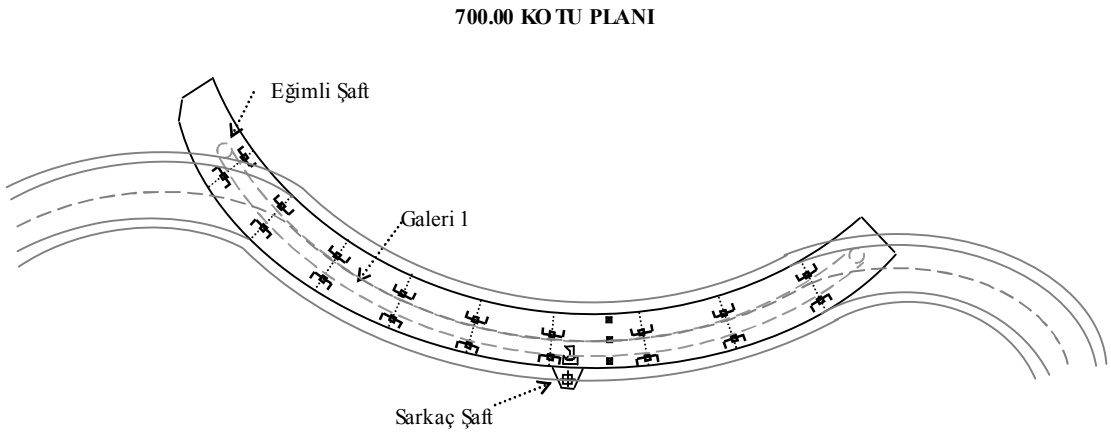
Şekil 5.23. Galeri 4 deki geoteknik ölçme aletlerinin konumu



Şekil 5.24. Galeri 3 deki geoteknik ölçme aletlerinin konumu



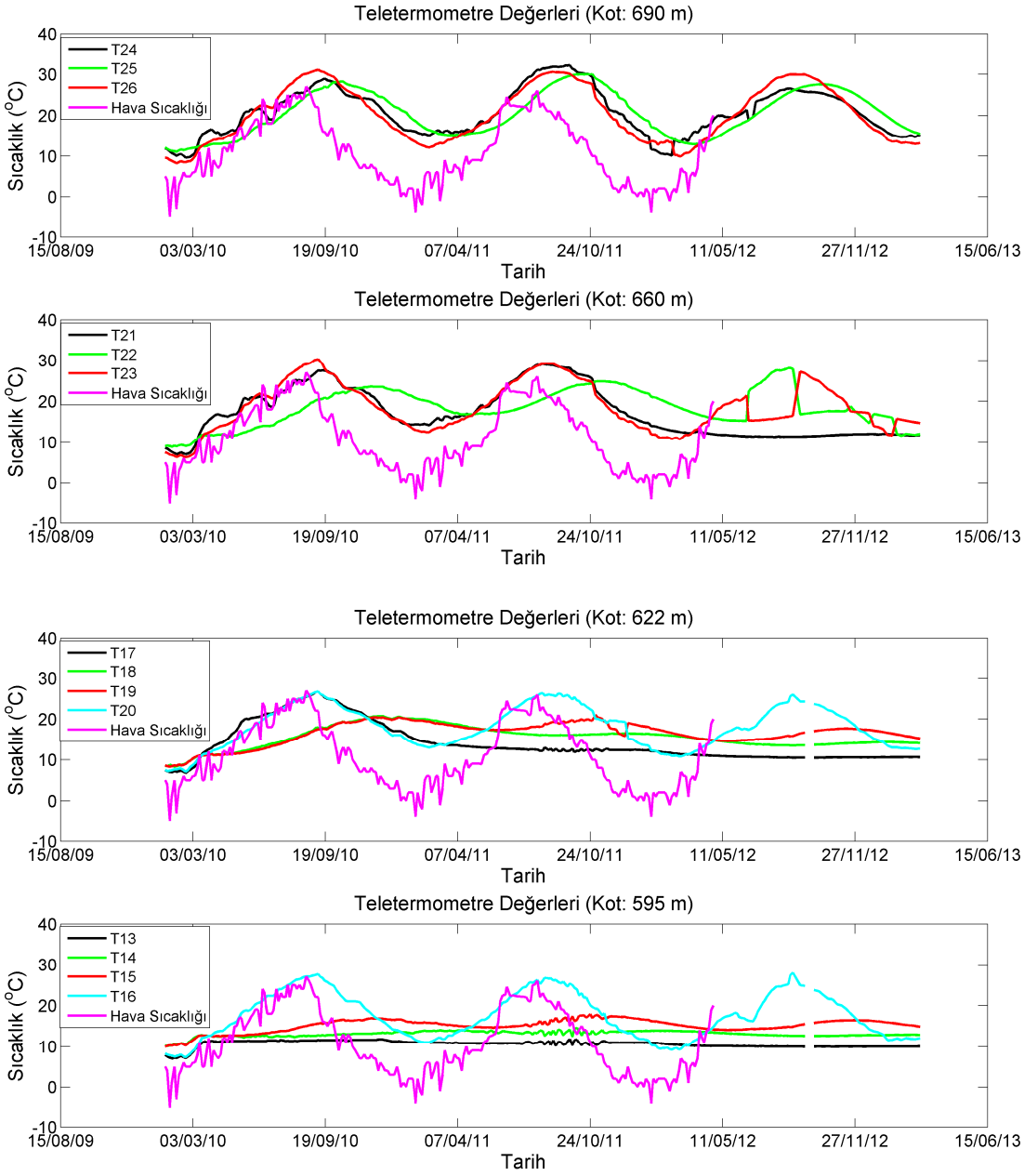
Şekil 5.25. Galeri 2 deki geoteknik ölçme aletlerinin konumu

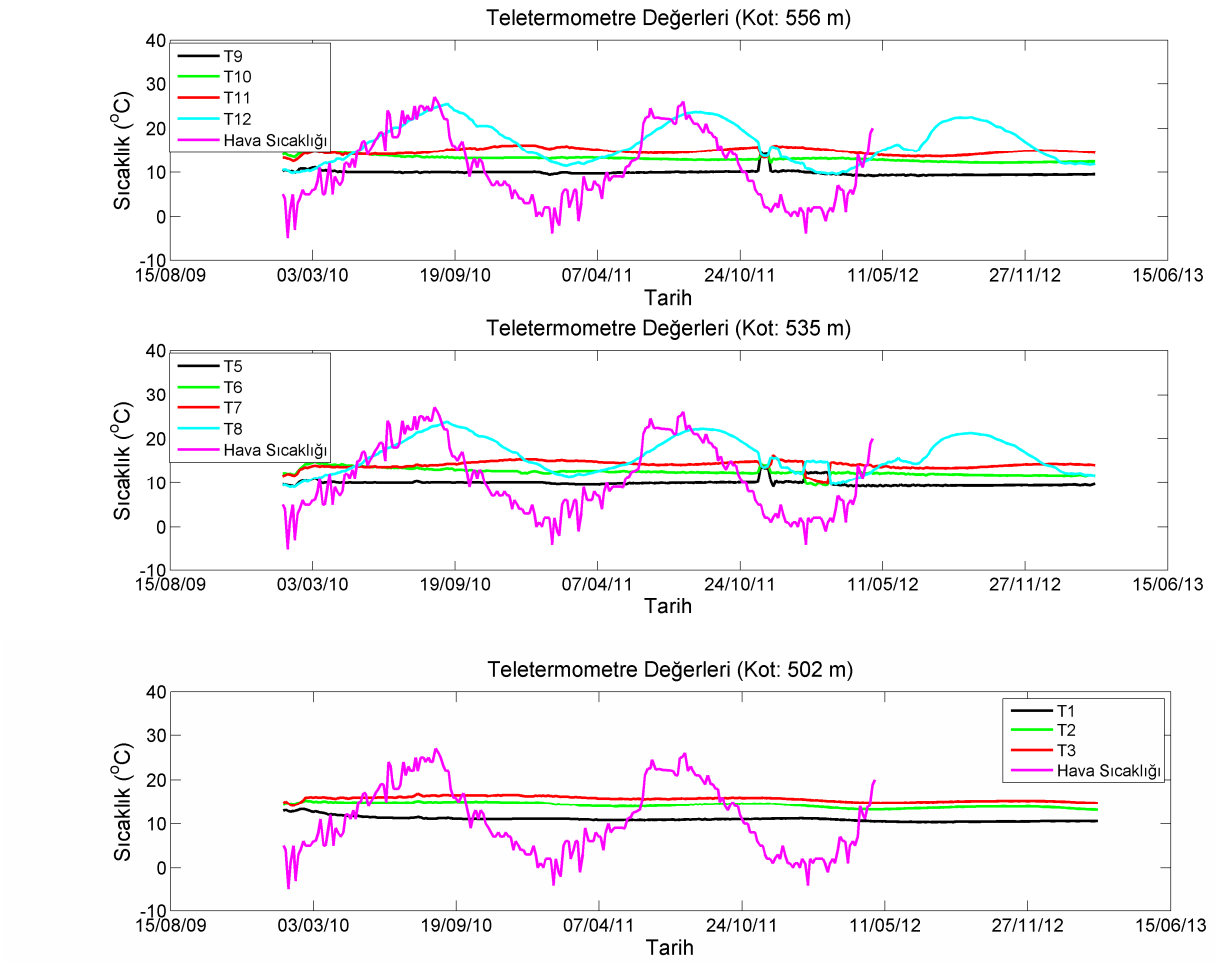


Şekil 5.26. Galeri 1 deki geoteknik ölçme aletlerinin konumu

5.2.2.1. Beton ve ortam sıcaklıklarının izlenmesi

Beton sıcaklıkları şekil 5.22' de gösterildiği üzere barajın farklı yüksekliklerindeki beton içerisine yerleştirilmiş teletermometreler yardımıyla ölçülmektedir. Şekil 5.27 de elde edilen beton sıcaklıkları ortam sıcaklıkları ile birlikte gösterilmiştir. Barajın alt kısımlarında (595 m kotuna kadar) memba yüzeyine yakın kısımlardaki sıcaklıklar yaklaşık olarak 10-11ºC aralığında sabit kalmaktadır (T1,T5,T9,T13). Ayrıca barajın üst kısımlarındaki beton sıcaklıkları, beton kalınlığının daha az olması sebebiyle hava sıcaklığı ile daha benzer bir yapı sergilediği açıkça görülmektedir.


Teletermometre Değerleri (Kot: 690 m)
T24
T25
T26
Hava Sıcaklığı
Sıcaklık (°C)
40
30
20
10
0
-10
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
Teletermometre Değerleri (Kot: 660 m)
T21
T22
T23
Hava Sıcaklığı
Sıcaklık (°C)
Tarih
Teletermometre Değerleri (Kot: 622 m)
T17
T18
T19
T20
Hava Sıcaklığı
Sıcaklık (°C)
Tarih
Teletermometre Değerleri (Kot: 595 m)
T13
T14
T15
T16
Hava Sıcaklığı
Sıcaklık (°C)
Tarih



Şekil 5.27. Farklı yüksekliklere yerleştirilmiş teletermometre verileri ile hava sıcaklığı değerleri

5.2.2.2. Deformasyon ölçmeleri

5.2.2.2.1. Sarkaç ölçümleri

Ermenek barajında olası yatay hareketleri belirlemek amacıyla 3 adet düz sarkaç (G1-G2, G2-G3, G3-G4) ve bir adet ters sarkaç bulunmaktadır (G4 – 400 m kotu). Düz sarkaçların okuma üniteleri G2, G3 ve G4 galerilerinde bulunan sarkaç odalarında, ters sarkacın ki ise G4 galerisinde bulunan sarkaç odasında bulunmaktadır. Şekil 5.22 de sağ taraftaki çizimde sarkaç odalarının konumu, şekil 5.28 de ise barajdaki düz ve ters sarkaç odalarında çekilmiş fotoğrafları görülebilir.



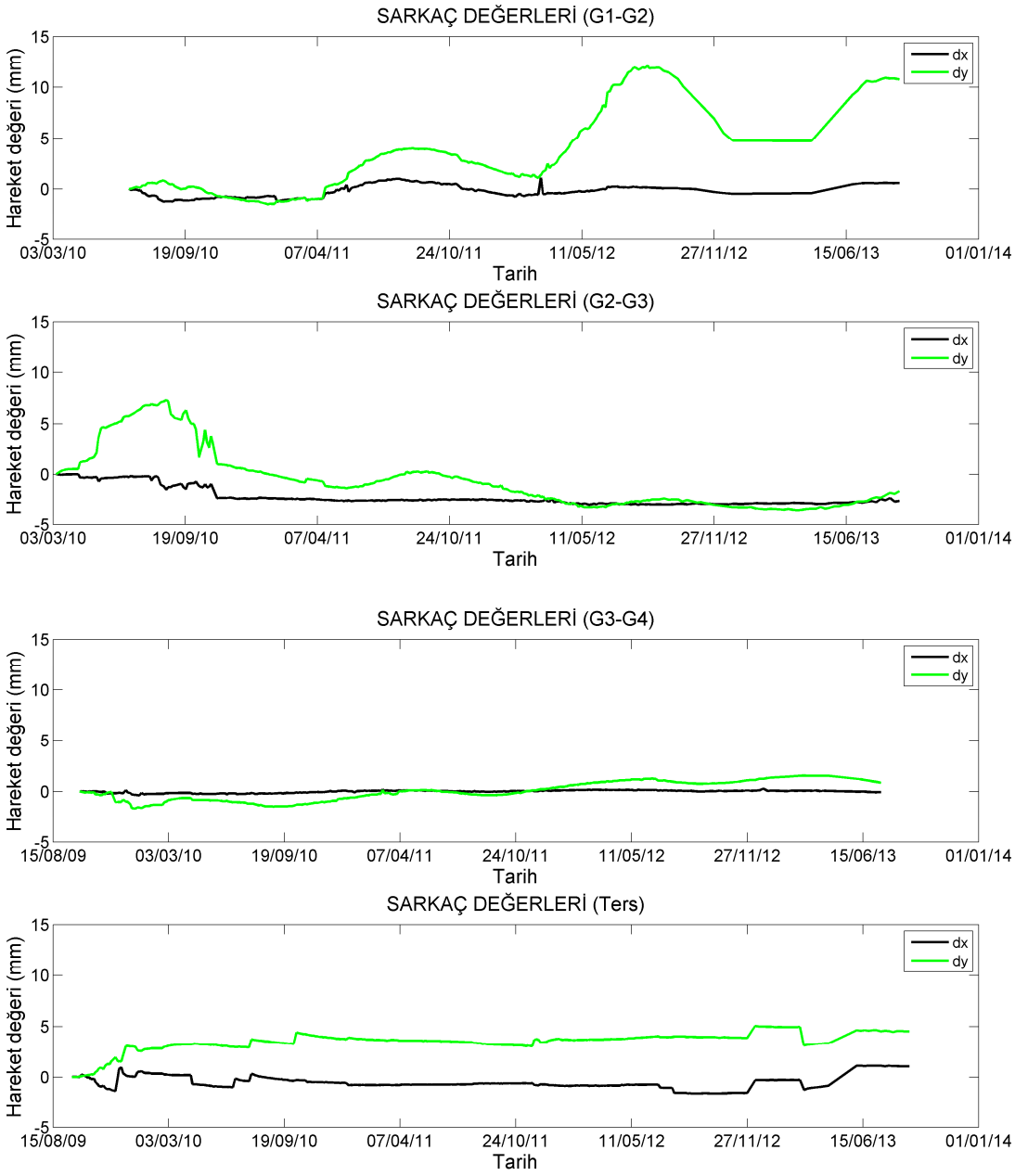
Şekil 5.28. Galeri 2 de bulunan düz sarkaç (sol) ve galeri 4 de bulunan ters sarkaç (sağ) odaları

Okuma ünitelerinde lokal koordinat sistemi kullanılmaktadır. Her bir sarkaç için koordinat sistemi çizelge 5.6 da verilmektedir.

Çizelge 5.6 Sarkaçların koordinat sistemleri

SARKAÇ	*MEMBA*	*MANSAP*	*SAĞ SAHİL*	*SOL SAHİL*
G1-**G2**	+Y	-Y	-X	+X
G2-**G3**	+Y	-Y	-X	+X
G3-**G4**	-Y	+Y	+X	-X
TERS	+Y	-Y	-X	+X

Şekil 5.29' da sarkaçların kuruldukları tarihten itibaren yaklaşık 3-4 günde bir toplanan verileri zaman serisi şeklinde gösterilmiştir. Bağıl değişimler göz önüne alındığında G1-G2 sarkacında maksimum 12 mm lik bir hareket ağustos 2012 tarihinde görülmüştür. Bu harekete göre barajın üst kısmı G2 ye göre mansaba doğru hareket etmiştir. Ters sarkaca göre ise G4, sarkacın sabit ucunun bulunduğu 400 m kotuna göre 5 mm membaya doğru hareket etmiştir. Sol ve sağ sahil yönünde ise dikkate değer bir hareket görülmemiştir.



Şekil 5.29. Düz ve ters sarkaç verileri

Şekil 5.29 daki belirtilen değerler sarkaçların bağımsız hareketlerini temsil etmektedir. Ayrıca barajın bütünü için elde edilen radyal ve teğetsel deformasyonlar 400 m kotundaki ters sarkacın sabit noktası baz alınarak belirlenmiş ve jeodezik verilerle karşılaştırmalı olarak bölüm 6 da verilmiştir.

5.2.2.2.2. Ekstensometre ölçümleri

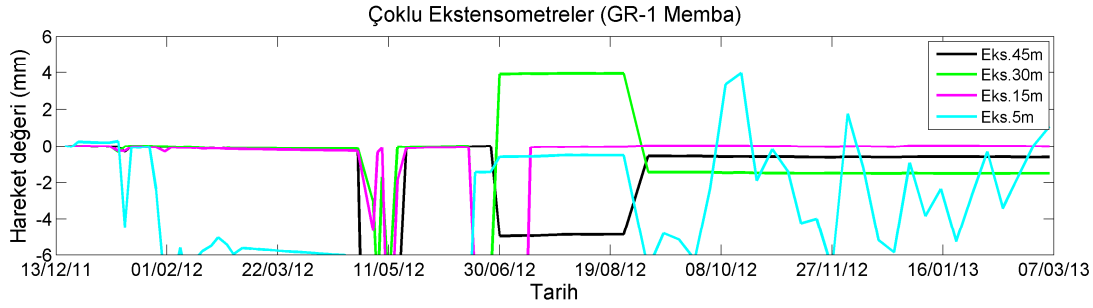
Olası deplasmanları belirlemek amacıyla barajdaki sağ (GR) ve sol (GL) galerilerinin gövdeye giriş yerlerindeki mesnetlere memba ve mansap taraflarına doğru farklı uzunluklarda çoklu ekstensometreler yerleştirilmiştir (Şekil 5.30). Galeri 2, 3 ve 4

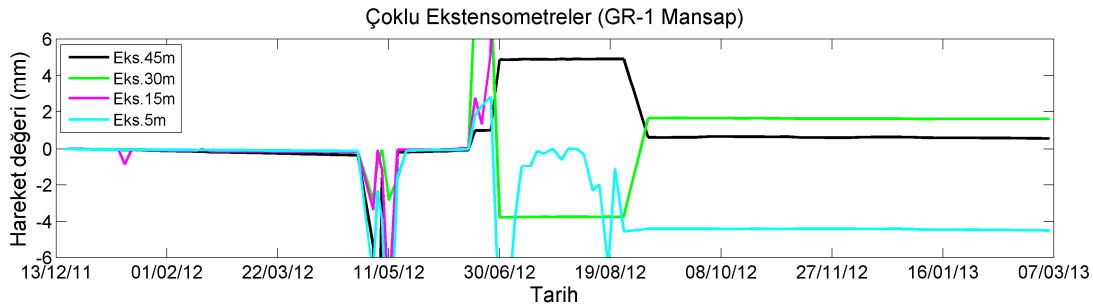
de bu durum geçerlidir. GL-1 ve GR-1 de bulunduğu belirtilen ekstensometreler ise galerinin hemen altında bulunan enjeksiyon odalarına yerleştirilmişlerdir (Şekil 5.22).

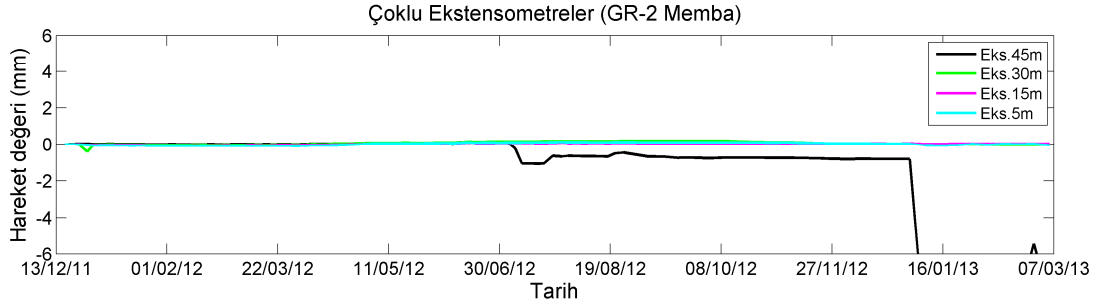


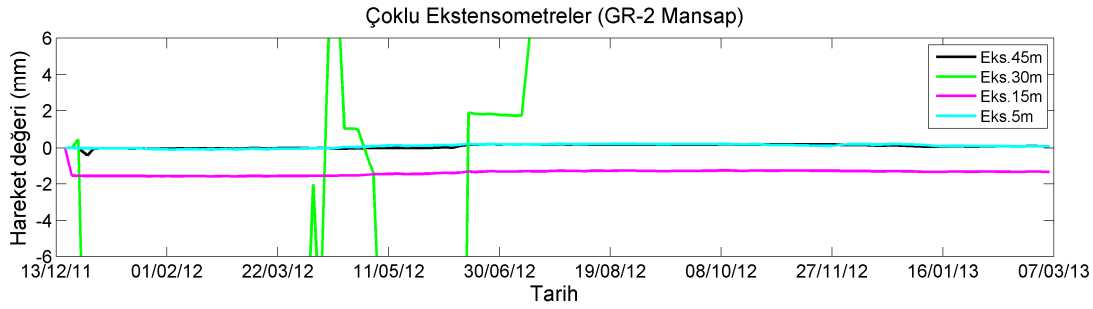
Şekil 5.30 Gövdeye giriş yerlerindeki galerilerde bulunan ekstensometreler (galeri 3)

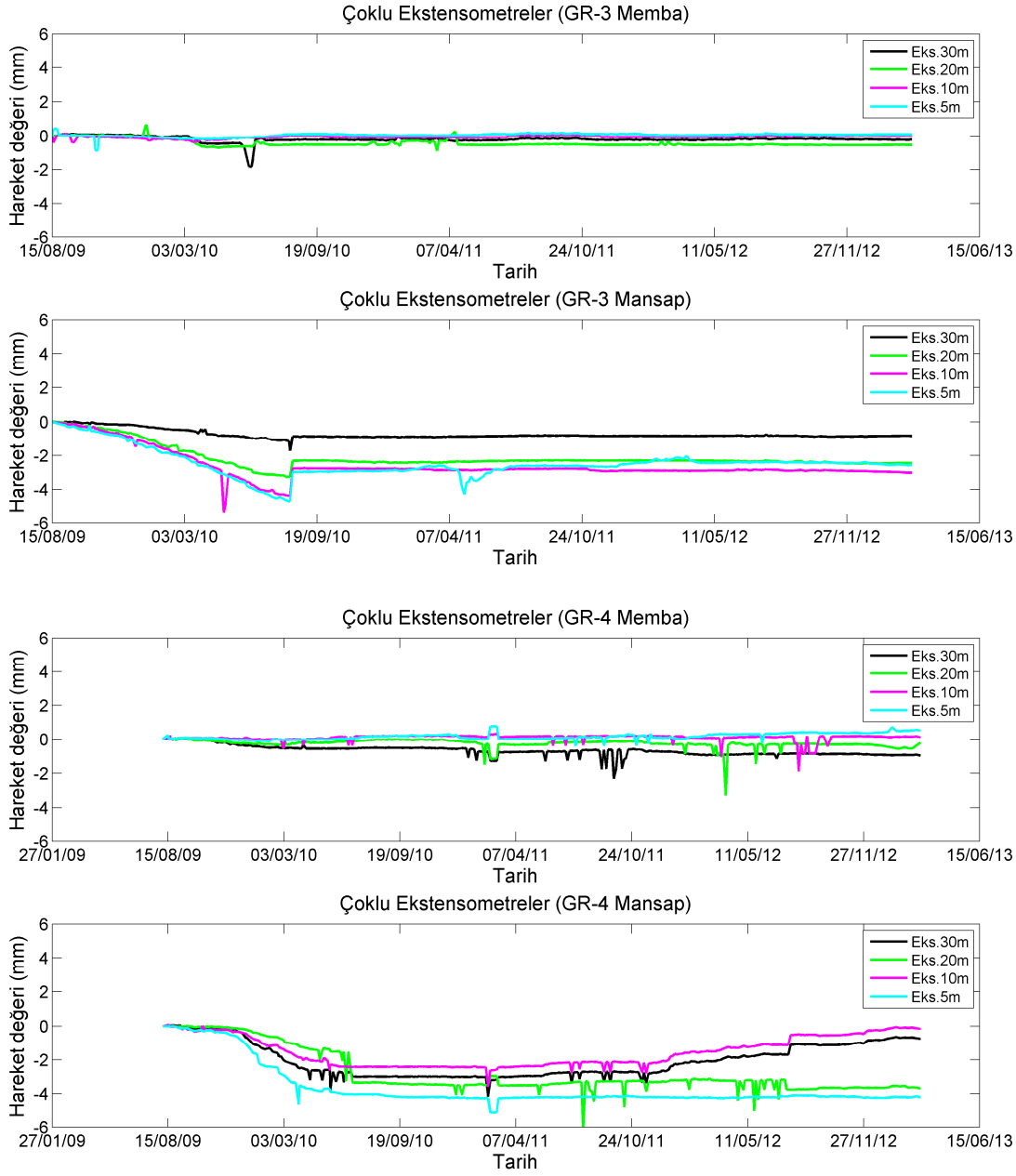
Ekstensometre verileri otomatik olarak kayıt edilmektedir. Bu ekstensometrelerdeki uzama veya kısalmalar şekil 5.31 - şekil 5.33 de verilmektedir. GR-1(memba, mansap) ve GL-1 (memba, mansap) de bulunan extensometrelerde anlamsız hareketler göze çarpmaktadır. Bunlar sensörlerdeki hatalardan kaynaklanmaktadır. GL-4 memba tarafındaki ekstensometrelerden 30 m lik ekstensometrede sürekli bir kısalma eğilimi görülmüştür. GR-3 ve GR-4 ekstensometrelerinde ise başlangıçta oluşan kısalma hareketi, zamanla durma eğilimi göstermiştir. Diğer bölgelerdeki ekstensometrelerde ise zaman zaman anlamsız sıçramalar olmasına rağmen hareketler 3 mm' nin altındadır. Şekil 5.33' de ise galeri 4 de bulunan 50 m ve 80 m lik iki ekstensometrenin hareketleri verilmektedir. Hareketlerin 1 mm' in altında olduğu görülmüştür.


Çoklu Ekstensometreler (GR-1 Memba)
Hareket değeri (mm)
6
4
2
0
-2
-4
-6
Eks.45m
Eks.30m
Eks.15m
Eks.5m
13/12/11
01/02/12
22/03/12
11/05/12
30/06/12
19/08/12
08/10/12
27/11/12
16/01/13
07/03/13
Tarih

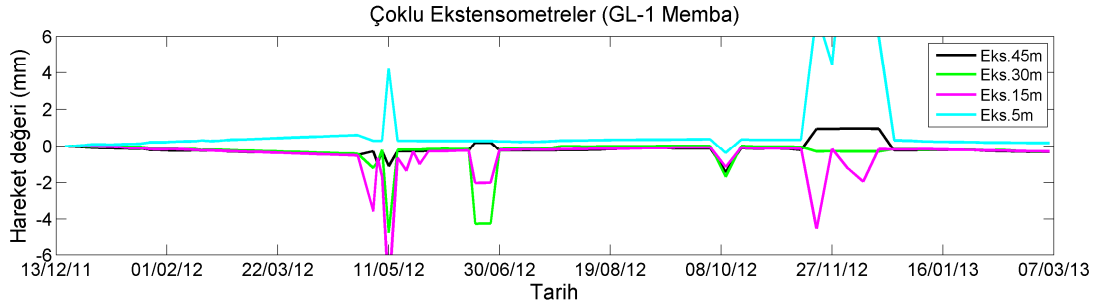

Çoklu Ekstensometreler (GR-1 Mansap)
Hareket değeri (mm)
6
4
2
0
-2
-4
-6
Eks.45m
Eks.30m
Eks.15m
Eks.5m
13/12/11
01/02/12
22/03/12
11/05/12
30/06/12
19/08/12
08/10/12
27/11/12
16/01/13
07/03/13
Tarih

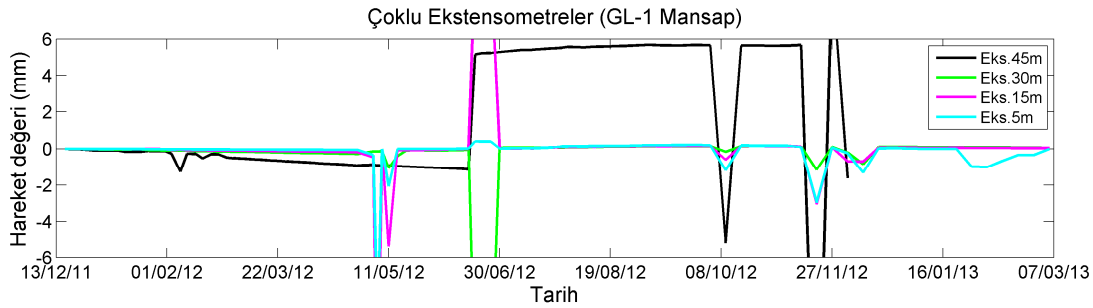

Çoklu Ekstensometreler (GR-2 Memba)
Hareket değeri (mm)
6
4
2
0
-2
-4
-6
Eks.45m
Eks.30m
Eks.15m
Eks.5m
13/12/11
01/02/12
22/03/12
11/05/12
30/06/12
19/08/12
08/10/12
27/11/12
16/01/13
07/03/13
Tarih

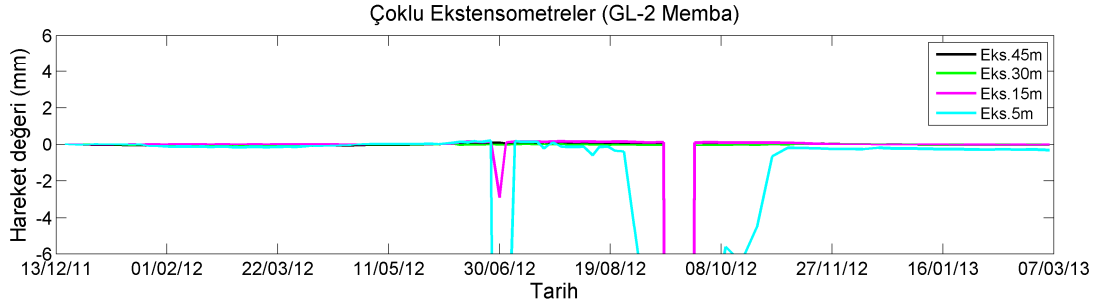

Çoklu Ekstensometreler (GR-2 Mansap)
Hareket değeri (mm)
6
4
2
0
-2
-4
-6
Eks.45m
Eks.30m
Eks.15m
Eks.5m
13/12/11
01/02/12
22/03/12
11/05/12
30/06/12
19/08/12
08/10/12
27/11/12
16/01/13
07/03/13
Tarih

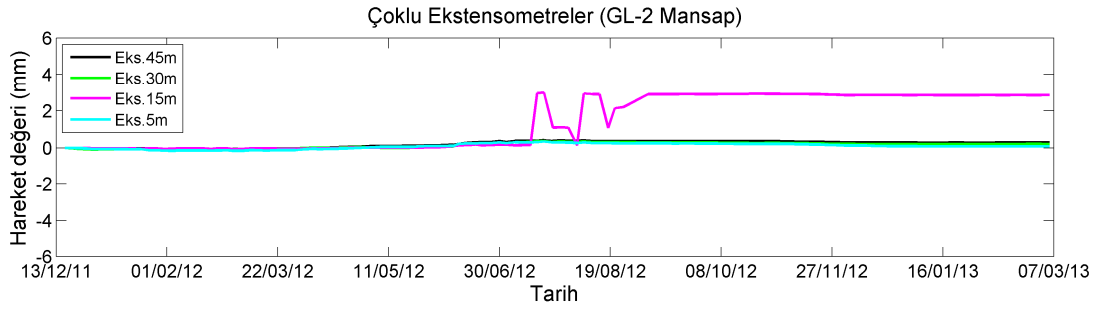


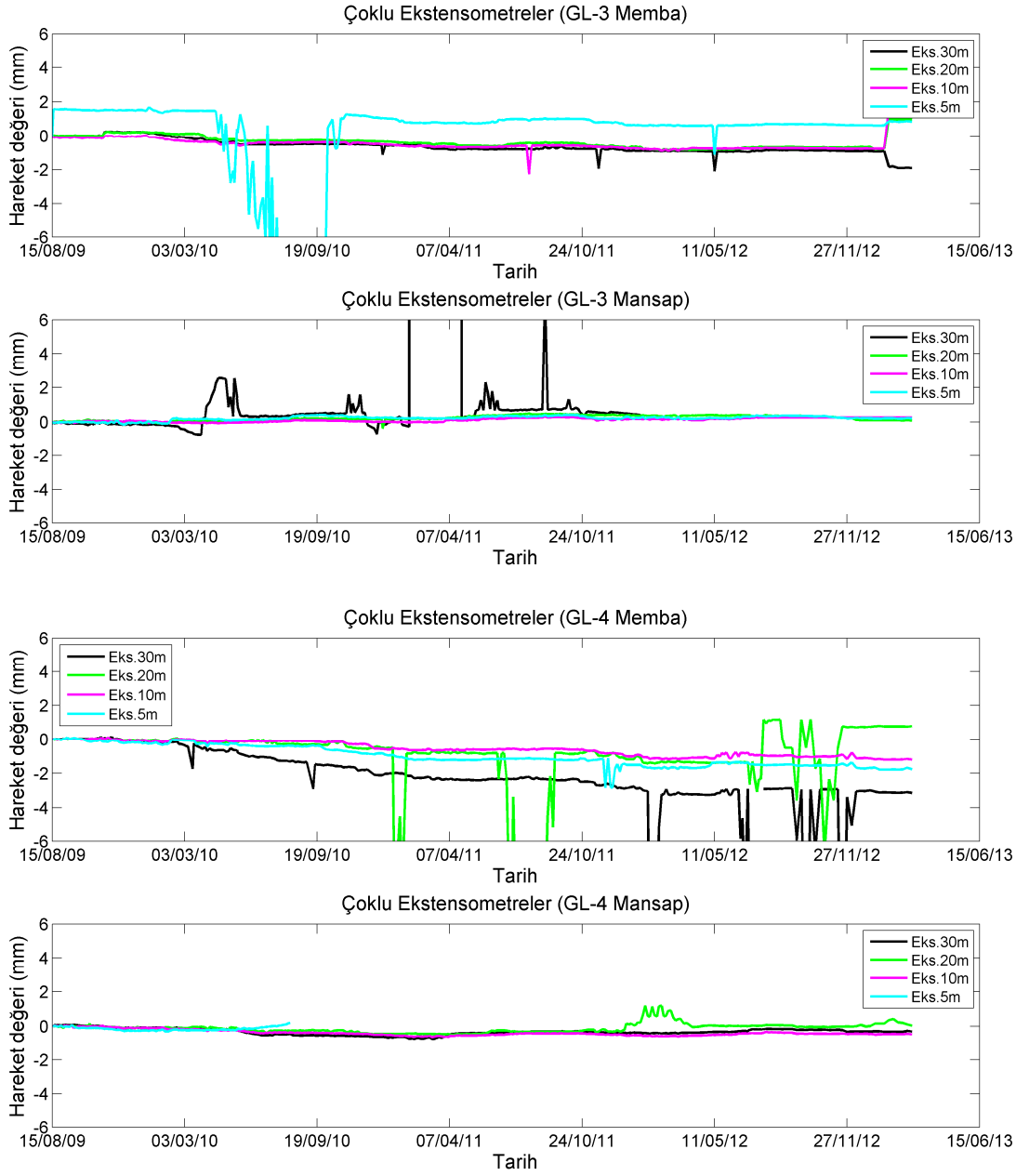
Şekil 5.31. Gövdeye yakın yerlerdeki galerilerde (sağ) bulunan ekstensometreler


Çoklu Ekstensometreler (GL-1 Memba)
Hareket değeri (mm)
6
4
2
0
-2
-4
-6
Eks.45m
Eks.30m
Eks.15m
Eks.5m
13/12/11
01/02/12
22/03/12
11/05/12
30/06/12
19/08/12
08/10/12
27/11/12
16/01/13
07/03/13
Tarih

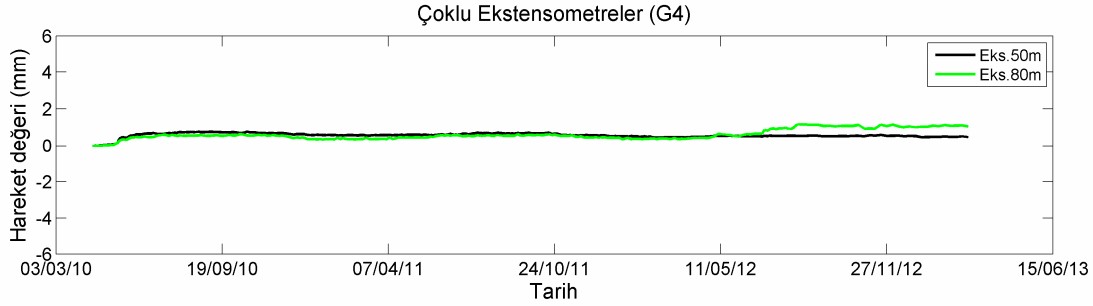

Çoklu Ekstensometreler (GL-1 Mansap)
Hareket değeri (mm)
6
4
2
0
-2
-4
-6
Eks.45m
Eks.30m
Eks.15m
Eks.5m
13/12/11
01/02/12
22/03/12
11/05/12
30/06/12
19/08/12
08/10/12
27/11/12
16/01/13
07/03/13
Tarih


Çoklu Ekstensometreler (GL-2 Memba)
Hareket değeri (mm)
6
4
2
0
-2
-4
-6
Eks.45m
Eks.30m
Eks.15m
Eks.5m
13/12/11
01/02/12
22/03/12
11/05/12
30/06/12
19/08/12
08/10/12
27/11/12
16/01/13
07/03/13
Tarih


Çoklu Ekstensometreler (GL-2 Mansap)
Hareket değeri (mm)
6
4
2
0
-2
-4
-6
Eks.45m
Eks.30m
Eks.15m
Eks.5m
13/12/11
01/02/12
22/03/12
11/05/12
30/06/12
19/08/12
08/10/12
27/11/12
16/01/13
07/03/13
Tarih



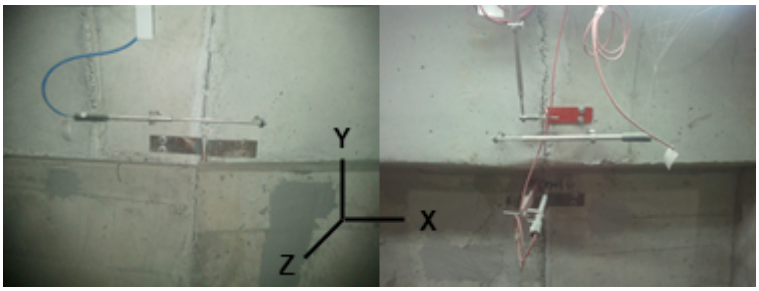
Şekil 5.32. Gövdeye yakın yerlerdeki galerilerde (sol) bulunan ekstensometreler



Şekil 5.33. Galeri 4 de bulunan ekstensometre

5.2.2.2.3. Derz açıklık ölçümleri

İnşaat aşamasında, derz enjeksiyonları sırasında ve barajın faaliyete geçme döneminde büzülme derzlerindeki hareketleri gözlemleyebilmek için farklı tiplerde (1 veya 3 boyutlu) derz ölçerler monte edilmiştir (Şekil 5.22). Farklı galerilerde toplam 22 adet 3-boyutlu ve 20 adet 1- boyutlu ölçüm yapabilen derz ölçerler monte edilmiştir (Şekil 5.34).

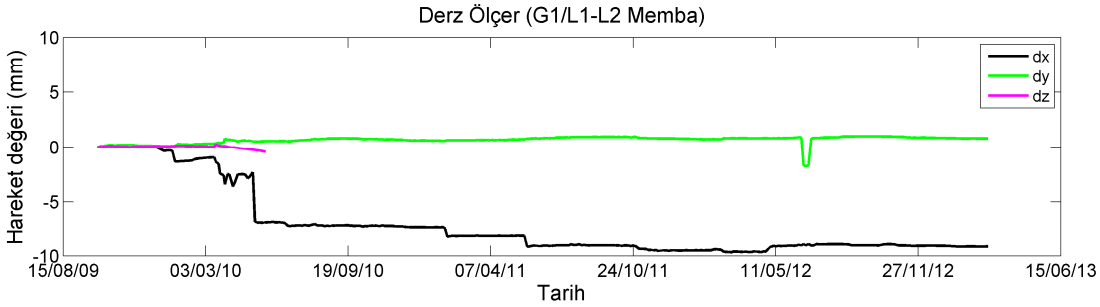


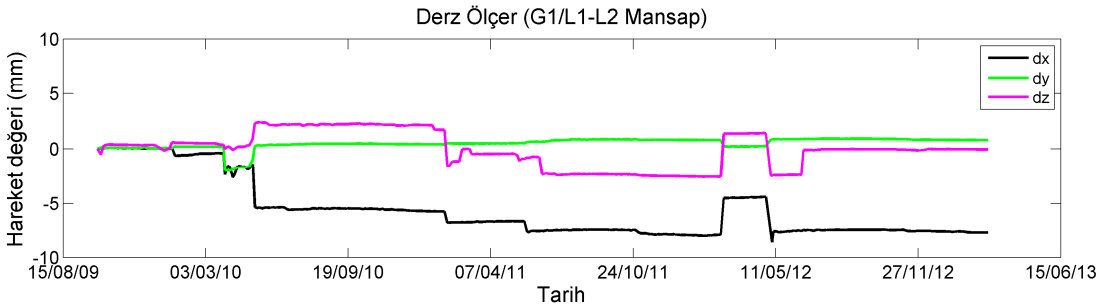
Şekil 5.34 Tek ve üç boyutlu derz ölçerler (Galeri 1)

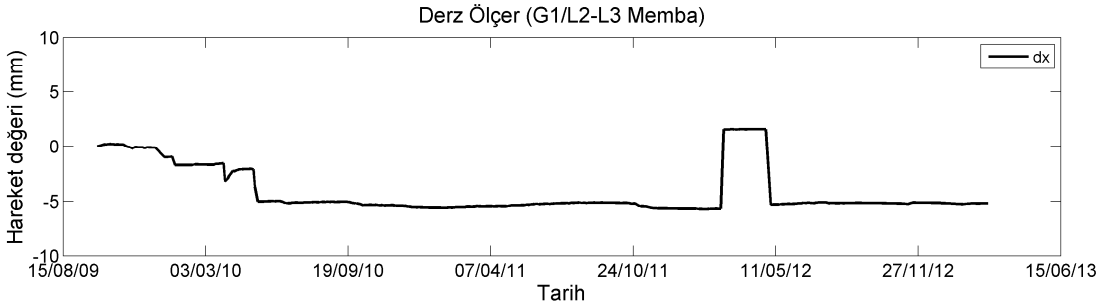
Derz ölçerler için koordinat sistemi şu şekilde tanımlanmıştır; 'x' galeri aksı yönünde derz açılmasıdır, 'y' derz boyunca düşey yönde teğetsel harekettir ve 'z' ise, x ve y yönlerine dikey yöndeki derz hareketleridir (yani radyal yönde). Şekil 5.35 - Şekil 5.38' de sırasıyla galeri 1, 2, 3 ve 4 de memba ve mansap tarafındaki derz açıklıklarına yerleştirilmiş derz ölçer verileri verilmiştir.

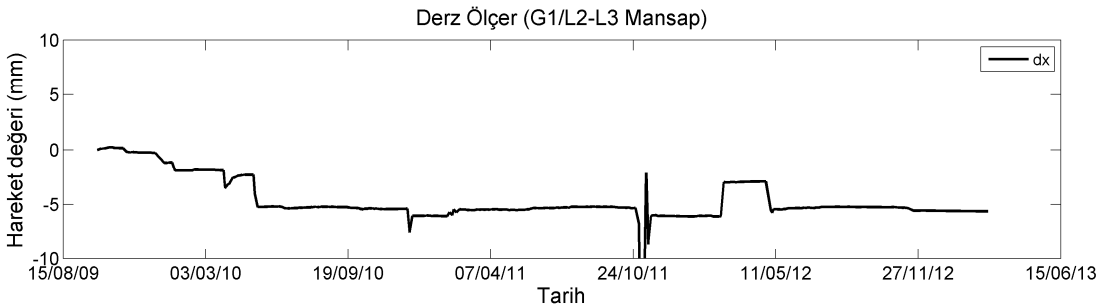
R1-M memba derz ölçerde z yönünde bir açılma olmuş, ancak Nisan 2012 tarihinden sonra ise kapanma eğilimi göstermiştir. Diğer derz ölçerler ise genelde kapanma eğilimi göstermiştir. Hareketler 1 mm nin altında olup, önemli bir durum söz konusu değildir. Galeri 2 deki derz ölçerler (Şekil 5.36), galeri 1 dekilere benzer olarak genelde kapanma eğilimi göstermiştir. Galeri 3 deki R1-M memba mansap derz ölçerlerinde başlangıçta oluşan z yönündeki açılma yerini durağan bir harekete bırakmıştır (Şekil 5.37). Galeri 4 deki derz ölçerlerde önemli bir hareket olmayıp, R1-M mansap derz ölçeri bazı hareketlenmeler ve zıplamalar göstermektedir ancak bu derz ölçerin hasar gördüğü söylenebilir. Ayrıca L1-L2 memba derz ölçeri de radyal yönde bazı hareketlenmeler görülürken mansap tarafında bu hareketlenmeler görülememektedir (Şekil 5.38).

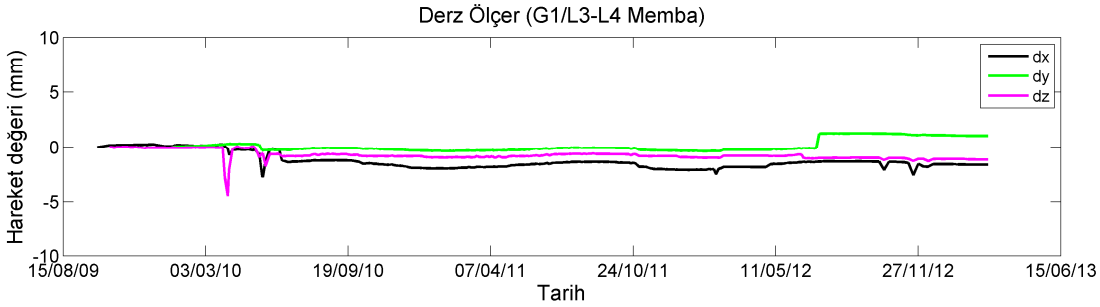
Derz ölçer verilerine göre, ölçüm kayıtları düzensizliklerinin dışında genel olarak derzlerde önemli bir açılma söz konusu değildir.

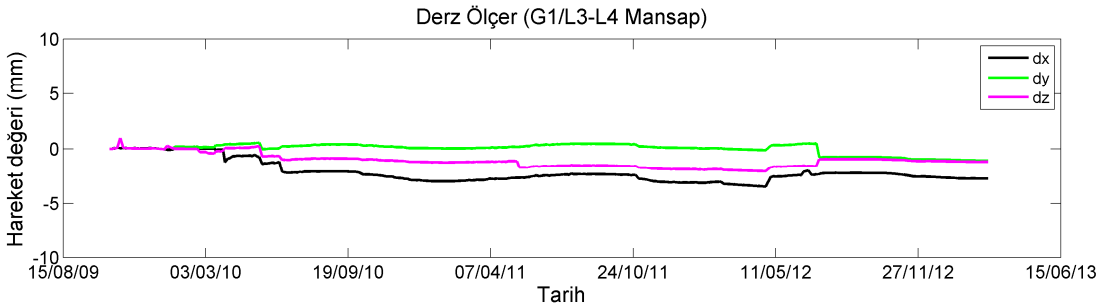

Derz Ölçer (G1/L1-L2 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
dy
dz
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

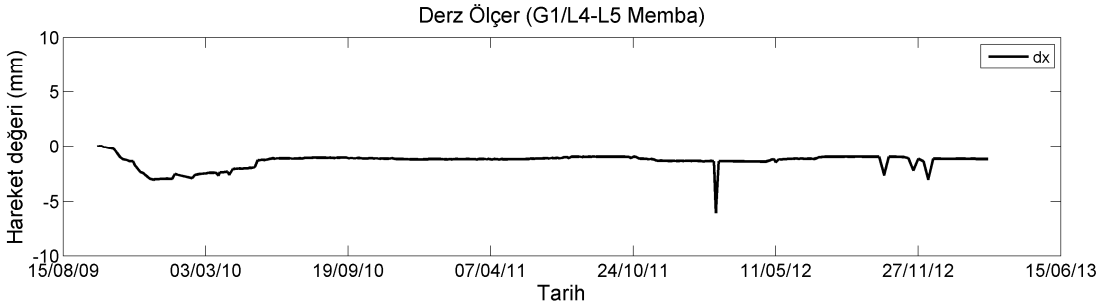

Derz Ölçer (G1/L1-L2 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
dy
dz
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

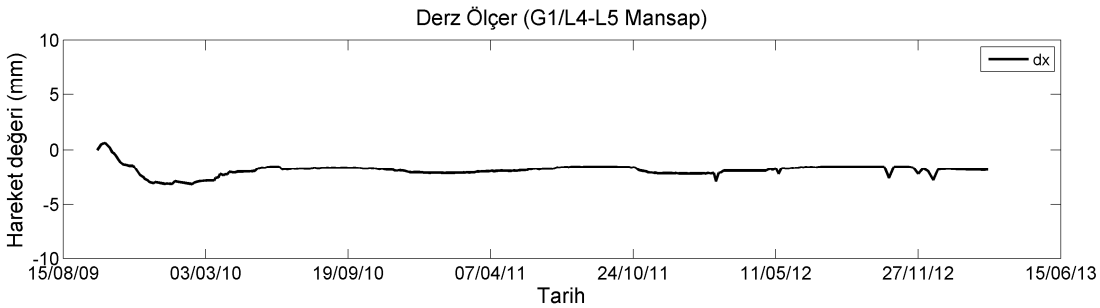

Derz Ölçer (G1/L2-L3 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

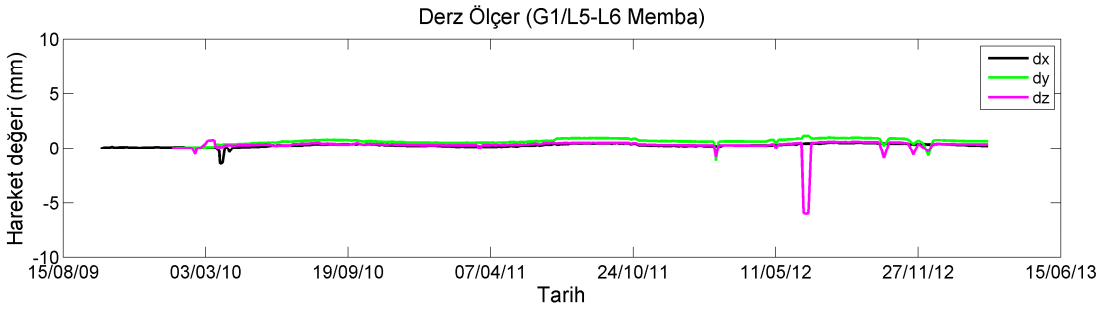

Derz Ölçer (G1/L2-L3 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

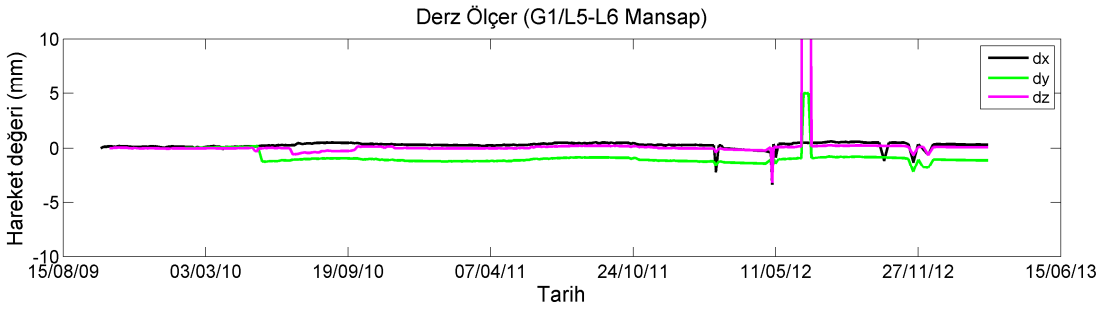

Derz Ölçer (G1/L3-L4 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
dy
dz
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

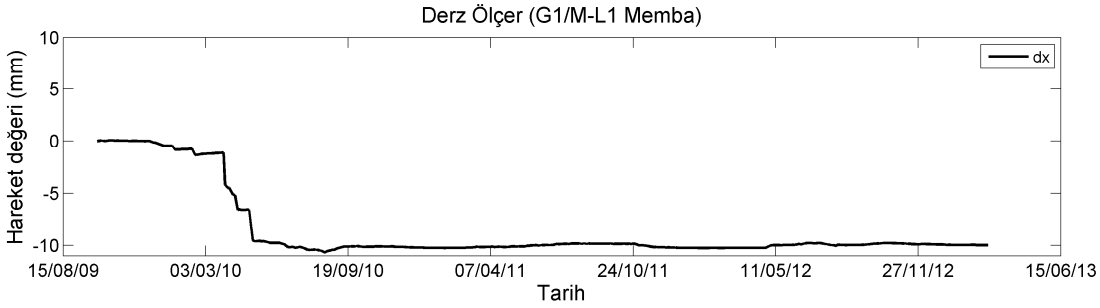

Derz Ölçer (G1/L3-L4 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
dy
dz
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

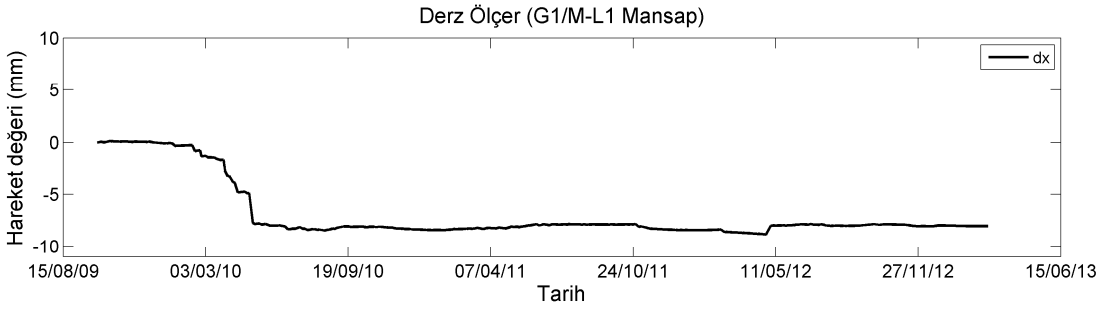

Derz Ölçer (G1/L4-L5 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

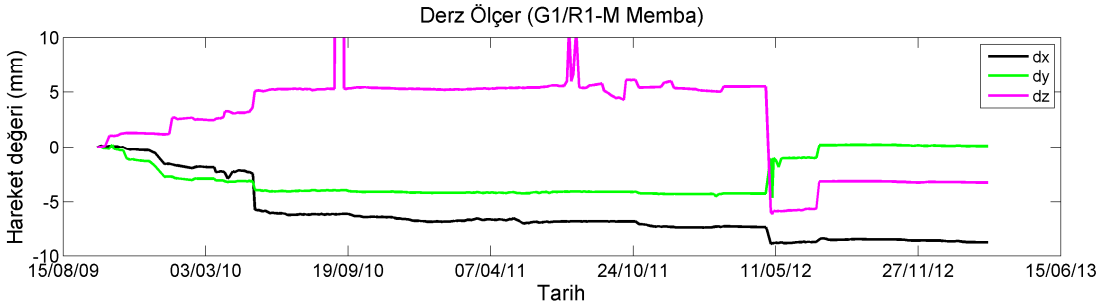

Derz Ölçer (G1/L4-L5 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

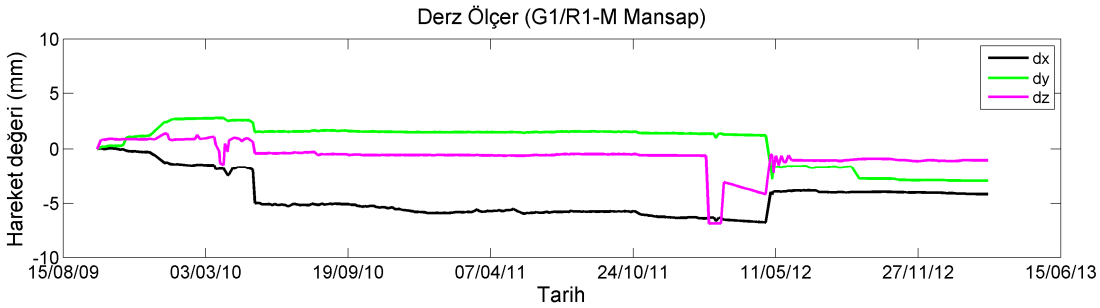

Derz Ölçer (G1/L5-L6 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
dy
dz
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

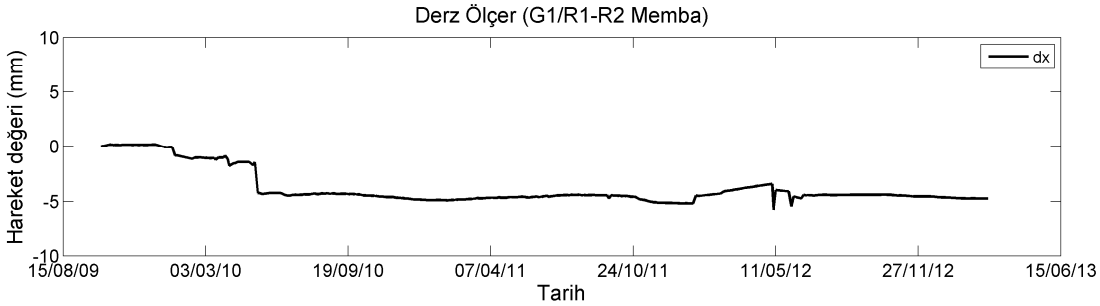

Derz Ölçer (G1/L5-L6 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
dy
dz
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

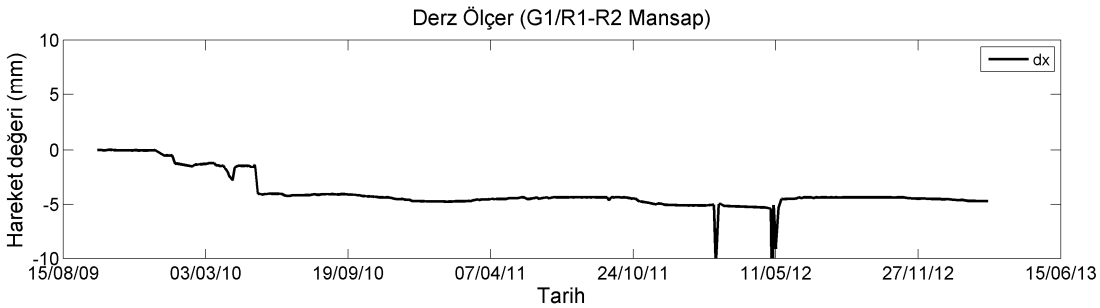

Derz Ölçer (G1/M-L1 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

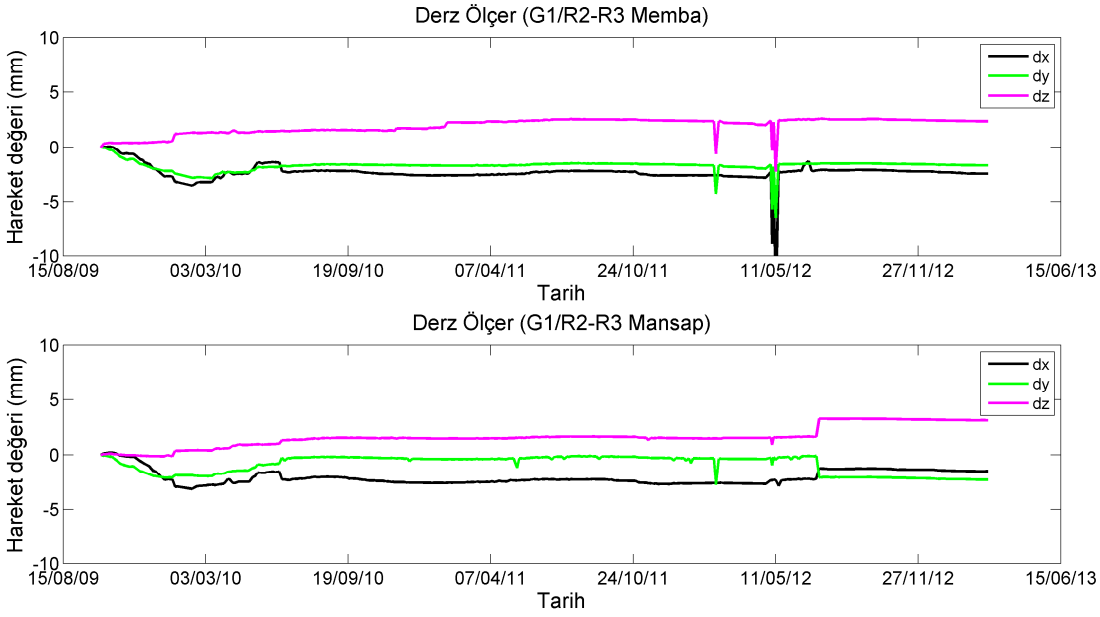

Derz Ölçer (G1/M-L1 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih


Derz Ölçer (G1/R1-M Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
dx
dy
dz

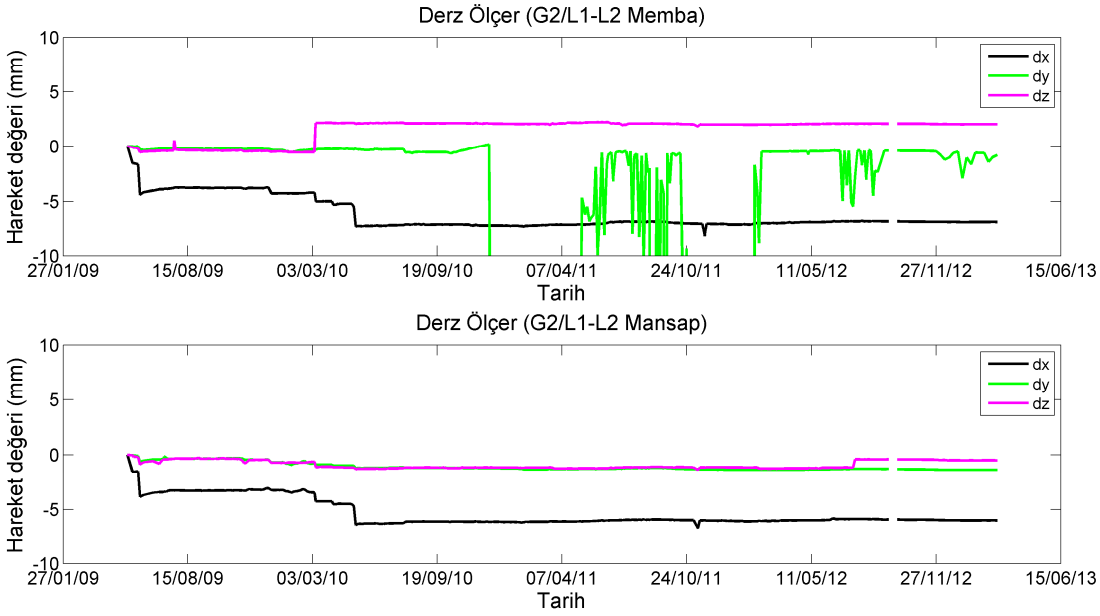

Derz Ölçer (G1/R1-M Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
dx
dy
dz

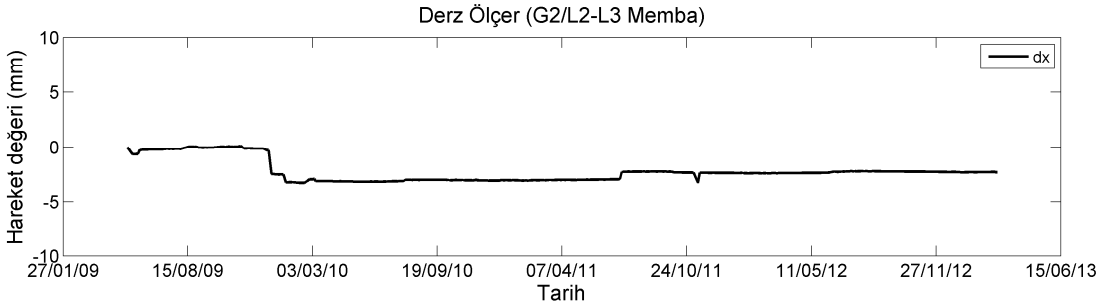

Derz Ölçer (G1/R1-R2 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
dx

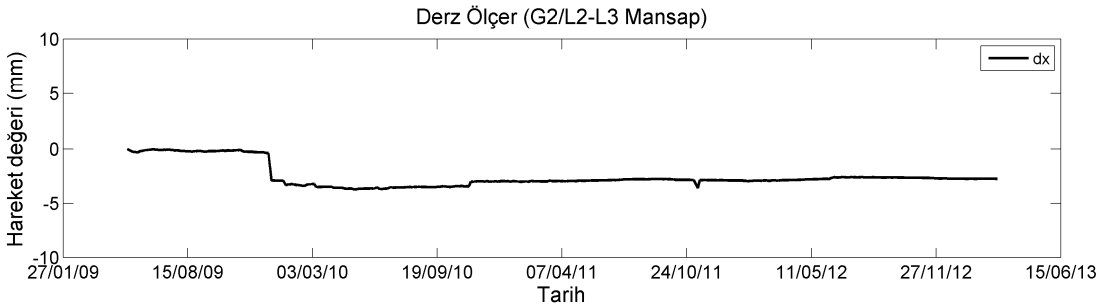

Derz Ölçer (G1/R1-R2 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
dx

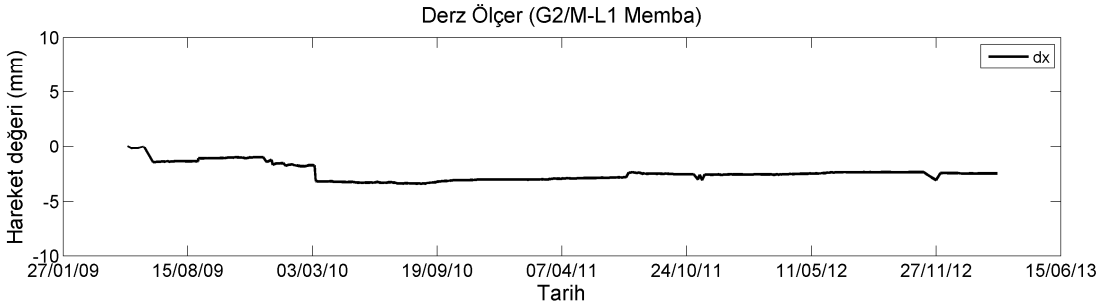


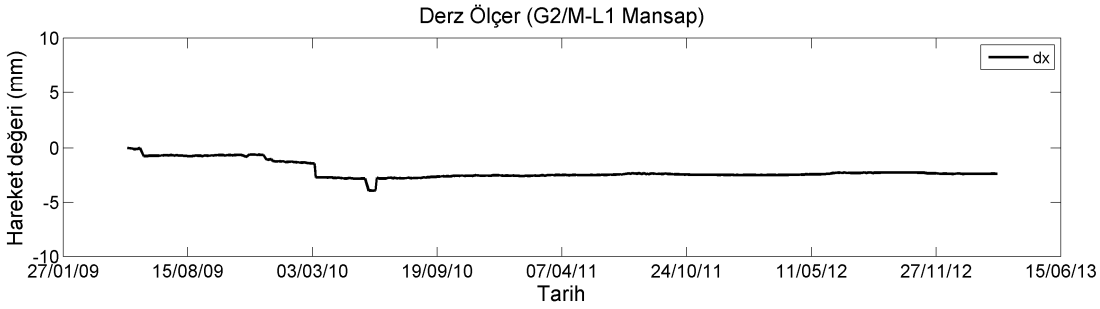
Şekil 5.35. Galeri 1 deki derz ölçer verileri

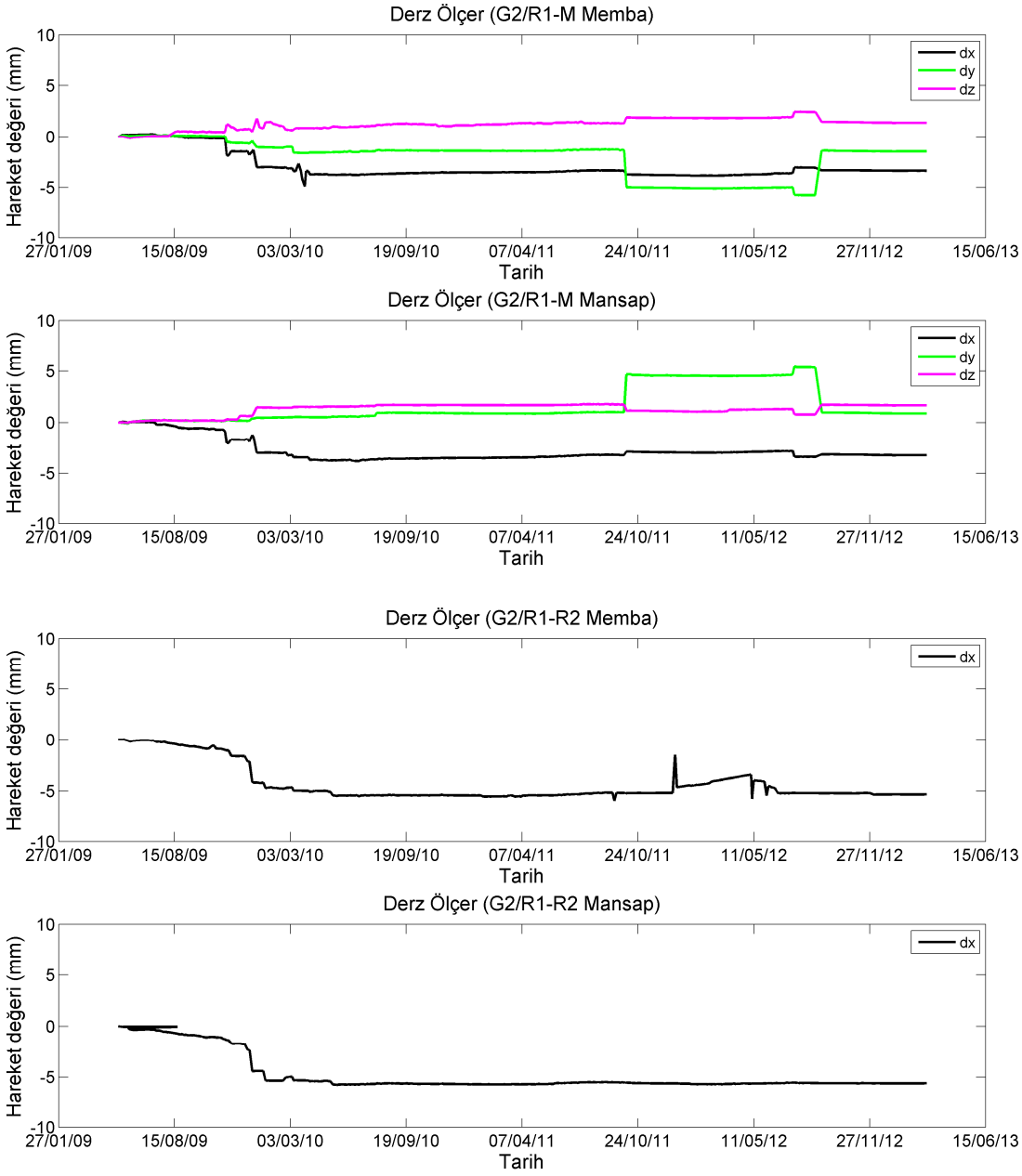



Derz Ölçer (G2/L2-L3 Memba)
dx
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

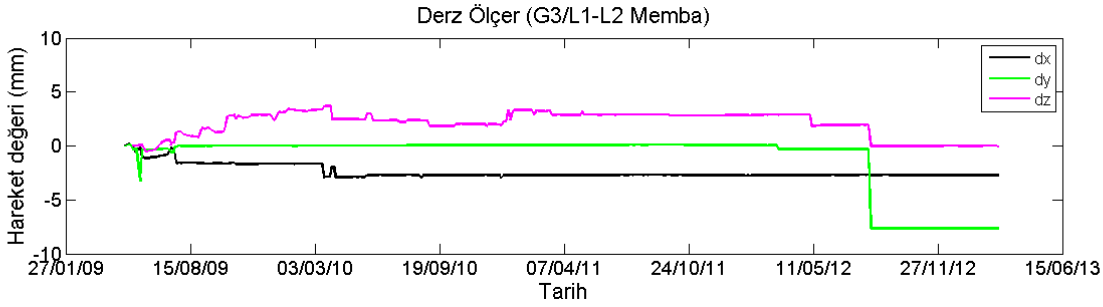

Derz Ölçer (G2/L2-L3 Mansap)
dx
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

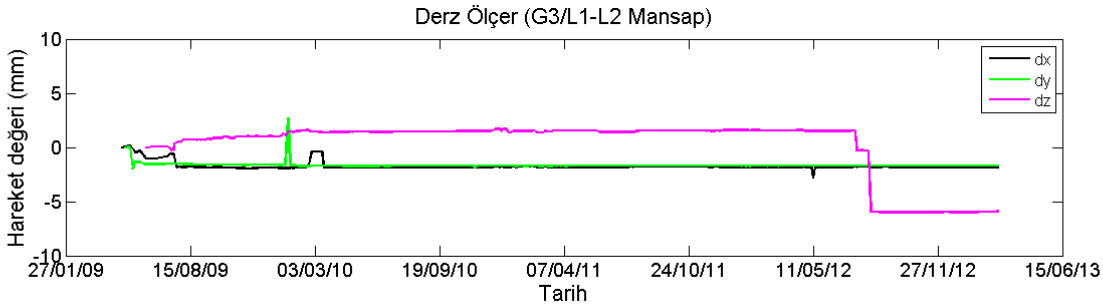

Derz Ölçer (G2/M-L1 Memba)
dx
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

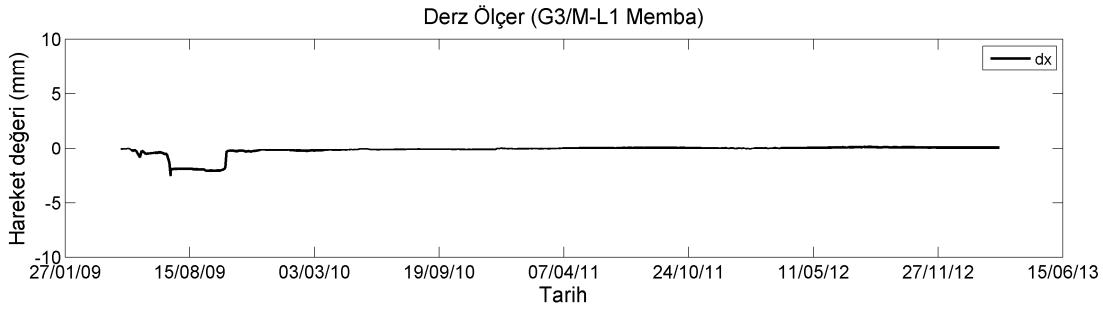

Derz Ölçer (G2/M-L1 Mansap)
dx
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

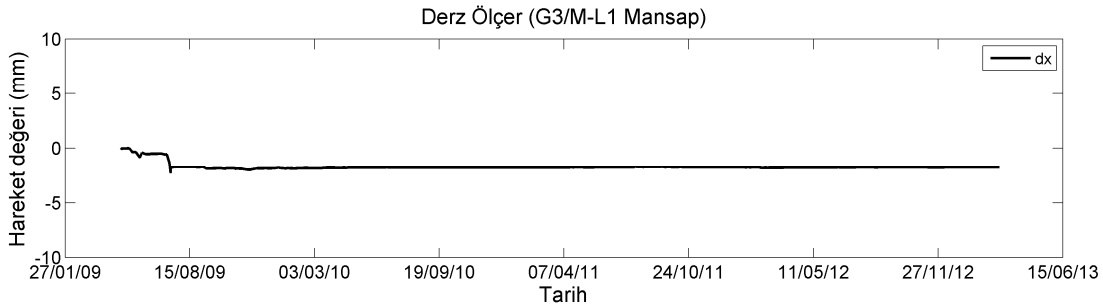


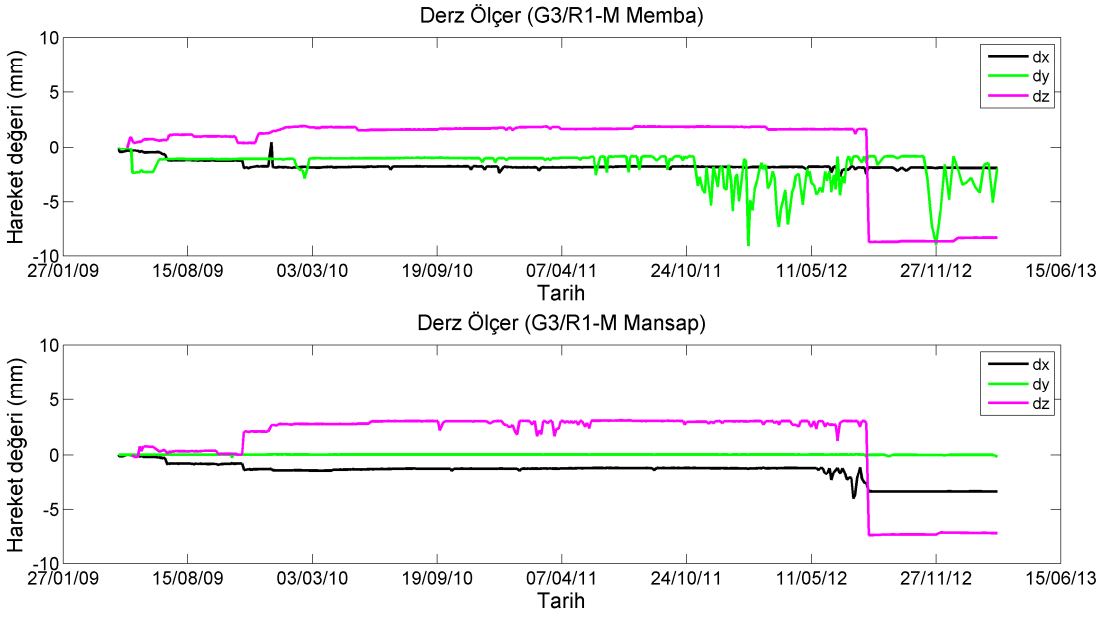
Şekil 5.36. Galeri 2 deki derz ölçer verileri


Derz Ölçer (G3/L1-L2 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
dy
dz
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

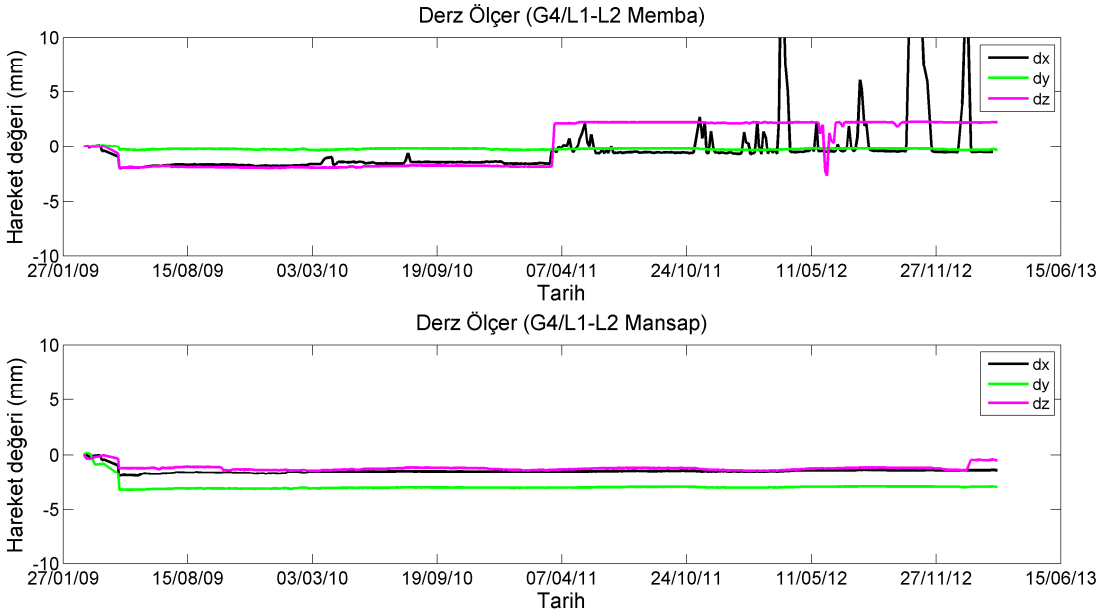

Derz Ölçer (G3/L1-L2 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
dy
dz
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

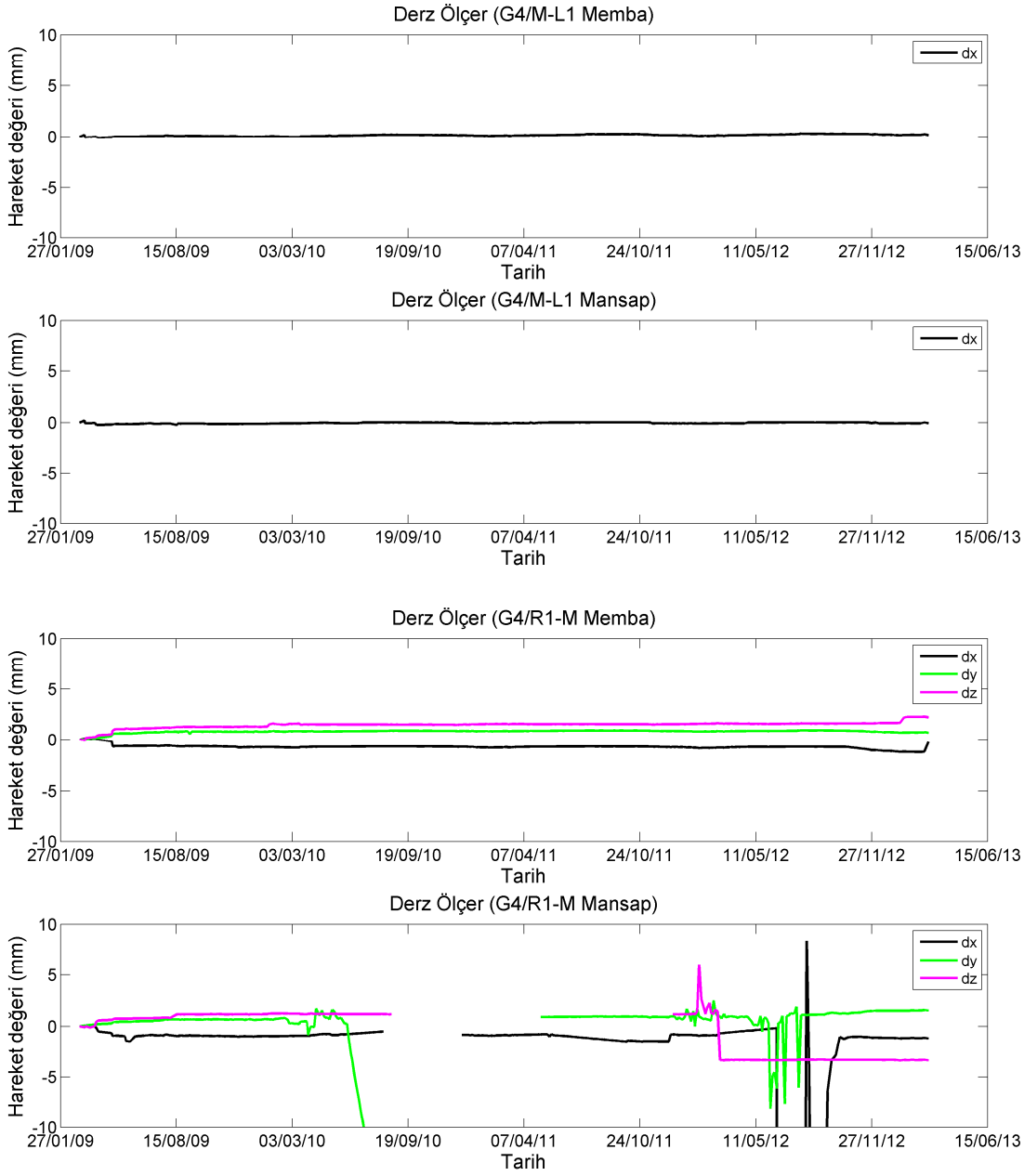

Derz Ölçer (G3/M-L1 Memba)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih


Derz Ölçer (G3/M-L1 Mansap)
Hareket değeri (mm)
10
5
0
-5
-10
dx
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih



Şekil 5.37. Galeri 3 deki derz ölçer verileri





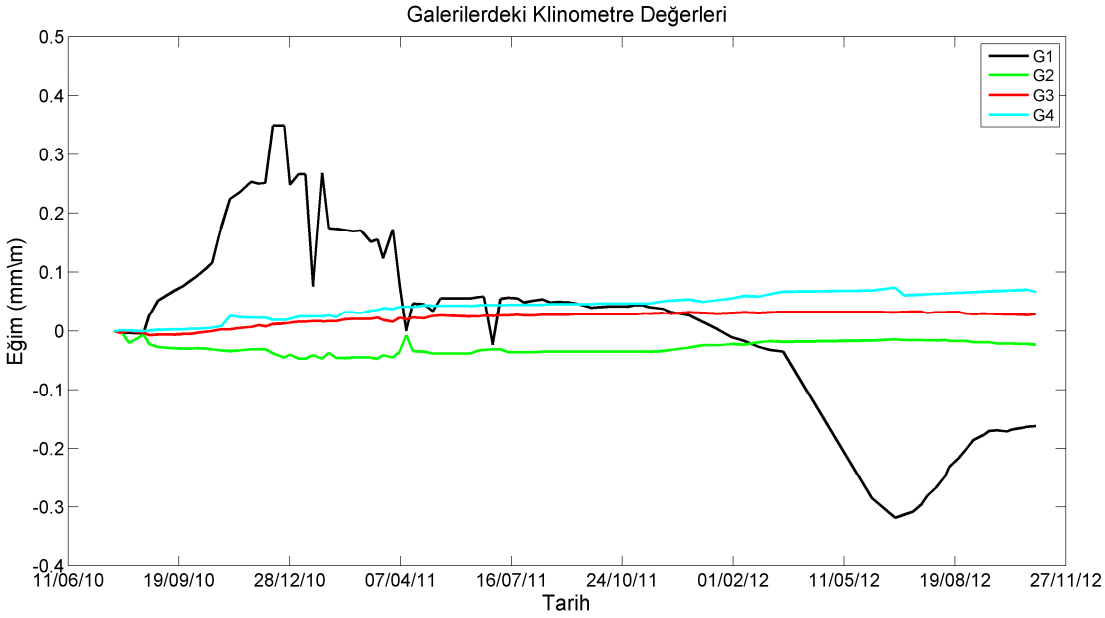
Şekil 5.38 Galeri 4 deki derz ölçer verileri

5.2.2.2.4. Klinometre ölçümleri

Galerilerdeki sarkaç odalarına yerleştirilen ölçü noktaları arasındaki eğim değişimi yüksek hassasiyetli manuel klinometre kullanılarak ortalama haftada bir izlenmiştir. Klinometre boyu 1 m olup, şekil 5.39' de ölçülerde kullanılan klinometre verilmektedir. Şekil 5.40 de ise ölçü sonuçları verilmektedir. Pozitif eğim üst kısmın mansaba doğru hareketini göstermektedir.



Şekil 5.39. Yüksek duyarlılıklı klinometre



Şekil 5.40. Galerilerde bulunan klinometre verileri

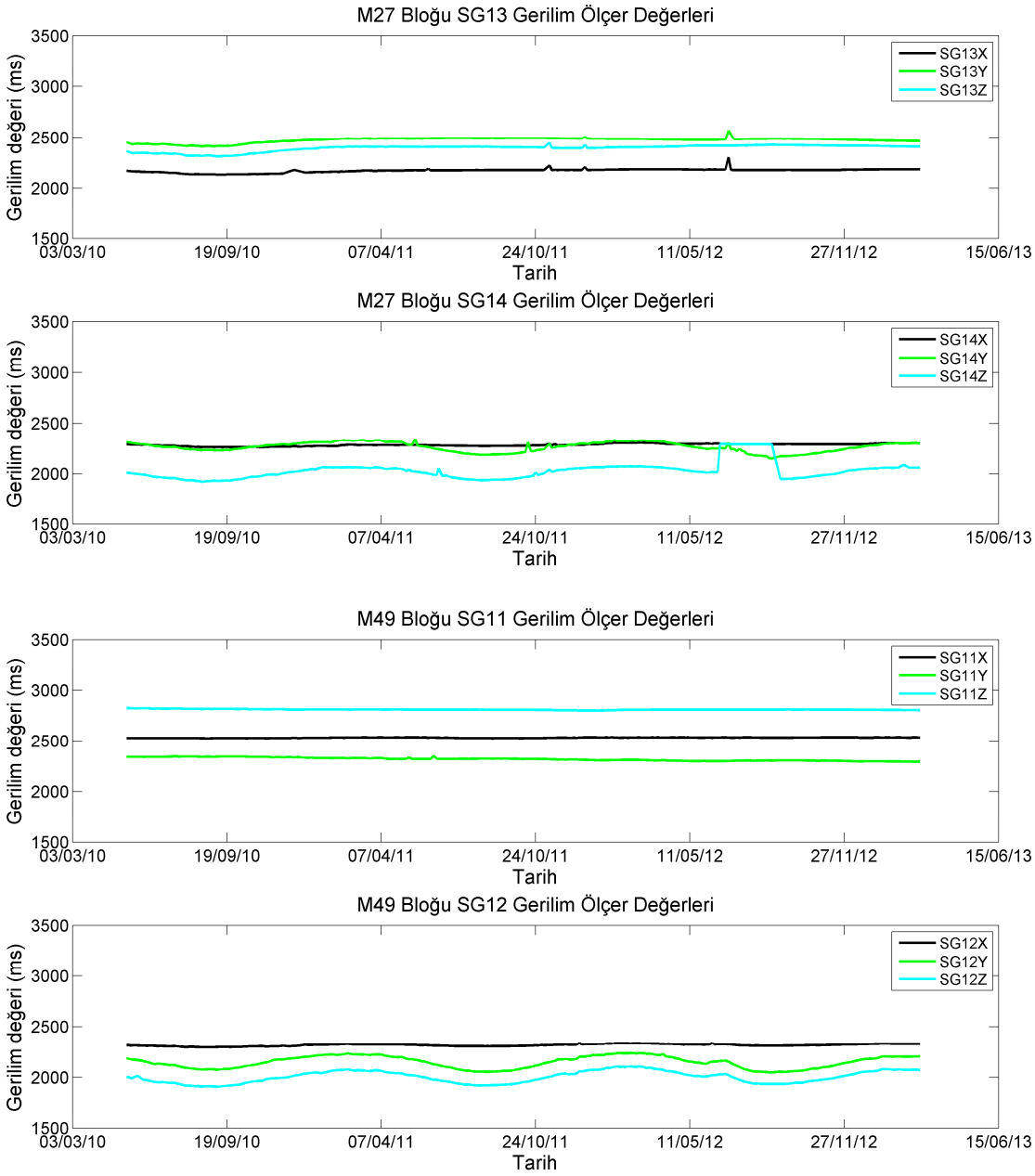
Şekilde görüldüğü gibi G2, G3 ve G4'deki klinometrelerin hareketleri yaklaşık olarak sabittir. G1'de ise genelde klinometrenin üst kısmı Eylül-Aralık 2010 tarihleri arasında ve Temmuz-Eylül 2012 tarihleri arasında mansap hareketi göstermiştir. Diğer zaman dilimlerinde ise genelde memba hareketi söz konusudur.

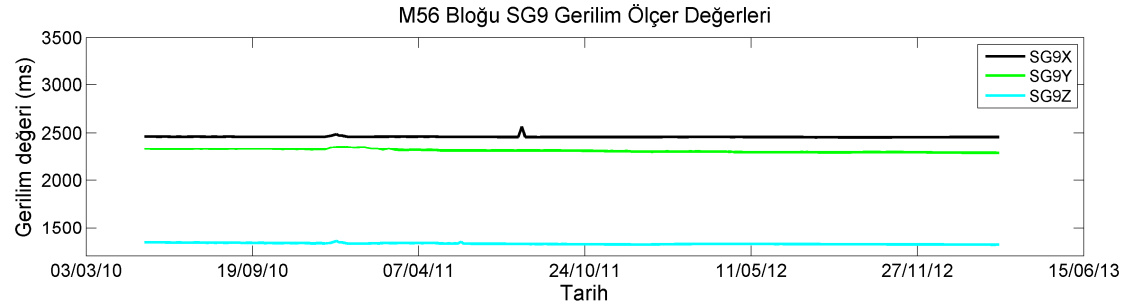
5.2.2.3. Gerilim ve basınç ölçümleri

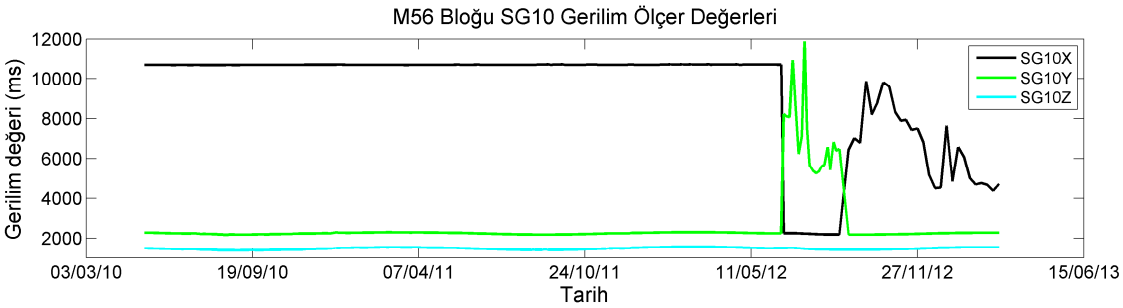
5.2.2.3.1. Gerilim ölçümleri

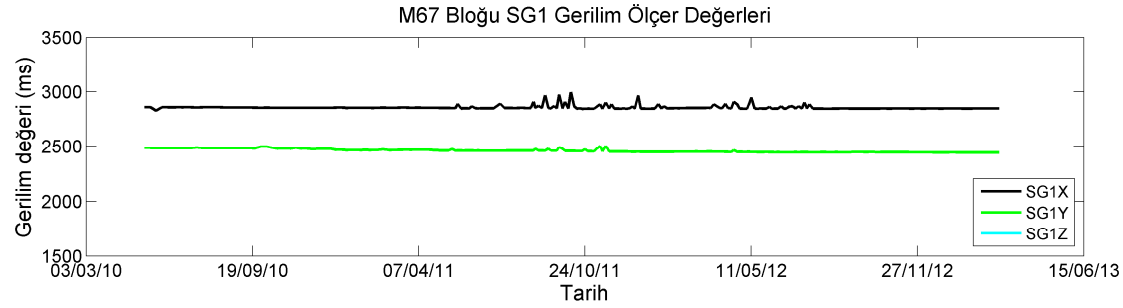
Beton gövdenin belirli kotlarındaki bloklara gerilme değerlerini belirlemek amacıyla gerilimölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 5.22). M67, M56, M49, M27 bloklarındaki gerilimölçerler sırasıyla 502 m, 535 m, 556 m ve 622 m kotlarında

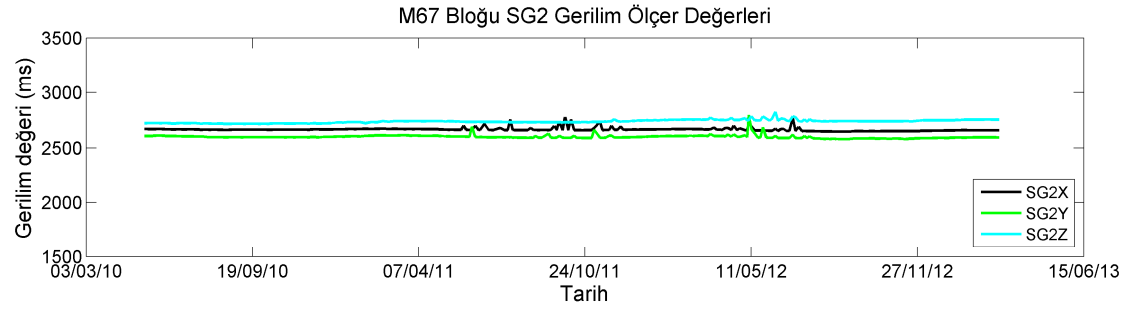
bulunmaktadır. Genelde ilk okumalardaki birkaç bin (10000 e kadar) mikro gerilmeler oldukça yüksektir. Fakat gerilimlerdeki daha sonraki gelişmeler düzgün ve olası sonuçlar göstermektedir (Şekil 5.41). x değeri memba-mansap yönündeki gerilmeleri, y değeri sağ sahil-sol sahil yönündeki gerilmeleri, z ise yukarı-aşağı yöndeki gerilmeyi ifade etmektedir. Sadece M56 bloğu SG10 gerilim ölçeri x yönünde başlangıçta gerilim değeri yüksek iken son zamanlarda gittikçe azalan bir eğilim göstermiştir. Diğer gerilimölçerlerde ise değerler normal sınırlar içerisindedir (<10000).

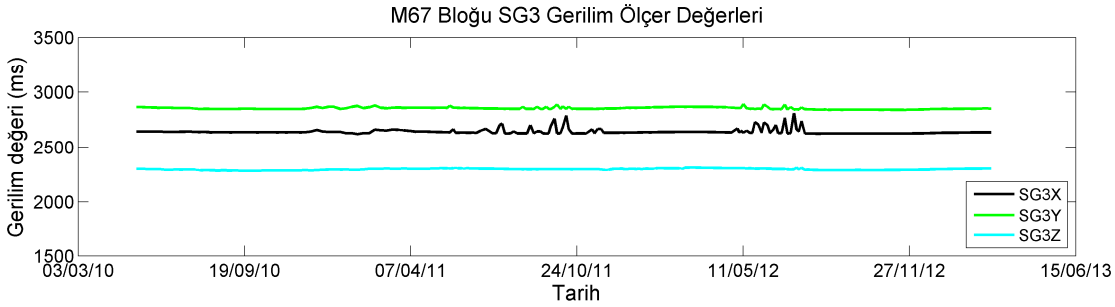


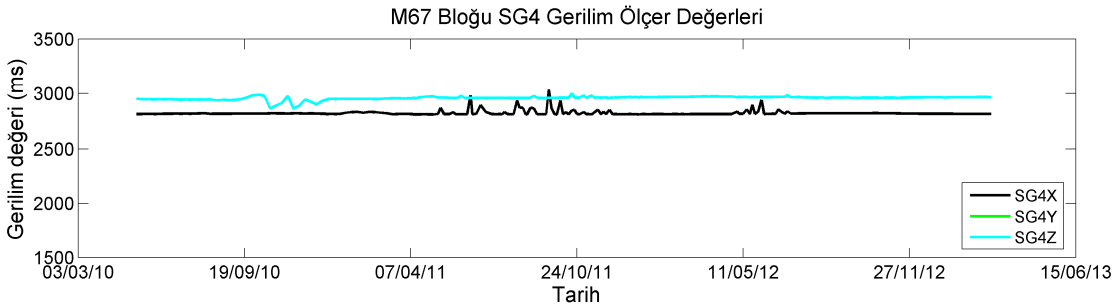

M56 Bloğu SG9 Gerilim Ölçer Değerleri
Gerilim değeri (ms)
3500
3000
2500
2000
1500
SG9X
SG9Y
SG9Z
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

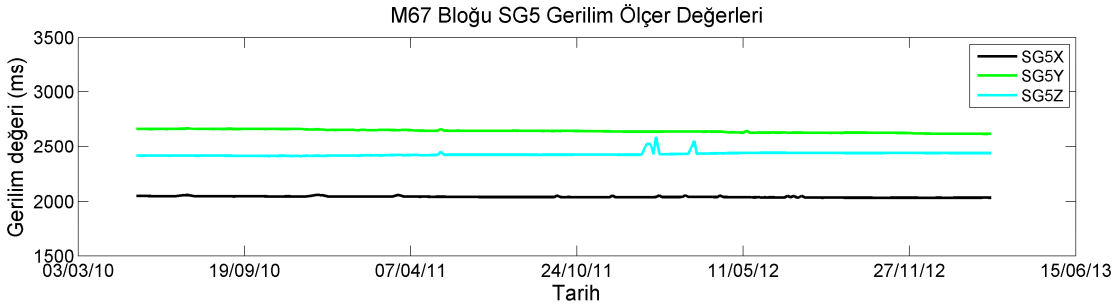

M56 Bloğu SG10 Gerilim Ölçer Değerleri
Gerilim değeri (ms)
12000
10000
8000
6000
4000
2000
SG10X
SG10Y
SG10Z
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

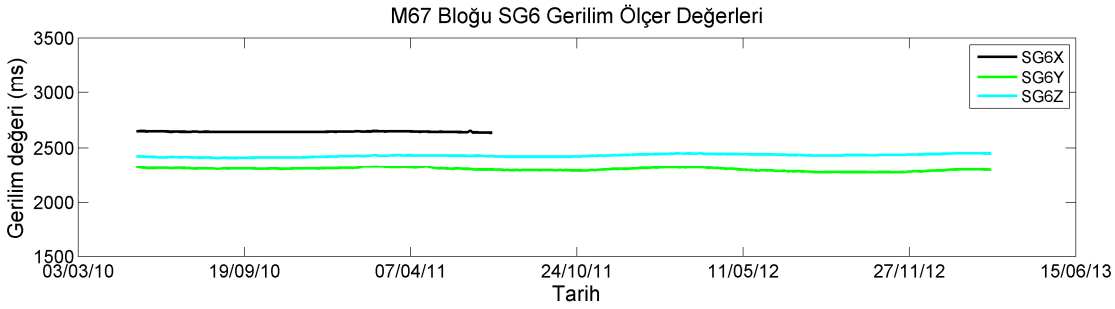

M67 Bloğu SG1 Gerilim Ölçer Değerleri
Gerilim değeri (ms)
3500
3000
2500
2000
1500
SG1X
SG1Y
SG1Z
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih

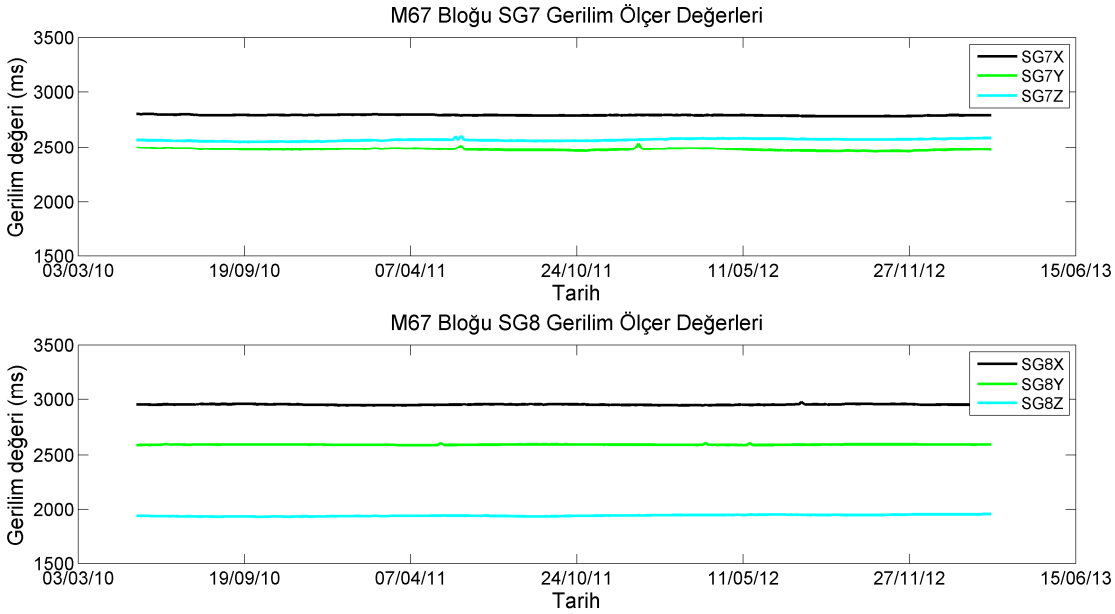

M67 Bloğu SG2 Gerilim Ölçer Değerleri
Gerilim değeri (ms)
3500
3000
2500
2000
1500
SG2X
SG2Y
SG2Z
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih


M67 Bloğu SG3 Gerilim Ölçer Değerleri
Gerilim değeri (ms)
3500
3000
2500
2000
1500
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
SG3X
SG3Y
SG3Z


M67 Bloğu SG4 Gerilim Ölçer Değerleri
Gerilim değeri (ms)
3500
3000
2500
2000
1500
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
SG4X
SG4Y
SG4Z


M67 Bloğu SG5 Gerilim Ölçer Değerleri
Gerilim değeri (ms)
3500
3000
2500
2000
1500
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
SG5X
SG5Y
SG5Z

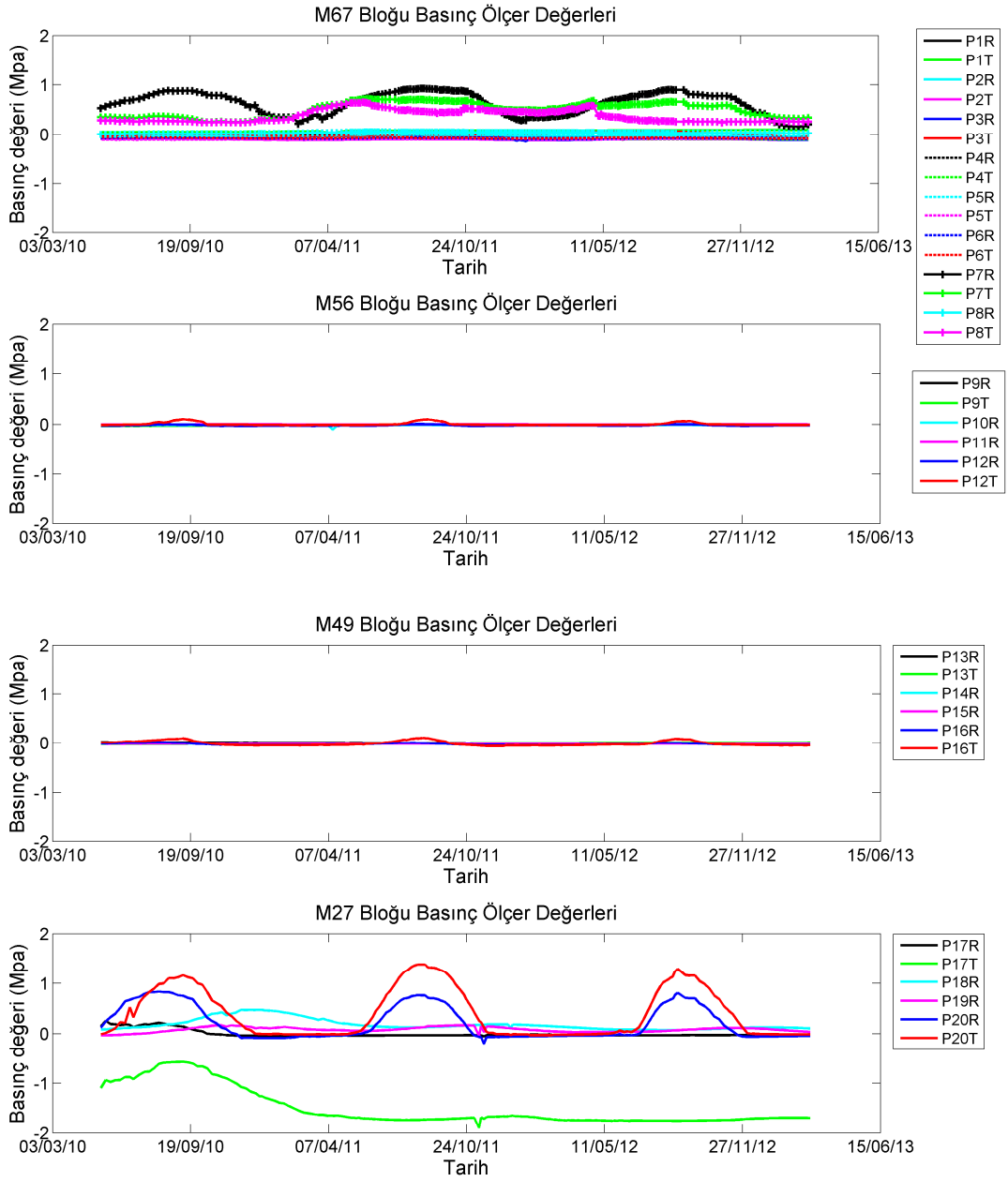

M67 Bloğu SG6 Gerilim Ölçer Değerleri
Gerilim değeri (ms)
3500
3000
2500
2000
1500
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
SG6X
SG6Y
SG6Z



Şekil 5.41. Baraj gövdesine yerleştirilmiş gerilimölçer verileri

5.2.2.3.2. Basınç ölçümleri

Çeşitli yüksekliklerdeki düşey ve yatay yönlerde oluşan basıncı ölçmek için toplam 34 adet tele basınçölçer baraj betonuna gömülmüştür(Şekil 5.22). Tele basınçölçerler kurulumlarından sonra yaklaşık olarak 1 MPa ile tekrardan basınçlandırılmıştır. M-27 bloğundaki P17T basınç ölçerde ilk basınçlandırmaya göre basınç azalması gerçekleşmiştir. Bu durum basınçölçerin kendisini çevreleyen betonla irtibatının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. M-67 ve M-27 bloklarındaki bazı basınç ölçerler pozitif salınımlar göstermesine rağmen diğer basınç ölçerler sabit değerler göstermektedir (Şekil 5.42).

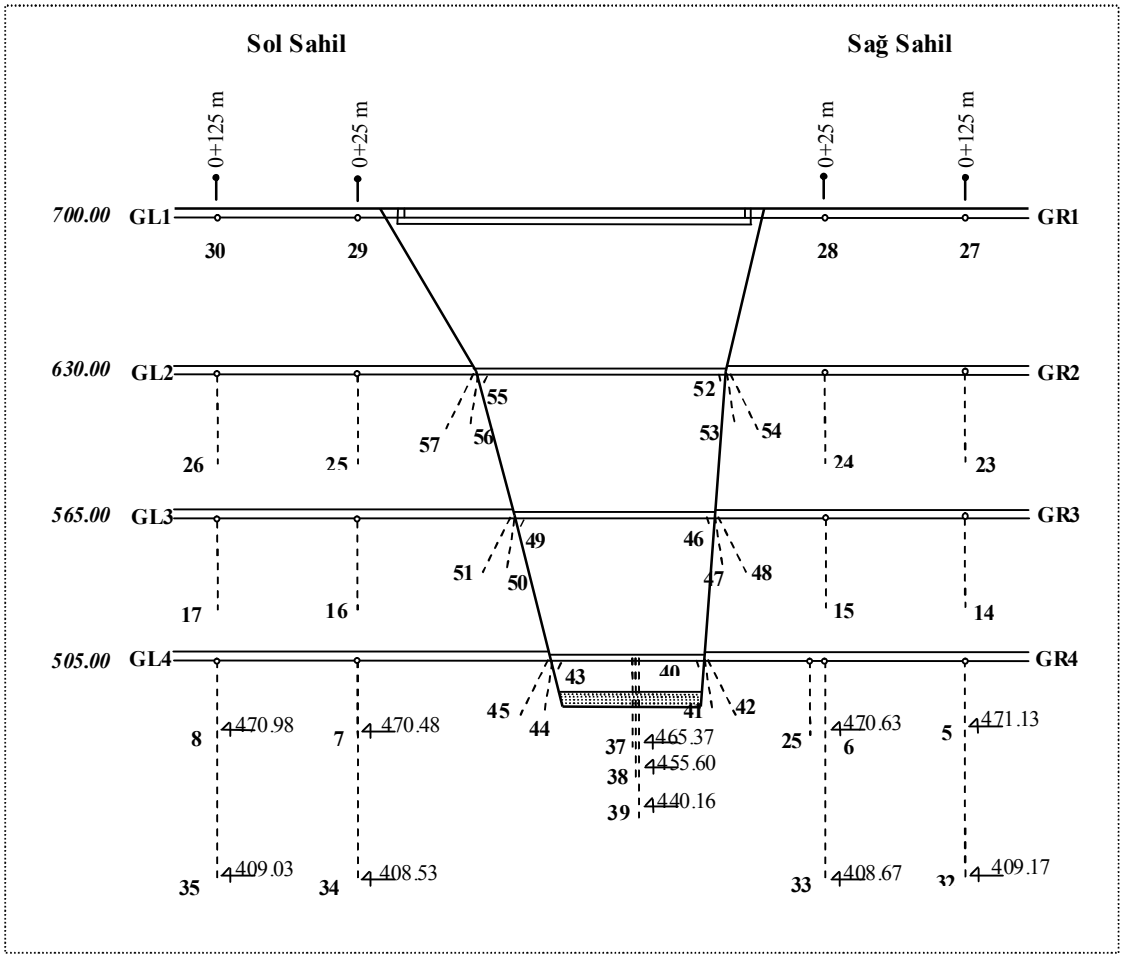


Şekil 5.42. Basınç ölçer verileri

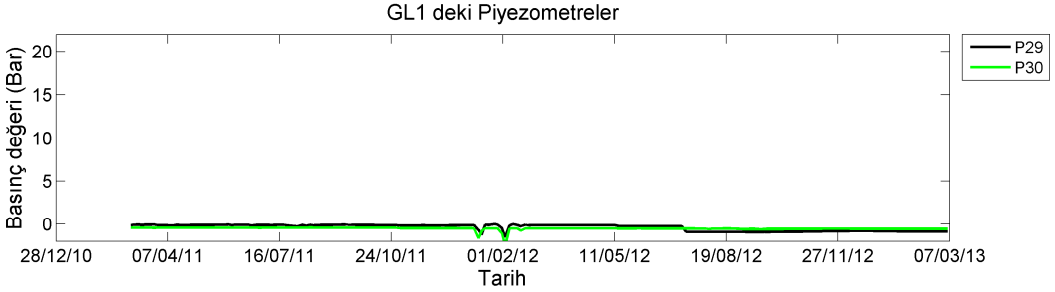
5.2.2.4. Boşluk suyu basınç ölçümleri

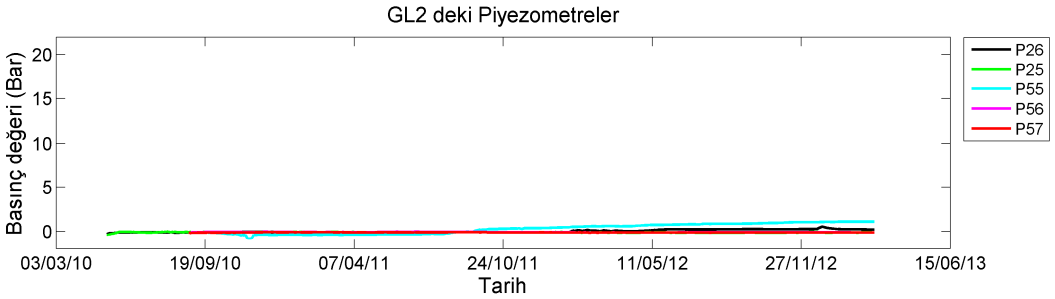
Boşluk suyu basınçlarını belirlemek amacıyla 21 adet piyezometre (37 – 57) gövde etrafına, 21 adedi ise yakın civarlara (galeri içlerine) tesis edilmiştir (Şekil 5.43). Baraj gövdesinin izlenmesinde bu piyezometrelere ait veriler göz önüne alınmıştır. Piyezometrelerin gösterdiği basınç değerleri Şekil 5.44 de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi gövde altındaki 37, 38 ve 39 nolu piyezometreler sürekli artan basınç değerleri göstermektedir. GL4 ve GR4 deki bazı piyezometreler dikkate değer basınç

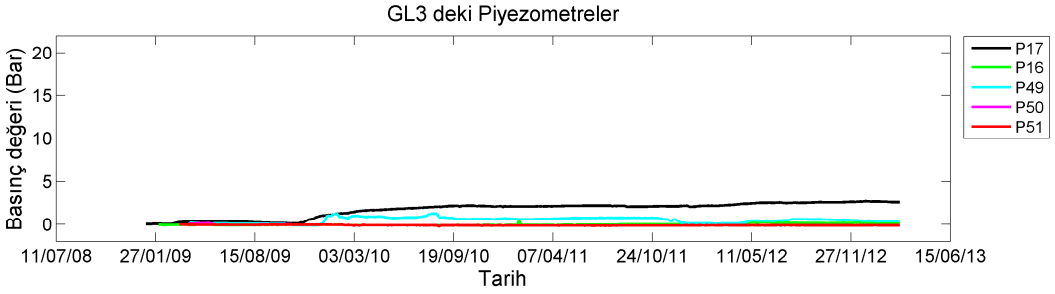
değerleri göstermektedir. Galeri 1 ve 2 deki piyezometreler ise su seviyesi dolayısıyla oldukça küçük değerler göstermektedir.

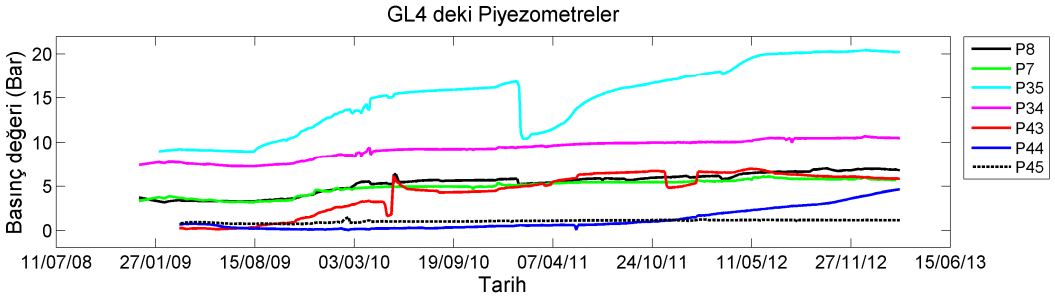


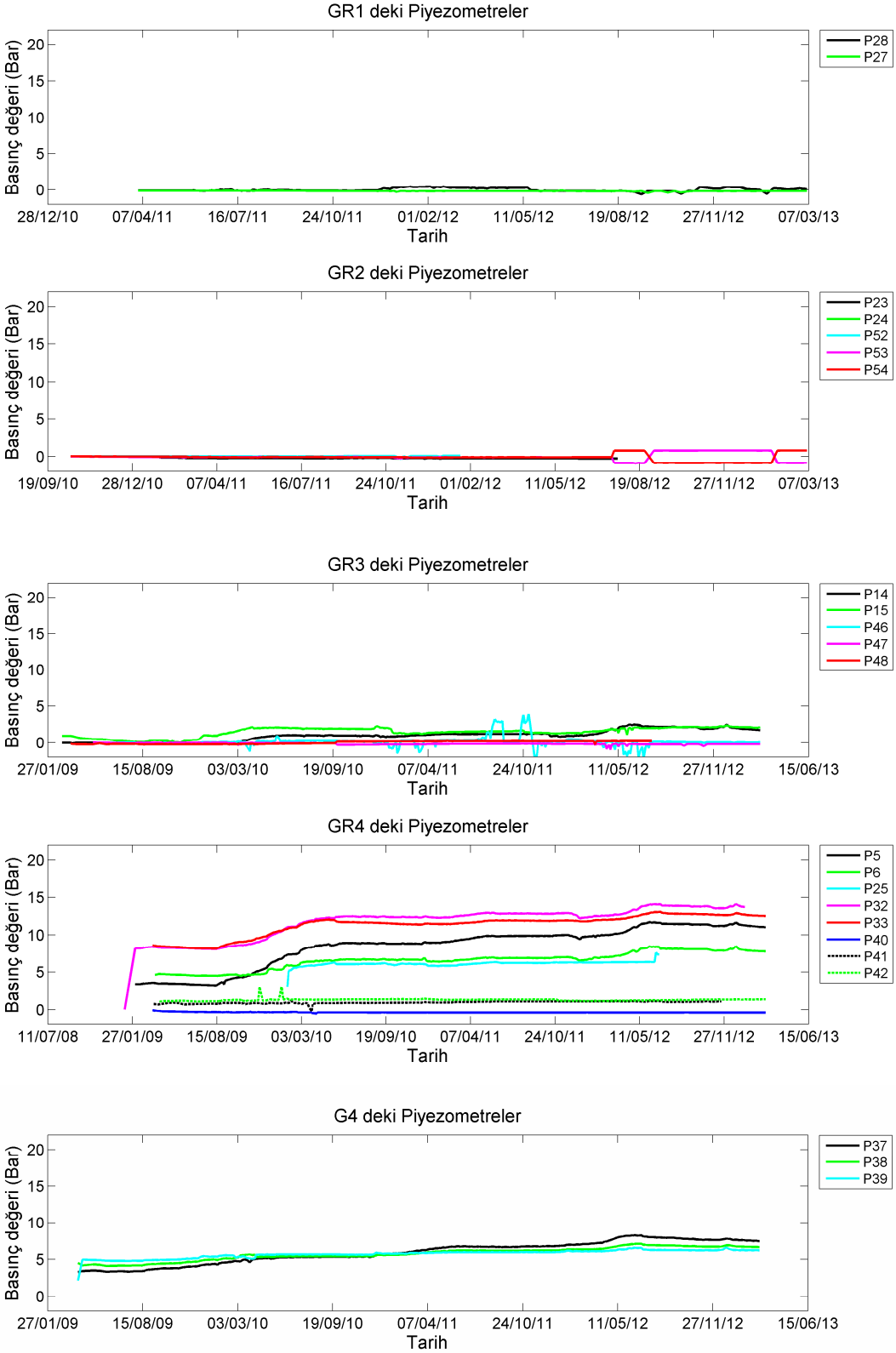
Şekil 5.43. Baraj alanındaki piyezometre kuyularının genel görünümü


GL1 deki Piyezometreler
Basınç değeri (Bar)
20
15
10
5
0
28/12/10
07/04/11
16/07/11
24/10/11
01/02/12
11/05/12
19/08/12
27/11/12
07/03/13
Tarih
P29
P30


GL2 deki Piyezometreler
Basınç değeri (Bar)
20
15
10
5
0
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
P26
P25
P55
P56
P57


GL3 deki Piyezometreler
Basınç değeri (Bar)
20
15
10
5
0
11/07/08
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
P17
P16
P49
P50
P51

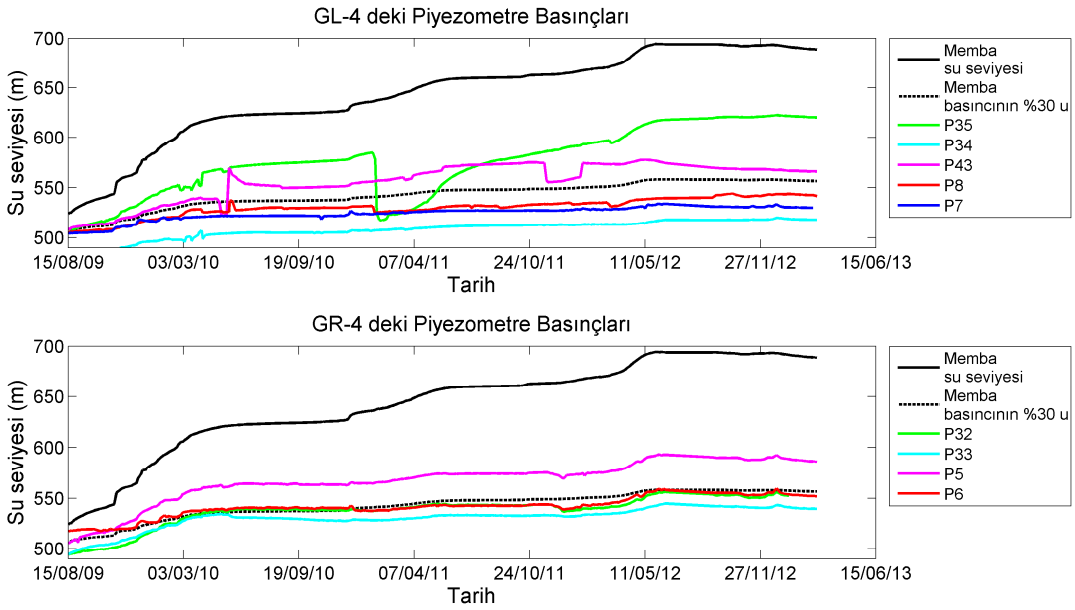

GL4 deki Piyezometreler
Basınç değeri (Bar)
20
15
10
5
0
11/07/08
27/01/09
15/08/09
03/03/10
19/09/10
07/04/11
24/10/11
11/05/12
27/11/12
15/06/13
Tarih
P8
P7
P35
P34
P43
P44
P45



Şekil 5.44. Galerilerdeki boşluk suyu basınç değerlerinin değişimi

Ayrıca yüksek basınç değeri gösteren piyezometrelerin projeye göre tehlikeli boyutlarda olup olmadığı incelenmiştir. Barajın yapısal analizine göre enjeksiyon

perdesinin mansap tarafındaki tahmin edilen yükselme basıncı memba ve mansap temelleri arasındaki su kotu farkının %30 unu geçmemesi gerektiğinden ilgili sınır değeri hesaplanarak, şekil 5.45' de memba basıncının %30' u şeklinde verilmektedir (Kohler ve Mayer, 2009). Buna göre GL4 de bulunan piyezometrelerden P35 ve P43 ile GR4 de bulunan P5 genelde bu sınırın üzerinde yer almaktadır. Piyezometrelerin doğru değerler gösterip göstermediğini belirlemek için piyezometre değerleri ile memba su seviyesi arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanmış ve oldukça yüksek korelasyon değerleri elde edilmiştir (Çizelge 5.7). Bu nedenle sınır değeri üzerinde olduğu belirtilen piyezometrelerin yakın civarlarına sondaj deliklerinin açılarak suyun drene edilmesi basınçların düşürülmesi açısından önemlidir.



Şekil 5.45. Basınç değeri yüksek olan piyezometrelerin su seviyesi ile ilişkisi

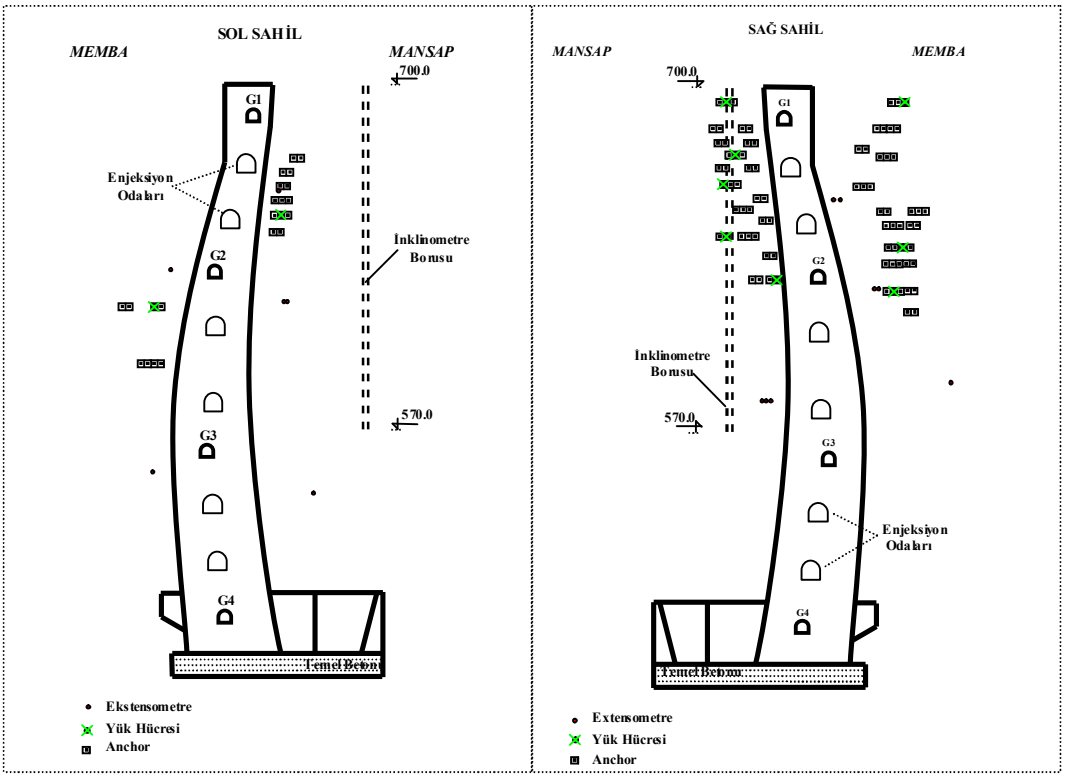
Çizelge 5.7 Piyezometreler ile memba su seviyesi arasındaki korelasyon katsayıları

Galeri GL-4	Korelasyon Kat.	Galeri GR-4	Korelasyon Kat.
P35-Memba su sev.	% 85	P32-Memba su sev.	% 96
P34-Memba su sev.	% 99	P33-Memba su sev.	% 96
P43-Memba su sev.	% 95	P5-Memba su sev.	% 99
P8-Memba su sev.	% 97	P6-Memba su sev.	% 97
P7-Memba su sev.	% 99		

5.2.2.5. Mesnetlerin izlenmesi

Baraj gövdesine yerleştirilen geoteknik ölçme aletlerinin yanı sıra, sağ ve sol mesnetlere de inklinometre, ekstensometre ve yük hücreleri gibi geoteknik ölçme

aletleri yerleştirilmiştir (Şekil 5.46). Yük hücrelerinin belirlediği yük değerleri otomatik olarak toplanırken, ankrajlardaki (anchor) yük değerlerinin belirlenmesi için lift off testlerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 5.46. Sol ve sağ sahile yerleştirilmiş geoteknik ölçme aletleri

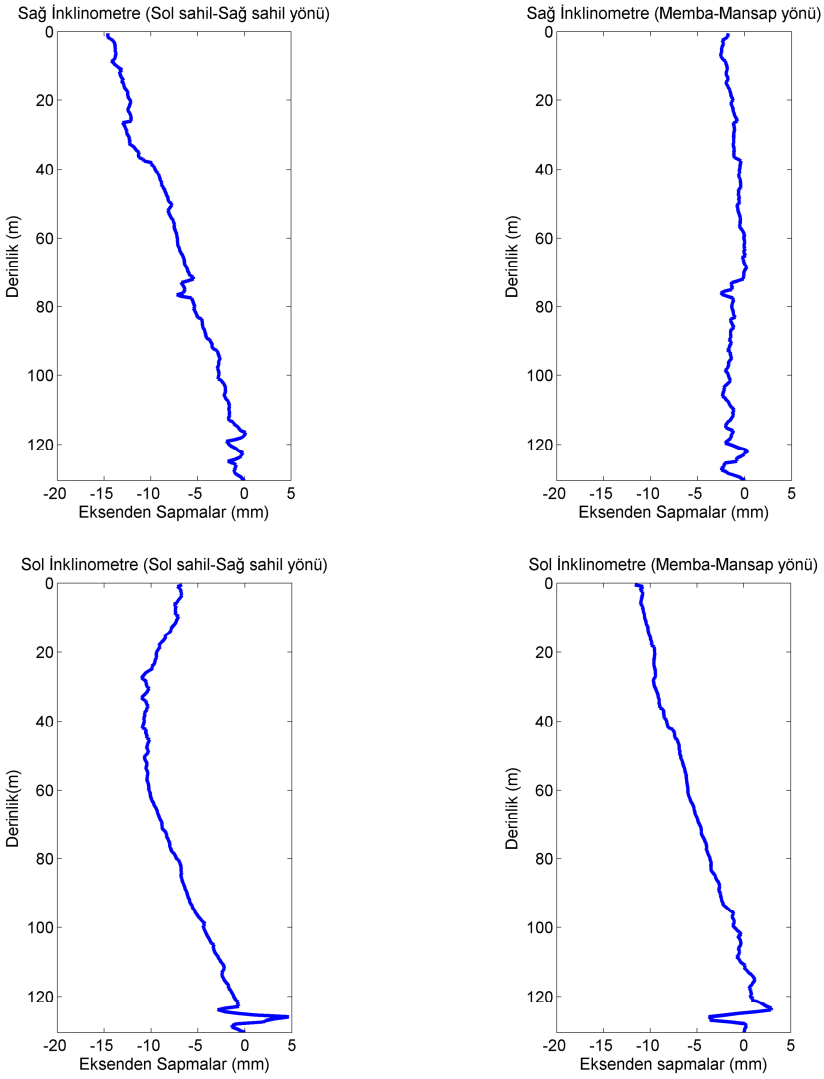
5.2.2.5.1. İnklinometre ölçümleri

Yerleştirildikleri sondaj deliğinin eksenine dik yönde oluşan hareketlerin ölçülmesinde kullanılan inklinometreler ile düşey deliğin iki tarafındaki sapmalar, bu sapmaların yeri, yönü ve büyüklüğü belirlenebilmektedir. Ermenek barajında sağ ve sol mesnette 130 m derinliğindeki sondaj deliklerinde genelde haftada bir olmak üzere inklinometre ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.47). Ölçümlere düzenli olarak Nisan 2011 tarihinde başlamıştır. 07.04.2011-19.07.2012 tarihleri arasında inklinometre kuyusundaki değişimler, yapılan ölçüler sonucunda belirlenerek zeminden itibaren eklenerek artan değişim grafikleri sağ-sol sahil ve memba-mansap yönleri göz önüne alınarak şekil 5.48 de verilmektedir. Sağ sahildeki inklinometre için pozitif değerler memba ve sol sahil hareketini, sol sahildeki inklinometre için ise pozitif değerler mansap ve sağ sahil hareketini işaret etmektedir.



Şekil 5.47 Sol ve sağ sahilde pilyelerin yanına inklinometre ölçümü için açılmış sondaj delikleri

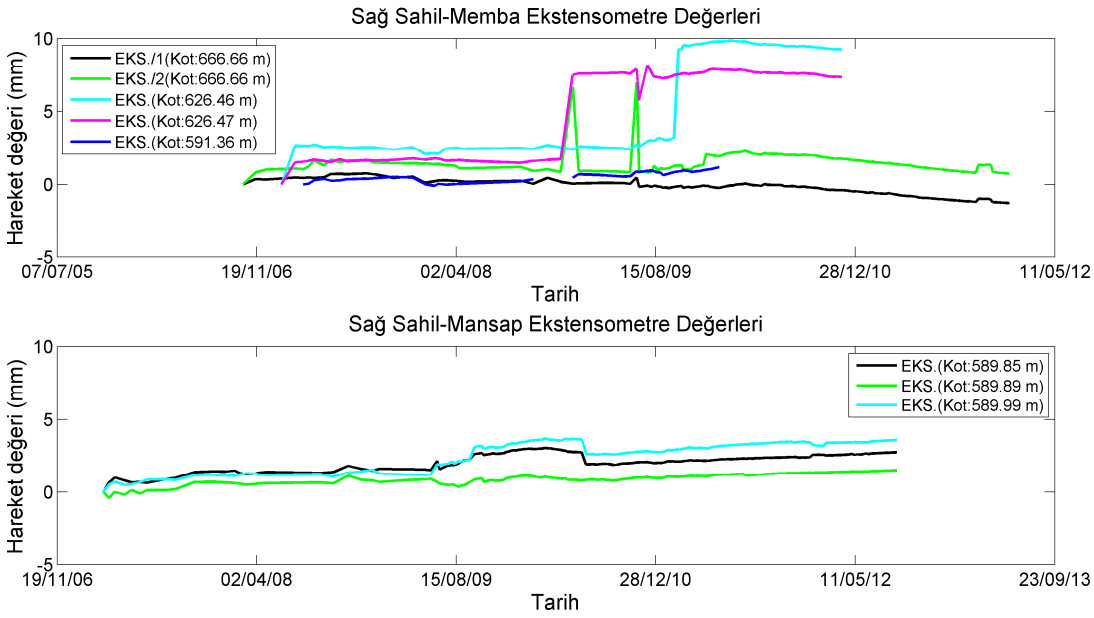
Şekil 5.47' deki sağ inklinometre verileri, sondaj deliğinin üst kısmının yaklaşık 2 mm memba yönünde, 15 mm civarında ise sağ sahil yönünde hareket ettiğini göstermiştir. Sol inklinometre verileri ise sondaj deliğinin üst kısmının yaklaşık 12 mm mansap yönünde, 7 mm ise sol sahil yönünde hareket ettiği tespit edilmiştir.

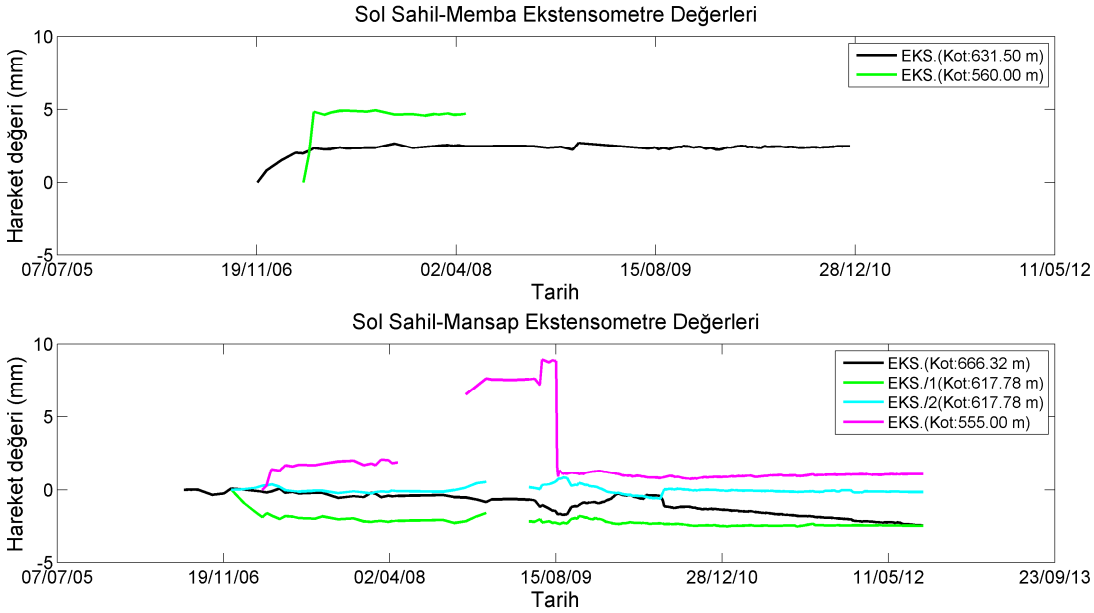


Şekil 5.48. 07.04.2011-19.07.2012 tarihleri arasında sağ ve sol inklinometre kuyularındaki değişimler

5.2.2.5.2. Extensometre ölçümleri

Ermenek barajındaki mesnetlerin izlenmesinde kullanılan bir diğer ölçme aleti ise ± 0.5 mm doğruluğa sahip ekstensometredir (Şekil 5.46). Mesnetlerdeki ekstensometrelerde okumalar manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Memba tarafında olan ektensometreler su yükselişine bağlı olarak su seviyesinin altında kaldıklarından belirli tarihlerden sonra bu ekstensometrelerden ölçü alınamamıştır (Şekil 5.49). Sağ sahil memba tarafındaki ekstensometrelerden 626 kotundaki ekstensometrelerde bir sıçrama olmuş ancak ardından durma eğilimi göstermişlerdir. Benzer durum bu ekstensometrelerin oldukça yakınlarında bulunan 626.1 kotundaki yük hücresinde rastlanmamıştır (Şekil 5.50). Mesnetlerdeki ekstensometre ölçümleri manuel yapıldığı için bu durumun ölçü hatasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmüştür. Sağ sahil mansap tarafında bulunan ekstensometrelerde sürekli artış görülmüştür. Sol sahil mansaptaki ekstensometrelerde ise sıçrama dışında bir hareket söz konusu değildir.

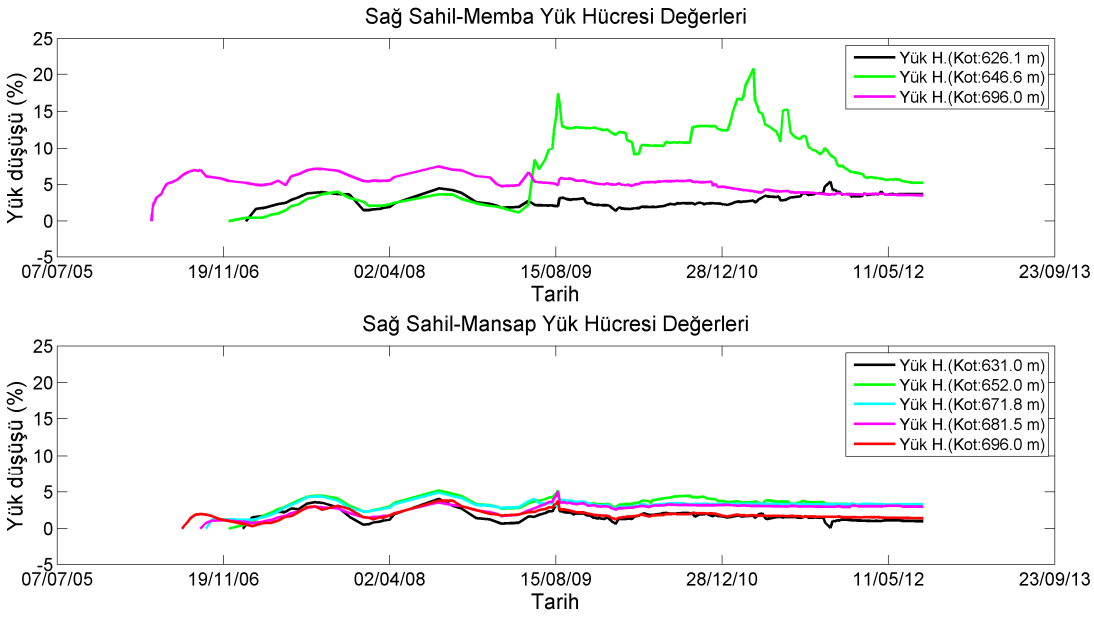




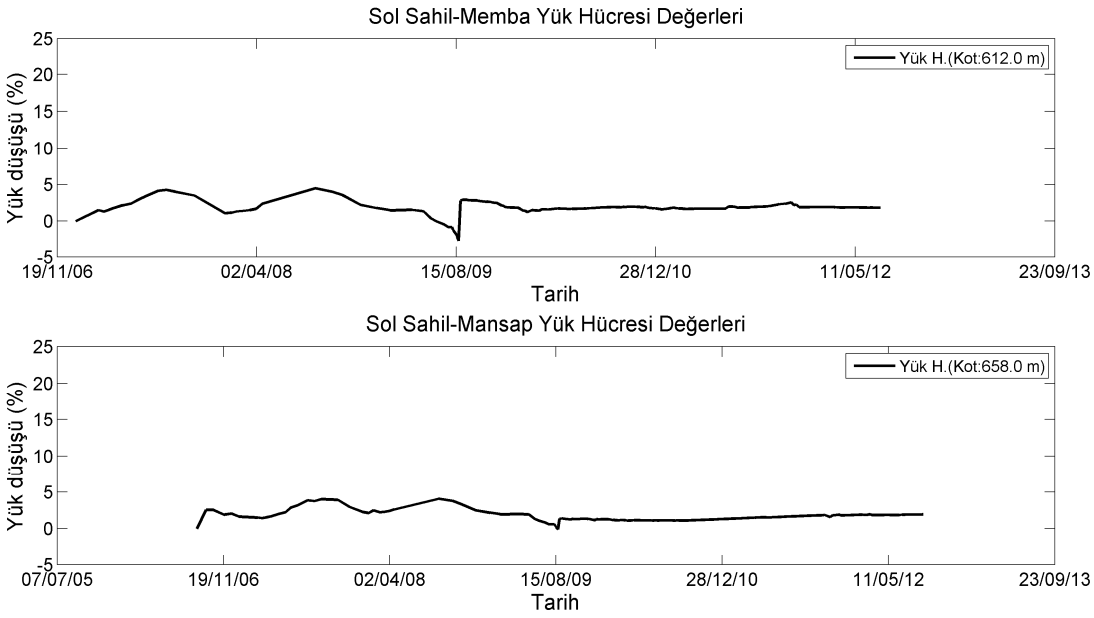
Şekil 5.49. Ekstensometre değerleri

5.2.2.5.3. Yük hücresi ölçümleri

Mesnetlerdeki yük değişimlerini belirlemek amacıyla 8 tanesi sağ sahilde, 2 tanesi de sol sahilde olmak üzere toplam 10 adet yük hücresi kullanılmaktadır (Şekil 5.46). Şekil 5.50 ve şekil 5.51' de sırasıyla sağ ve sol sahil yük hücresi verileri verilmektedir. Diğer yük hücrelerine nazaran 646.6 kotundaki yük hücresinde yük düşüşü ve artışının oldukça fazla olduğu görülmektedir. %17 gibi bir yük düşüşünün ardından, kısmi yük artışları ile bu durum %6 seviyelerine kadar gerilemiştir. Ayrıca yük hücrelerinin sezonluk davranış gösterdiği de tespit edilmiştir.



Şekil 5.50. Sağ sahildeki yük hücresi değerleri



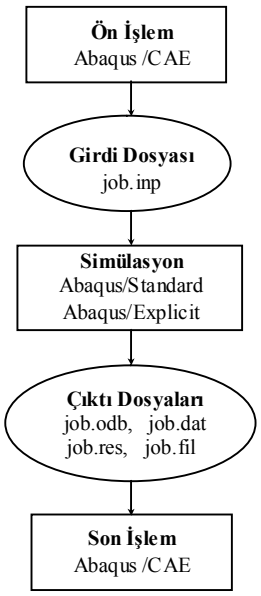
Şekil 5.51. Sol sahildeki yük hücresi değerleri

5.2.2.6. Sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplama

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalarda ABAQUS/CAE yazılımının 6.8-1 versiyonu kullanılmıştır. ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı Hibbitt, Karlsson ve Sorenson tarafından geliştirilmiştir (Rao, 2011). Abaqus' un özellikleri şu şekilde sıralanabilir (URL-3);

- Herhangi bir geometriyi modelleyebilmek için geniş bir eleman kütüphanesine sahiptir.
- Farklı CAD yazılımlarından geometri yüklenebilir.
- Abaqus kullanılarak, metal, beton, kauçuk, toprak, kaya gibi materyallerin davranışlarını temsil edebilmek için farklı materyal modellerinden yararlanılabilir.
- Abaqus lineer ve lineer olmayan uygulamaların simülasyonu için kapsamlı olanaklar sunmaktadır.
- Statik ve dinamik analiz gerçekleştirilebilmektedir.

ABAQUS ile çözümleme ön işlem, simülasyon ve son işlem olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır (Şekil 5.52).

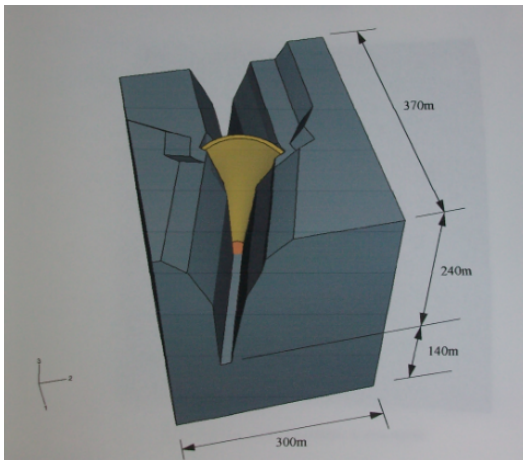


Şekil 5.52. Abaqus yazılımının işlem adımları (URL-3)

Abaqus/CAE ön işleyici Abaqus için uyumlu girdi dosyalarını sağlar. Abaqus/Standard veya Abaqus/Explicit problemlerin çözümü için kullanılır. Abaqus/Standard statik ve çoğunlukla lineer olmayan problemlerde iyidir. Abaqus/Explicit ise dinamik problemlerde kullanılır. Abaqus/Standard ve Abaqus/Explicit 'in her ikisi de Abaqus/CAE altında gerçekleştirilir. Abaqus/CAE son işleyici problemlerin sonuçlarını göstermek için kullanılır (Rao, 2011). Abaqus/CAE, Abaqus/Standard ve Abaqus/Explicit simülasyonundan elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, izlenmesi ve sunulması için uygun bir arayüz sağlar. Abaqus/CAE, modüllere ayrılmıştır ve her bir modül modelleme işleminin mantıksal bir yönünü tanımlar (Rao, 2011).

Bu çalışmada baraj bölgesinin hesaplarında şekil 5.53' deki fiziksel ebatlar dikkate alınmıştır. İki farklı durum dikkate alınmıştır.

- Baraj ve kaya arasında tam bağlanma (bağlı kontak)
- Baraj ve kaya arasında ayrılmaya imkan veren durum (Coulomb kanununa göre, $\varphi=45^{o}$ açık kontak)



Şekil 5.53. Tüm sonlu elemanlar modeli

Model baraj betonu ve çevreleyen kaya kütlesi olmak üzere iki farklı materyal içermektedir. Betonun, sağlam ve zayıf kayaların materyal özellikleri çizelge 5.8 de verilmektedir. Modele göre zayıf kaya, sağ tarafta üst kısımlarda görülmüştür.

Çizelge 5.8 Beton ve kayanın materyal özellikleri

Materyal Özellikleri	**Statik Hesaplama**		
	E	**v**	**ρ**
Beton	23100 MN/m^2	0.18	2.4 t/m^3
Sağlam kaya	10000 MN/m^2	0.30	1*10^{-5} t/m^3
Zayıf kaya	8000 MN/m^2	0.30	1*10^{-5} t/m^3

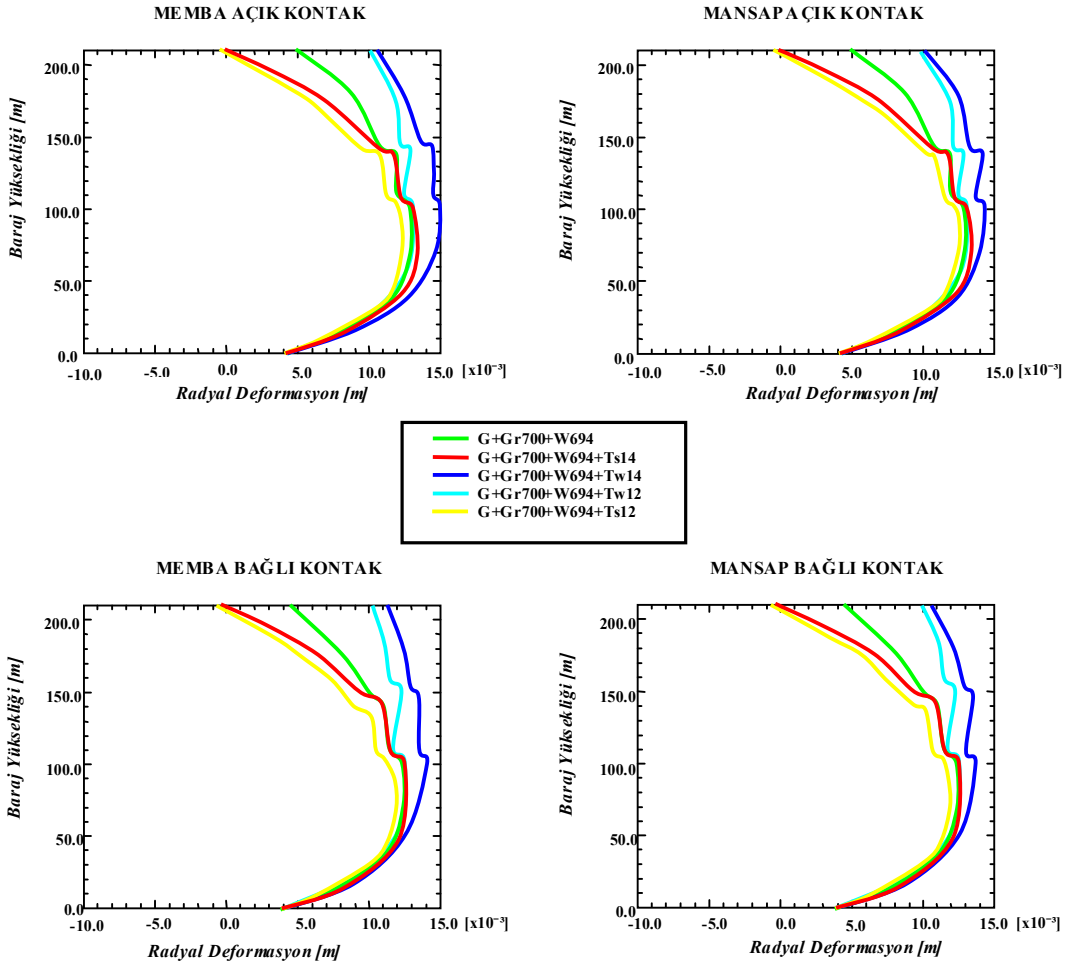
Hesaplamalarda ölü yük, su yükü ve yaz-kış sıcaklık etkileri göz önüne alınmıştır. Projeye göre 300.000 m^3/yıl gibi sedimantasyon oranı verilmektedir. Rezervuarın çok geniş olması ve ölü rezervuarın 2.835*10^{16} m^3 olduğu dikkate alındığında herhangi bir silt basıncı beklenmemektedir. Bu nedenle silt yükü dikkate alınmamıştır. Kaldırma etkisi de direk hesaplamaya dahil edilmemiştir. Ölü yük hesabında her bir elemanın hacmi tespit edilerek, yoğunluk ve yerçekimi vektörüyle çarpılmaktadır. Su yükü hesabında normal su tutma seviyesi (694 m "olağan yük durumu") dikkate alınmış, herhangi bir mansap su seviyesi dikkate alınmamıştır. Sıcaklık etkisi anlamında ise yaz ve kış sıcaklık etkisi dikkate alınmıştır.

Hesaplamalarda teğetsel anlamda önemli bir hareket beklenmediğinden, radyal anlamda beklenen hareketler farklı yük durumları;

- Yerçekimi yüklemesi (G)

- Enjeksiyon kotu (Gr)
- Su yükü (W)
- Yaz ve kış sıcaklıkları (Ts ve Tw)

etkileri göz önüne alınarak hesaplanmıştır (Şekil 5.54).



Şekil. 5.54. Hesaplanan radyal deformasyonlar (Mayer ve Güven, 2012)

Şekil 5.54 de tüm koşullar göz önüne alındığında bile beklenen deformasyon büyüklüğünün 1.5cm nin altında olduğu görülmektedir.

6. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA

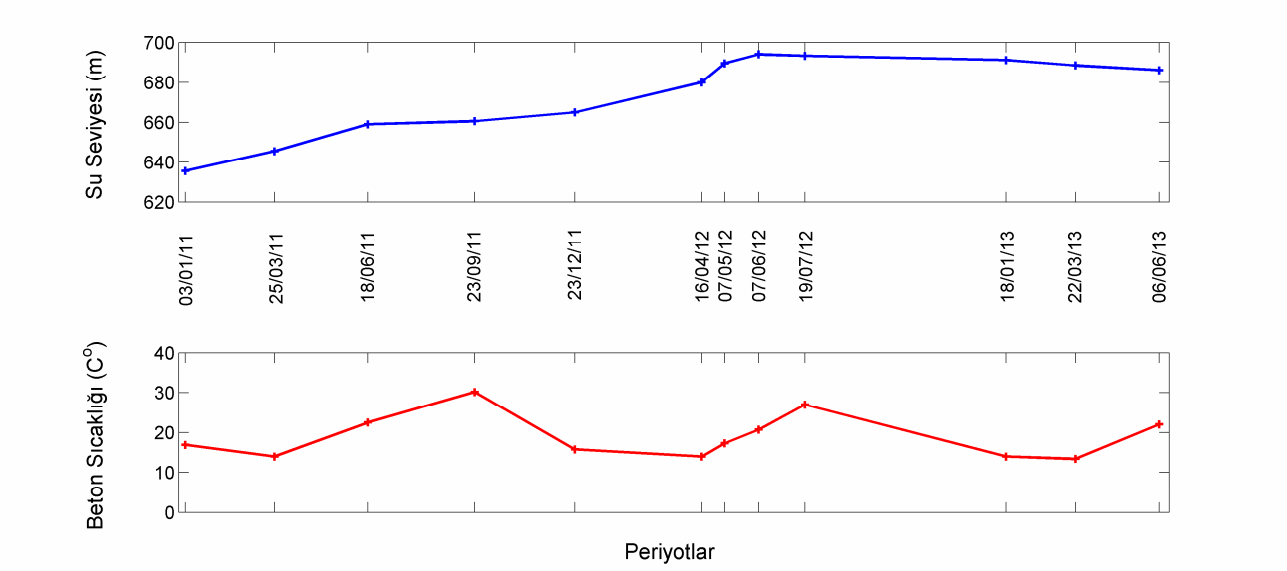
Baraj gövdesinde ve civarında meydana gelen hareketler jeodezik ve geoteknik yöntemlerle elde edilmiş ve bölüm 5 de verilmiştir. Burada ise jeodezik ve geoteknik yöntemlerle belirlenen hareketlerin mevsimsel sıcaklık değişimi ve rezervuar su seviyesi ile ilişkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca;

- Jeodezik veriler ile sarkaç ve klinometre verilerinin uyumluluğu,
- İnklinometre ve jeodezik obje noktalarıyla elde edilen hareketlerin birbirlerini tamamlama durumu,
- Mesnetlerde bulunan yük hücresi ve ekstensometre verilerinin uyumu

araştırılmıştır.

6.1. Jeodezik Yöntemle Belirlenen Radyal Hareketlerin Sıcaklık ve Su Seviyesi ile İlişkisi

Yapısal hareketlerin izlenmesinin yanı sıra, yük-hareket ilişkisinin de incelenebilmesi amacıyla su yüksekliği, sıcaklık gibi çevresel faktörlerin ölçülmesi gerekmektedir. Bu nedenle su yüksekliği ve beton sıcaklık verileri günlük olarak kaydedilmiştir. Periyotlara göre gövdenin 690 m kotundaki teletermometre değerleri ile su seviyesi değerleri şekil 6.1 de verilmiştir.



Şekil 6.1. Periyotlara göre rezervuar su seviyesi ve sıcaklık değerleri

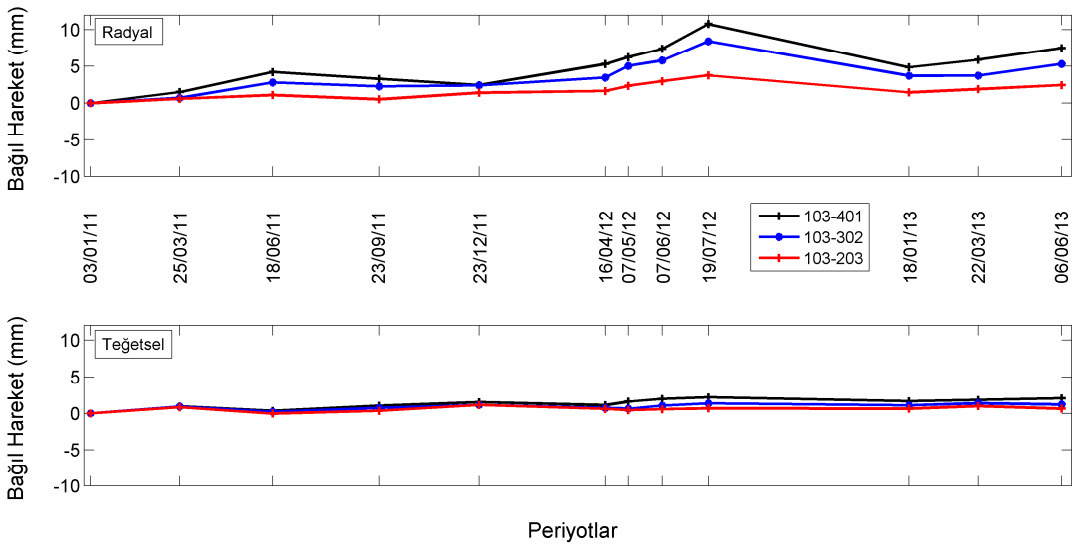
Şekil 6.1 de görüldüğü gibi su seviyesi referans periyodundan 03/01/11, 19.07.12 tarihine kadar 58 m yükselmiştir. Su artışı mevsime bağlı olarak değişmekle birlikte, bu tarihler arasındaki ortalama su artışı yaklaşık 10 cm/gün dür. Beklendiği gibi beton sıcaklıkları mevsimsel salınımlar göstermekte olup, +14 ºC ile +30 ºC arasında değişmiştir.

Şekil 5.12' de görüldüğü gibi mansap tarafındaki en büyük hareket radyal doğrultuda olup, barajın ortasındaki 103 noktasında gerçekleşmiştir. 7.5 mm' ye varan hareketler söz konusudur. Şekil 5.10 - şekil 5.14' de ise mansap noktalarının kesitlere göre hareketleri verilmiştir. Hareketlerin zaman serileri, harmonik (mevsimsel) bir hareketin ve aynı zamanda doğrusal bir trendin varlığını göstermiştir. Salınım hareketi çoğunlukla mevsimsel sıcaklık değişiminden, doğrusal trend ise genelde doğrusal olarak artan su seviyesinden kaynaklanmaktadır. Her ne kadar rezervuar su seviyesi ilk dolum periyodunda çoğunlukla doğrusal da artsa mevsimsel yağış miktarı ile ilişkili olarak az miktarda harmonik salınım da içermektedir. Her bir noktanın salınım bileşeni şekil ve büyüklük bakımından benzer olup, doğrusal bileşenlerin eğim ve büyüklüğü ise yüksekliğe göre değişmektedir. Örneğin doğrusal bileşen 103 nolu nokta için artmakta(pozitif), 401 nolu nokta için ise azalmaktadır (negatif). Bu da barajın üst kısmının mansap doğrultusunda hareket ettiğini, alt kısmın ise memba yönünde hareket ettiğini göstermektedir.

Obje noktalarının hareketleri referans noktalarına göre elde edilmiştir. Bir başka ifade ile obje noktalarının mutlak hareketleri referans noktalarına göre bağımsız olarak elde edilmiştir. Bu hareketlerin sıcaklık ve su seviyesiyle olan ilişkisini belirlemek amacıyla orta kesitte bulunan noktalarda korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre noktaların mutlak hareketleri ile sıcaklık değerleri arasında 103, 203, 302, 401 noktaları için korelasyon katsayıları sırasıyla %91, %91, %74 ve %64 olarak elde edilmiştir. Hareketlerin su seviyesiyle olan ilişkisi incelendiğinde ise 103 ve 203 noktalarındaki mutlak hareketler ile su seviyesi arasında önemli bir korelasyon olmayıp, 302 ve 401 noktalarındaki hareketlerle su seviyesi arasında ise ters korelasyon tespit edilmiş ve korelasyon katsayıları sırasıyla %67 ve %75 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar barajın hareketlerinin büyük oranda sıcaklık değişiminden etkilendiğini göstermiştir.

Mutlak hareketlerin yanı sıra bağıl hareketlerin de sıcaklık ve su seviyesi ile olan ilişkisi incelenmiştir. Bu amaçla 203, 302 ve 401 nolu noktaların 103 noktasına göre bağıl hareketleri belirlenmiştir (Şekil 6.2). Bağıl hareketler ile sıcaklık arasında dikkate

değer bir korelasyon olmayıp, su seviyesiyle arasında ise %87 seviyelerinde korelasyon olduğu tespit edilmiştir.

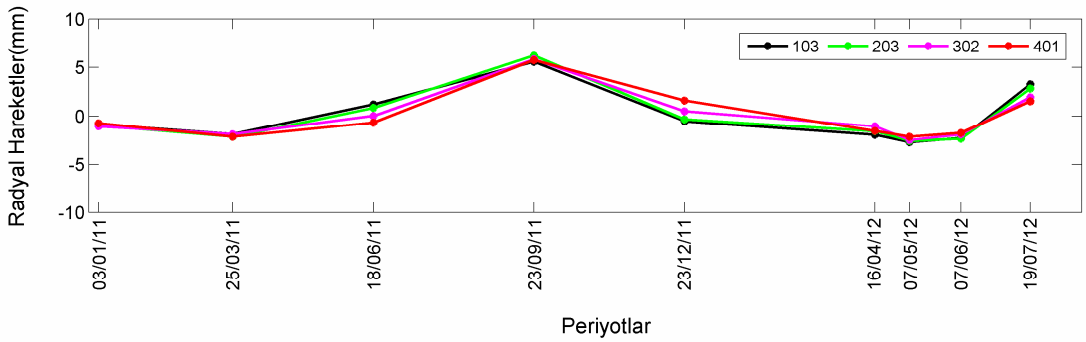


Şekil 6.2. Orta kesitteki noktaların birbirlerine göre bağıl hareketleri

Sıcaklığın etkisi belirtilen noktalarda benzer olduğundan noktaların birbirlerine göre bağıl değişimlerinin belirlenmesi ile sıcaklığın sebep olduğu hareketler büyük oranda elemine edileceğinden, bağıl hareketler çoğunlukla su yükünden dolayı meydana gelen hareketleri içerecektir. Bir sonraki alt bölümde bu durum daha detaylı olarak açıklanacaktır.

6.1.1. Mevsimsel Sıcaklık ve Rezervuar Su Seviyesi Etkilerinin Ayrıştırılması

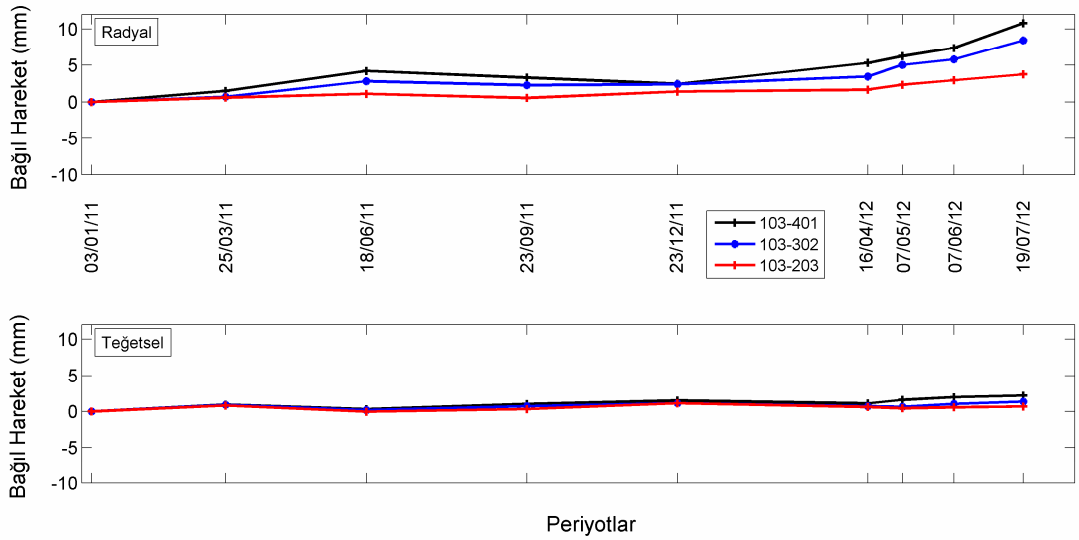
Daha önce de bahsedildiği gibi jeodezik obje noktalarının zamana göre hareketleri incelendiğinde hem doğrusal trend hem de harmonik bileşen mevcuttur. İlk 8 periyot incelendiğinde, baraj su seviyesi maksimum düzeye ulaşıncaya kadar çoğunlukla doğrusal bir artış gösterirken, beton sıcaklığı ise mevsimsel olarak harmonik salınımlar göstermiştir. Su seviyesindeki doğrusal artışın baraj hareketlerini de doğrusal etkileyeceği kabul edilirse, doğrusal trendin ortadan kaldırılması ile barajın mevsimsel sıcaklık değişimine olan cevabı ortaya çıkarılmış olacaktır. Bu yüzden, barajın harmonik hareketini görebilmek için, her bir noktadaki mevcut doğrusal trend bağımsız olarak çıkarılmıştır. Şekil 6.3' de, şekil 5.12 nin 8 periyot için radyal doğrultudaki zaman serilerinin doğrusal trendlerinin yok edilmesinden sonra elde edilen hareketleri görülebilir.



Şekil 6.3. Lineer trendin yok edilmesi ile orta kesitteki noktaların radyal hareketleri

Şekil 6.3' de açıkça görüldüğü gibi farklı yükseklikteki dört noktada küçük farkları (0- 2 mm) göz ardı edersek, mevsimsel sıcaklık değişimine aynı oranda tepki göstermiştir. Trendi etkisi çıkarılmış hareketler ile beton sıcaklığı arasında 103, 203, 302, 401 noktaları için korelasyon katsayıları sırasıyla %91, %93, %90, ve %86 olarak elde edilmiştir. Bu değerler mevsimsel sıcaklık etkisi ile barajın harmonik hareketleri arasında önemli bir ilişkinin olduğunu göstermiştir. Ayrıca verilere göre beton sıcaklığındaki 15 ºC lik bir dalgalanmanın barajda yaklaşık 8 mm lik harmonik bir harekete neden olduğu görülmüştür.

Barajın su yüksekliğine bağlı hareketini belirleyebilmek amacıyla ise 203, 302, 401 noktalarının 103 noktasına göre bağıl hareketleri hesaplanmıştır. Bu dört noktada da sıcaklık nedeniyle oluşan hareketler yaklaşık aynı olduğundan sıcaklığın neden olduğu harmonik hareketler büyük oranda ihmal edilebilir olacaktır. Böylelikle rölatif hareketler büyük oranda su yükü nedeniyle oluşan hareketleri yansıtacaktır (Şekil 6.4).

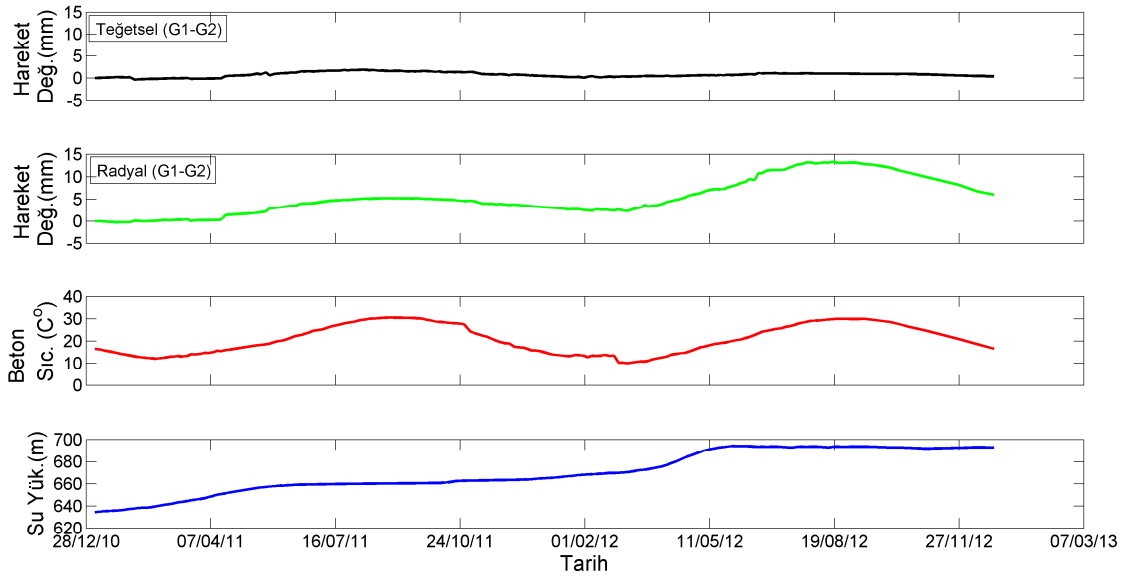


Şekil 6.4. Orta kesitteki noktaların birbirlerine göre bağıl hareketleri

Şekil 6.4' de görüldüğü gibi radyal yöndeki rölatif hareketler, su seviyesindeki değişim ile oldukça benzerdir. (103-401, 103-302, 103-203) için rölatif radyal hareketler ile su seviyesi arasındaki korelasyon katsayıları % 93 seviyelerindedir. 103-401 arasındaki rölatif radyal hareketler su yüksekliğinin maksimum seviyeye ulaşmasıyla 10 mm seviyelerine ulaşmıştır. Bu durum 58 m' lik su yüksekliğinin 103 ve 401 noktaları arasında 10 mm lik rölatif bir harekete neden olduğunu göstermektedir. Beklendiği gibi teğetsel hareketler ile su seviyesi arasında görünen bir korelasyon söz konusu değildir.

6.2. Sarkaç ile Belirlenen Hareketlerin Sıcaklık ve Su Seviyesi ile İlişkisi

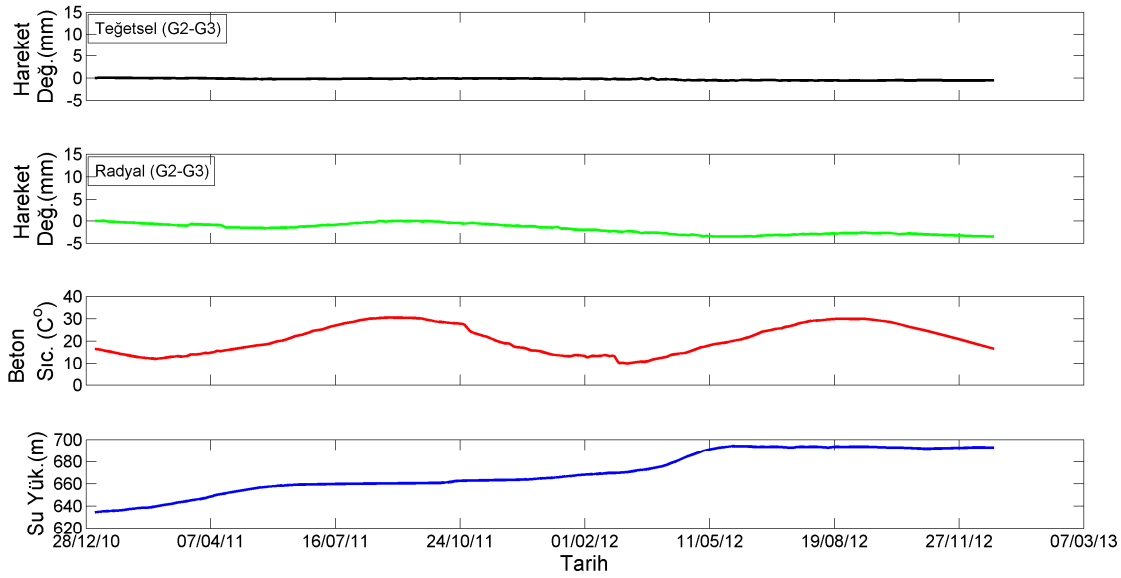
Burada mevsimsel sıcaklık değişiminin ve su seviyesindeki artışın sarkaç verileri ile ilişkisini incelemek için hareketin diğerlerine nazaran daha fazla olduğu G1-G2 (700 m - 630 m) ile G2-G3 (630 m - 565 m) sarkaçları göz önüne alınmıştır. Bu amaçla 03.01.2011 – 25.12.2012 tarihleri arasındaki G1-G2 ve G2-G3 sarkaçlarına ilişkin veriler ile bunlara karşılık gelen sıcaklık ve su seviyesi verileri sırasıyla şekil 6.5 ve 6.6 da verilmiştir.



Şekil 6.5. G1-G2 sarkaç verileri ile aynı tarihlerdeki sıcaklık ve su seviyesi verileri

Şekil 6.5 de görüldüğü gibi radyal hareketler -0.2 mm ile 13.1 mm arasında değerler almaktadır. Teğetsel hareketler ise -0.4 mm ile 1.9 mm arasındadır. Radyal hareketler ile beton sıcaklığı arasında benzer bir salınım olmasına rağmen, %67

seviyesinde bir korelasyon söz konusudur. Ancak su seviyesi ile arasındaki korelasyon % 88 dir. Buna göre barajın 700 kotu 630 kotuna göre mansap hareketi göstermektedir. Beklendiği gibi teğetsel hareketler ile su seviyesi arasında görünen bir korelasyon söz konusu değildir.



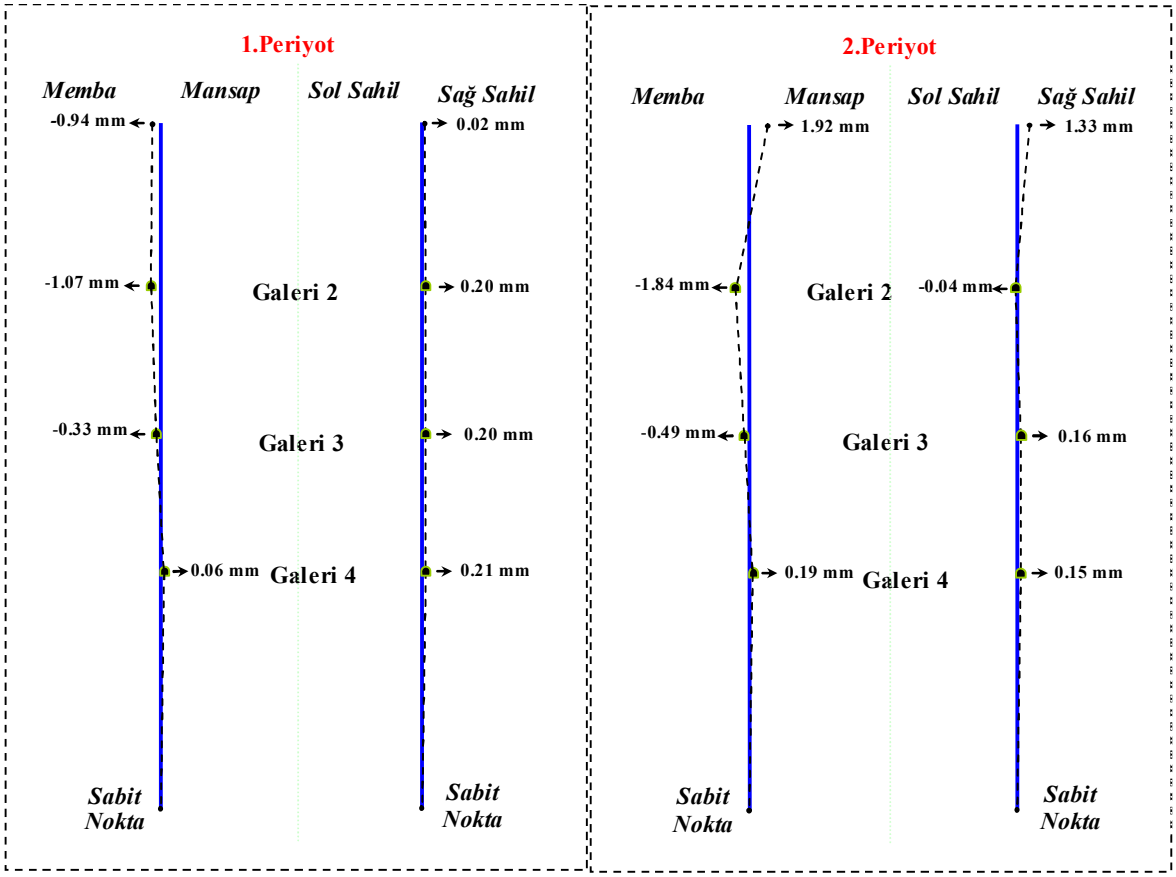
Şekil 6.6. G2-G3 sarkaç verileri ile aynı tarihlerdeki sıcaklık ve su seviyesi verileri

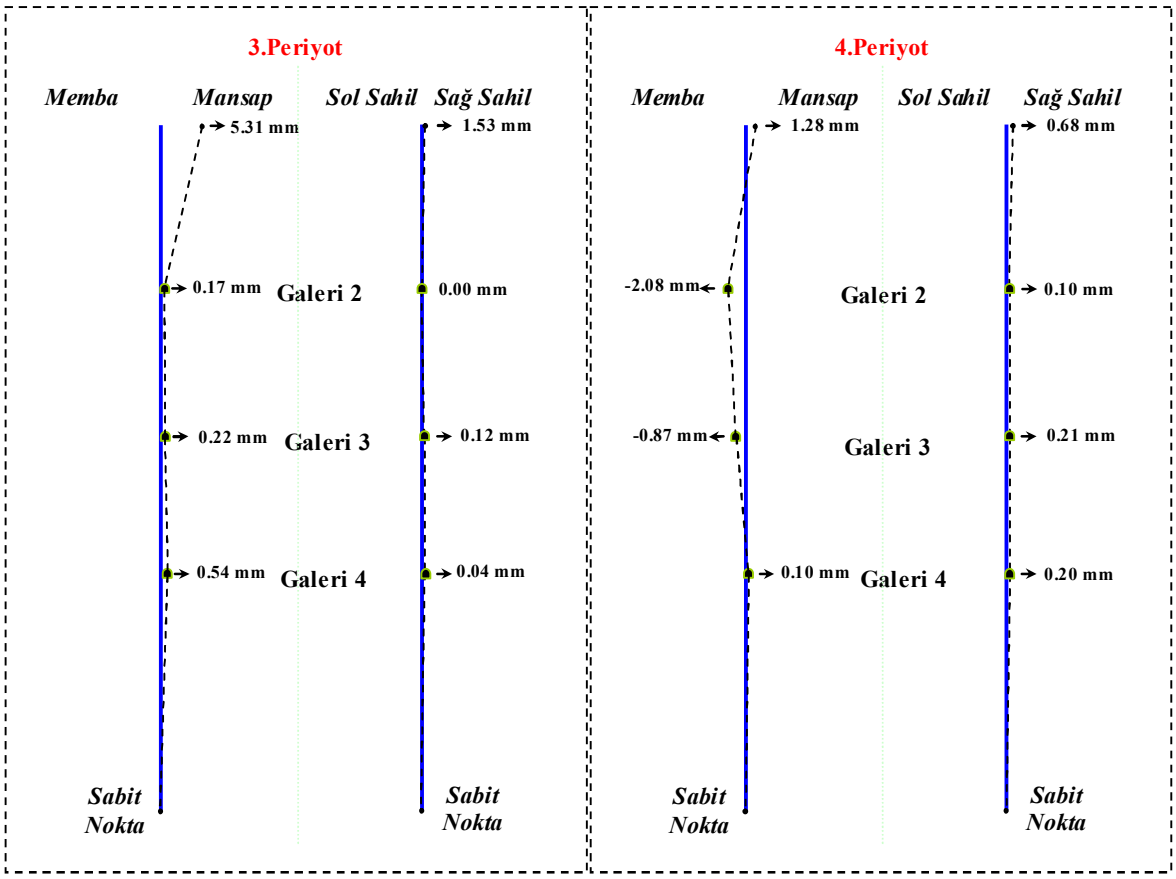
G2-G3 arasındaki sarkaç hareketleri üstteki sarkaca nazaran küçük olup, teğetsel yönde -0.6 mm ile 0.1 mm arasında, radyal yönde ise -3.5 - 0 mm arasındadır. Radyal hareketler ile beton sıcaklığı arasında ciddi bir korelasyon olmayıp (% 9), su seviyesi ile % 87 ters korelasyon söz konusudur. Buna göre G2 (630 m) G3 (565 m) 'e nazaran memba hareketi göstermiştir.

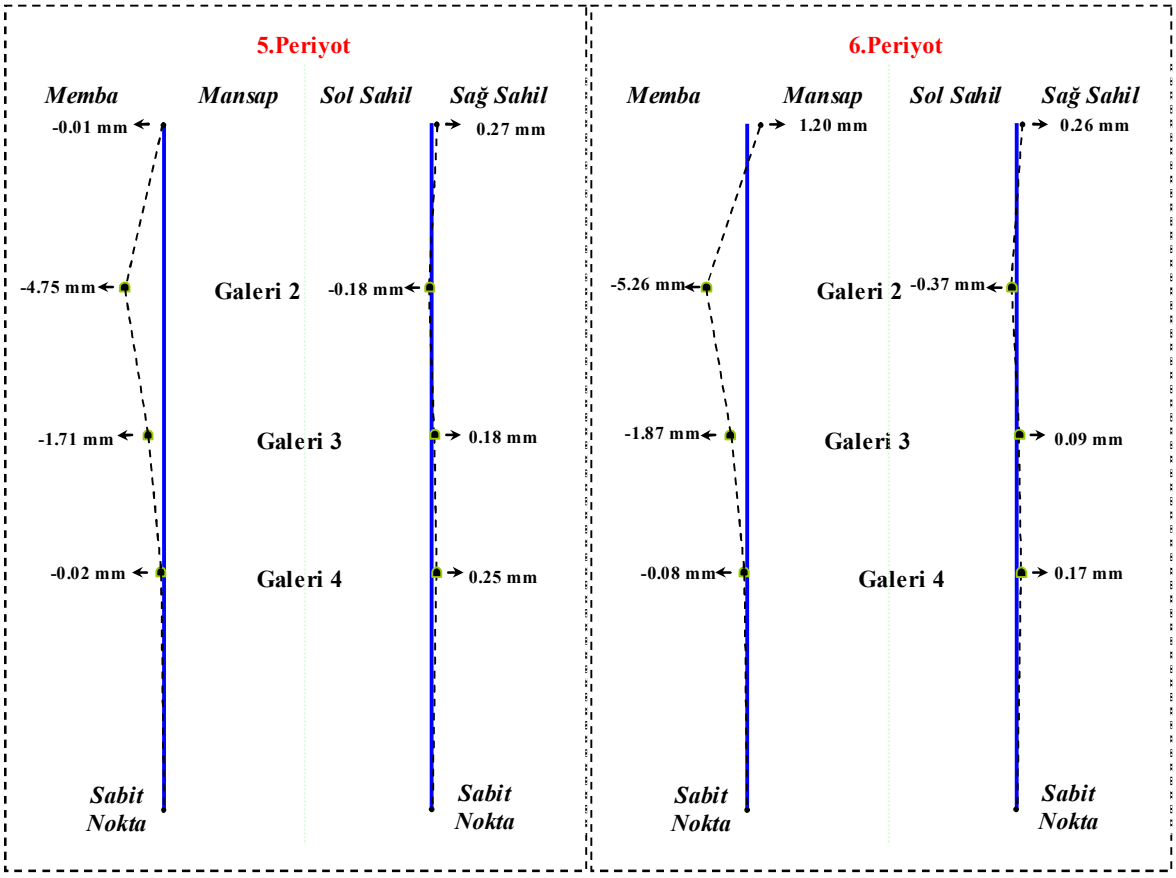
6.3. Sarkaç, Klinometre ve Jeodezik Ölçülerin Karşılaştırılması

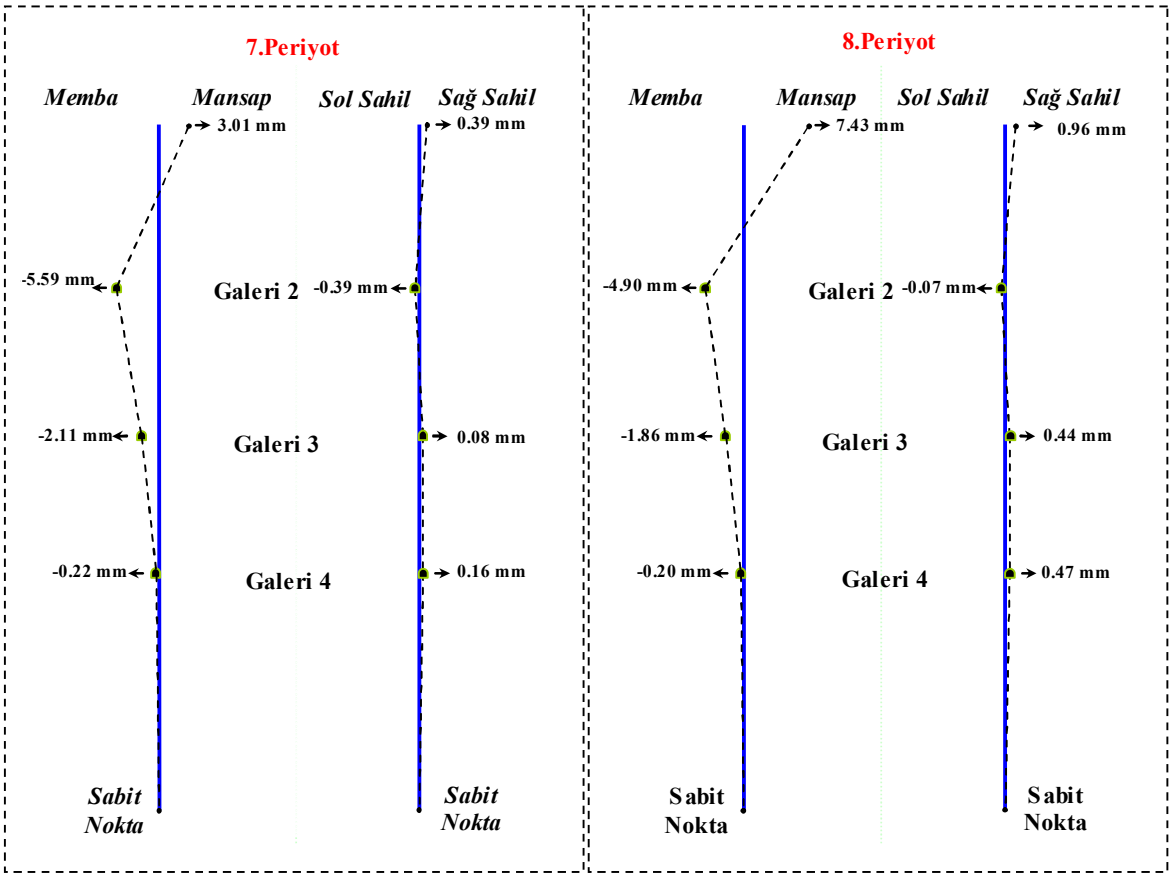
Sarkaç verileri ile jeodezik verileri doğrudan karşılaştırmak pek mümkün değildir. Çünkü jeodezik yöntemlerle mutlak hareketler, sarkaç ölçümleriyle ise rölatif hareketler belirlenmektedir. Sarkaç hareketleri baraj zemininden yaklaşık 100 m aşağıda bulunan sarkaç telinin uç noktası (400 m) baz alınarak belirlendiği için bu noktanın sabit kabul edilmesiyle elde edilen hareketlerin büyüklük ve yön anlamında jeodezik sonuçlarla karşılaştırılabileceği düşünülmüştür. Ayrıca sarkaç verileri ile jeodezik verilerin karşılaştırılabilmesi için zaman dilimleri olarak jeodezik ölçü periyotları göz önüne alınmıştır. Jeodezik obje noktalarından orta kesitte yer alan memba tarafındaki

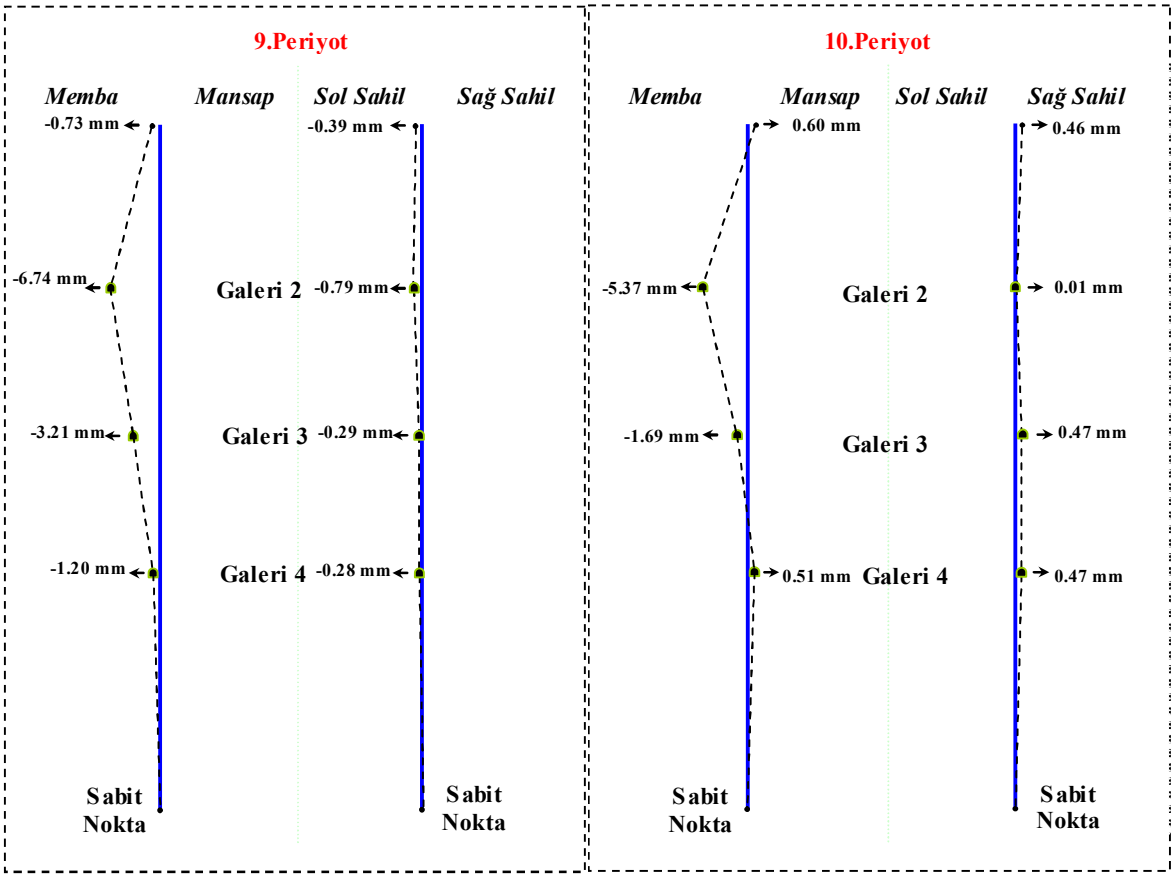
503 ve 603 numaralı obje noktaları ile mansap tarafındaki 103, 203, 302, ve 401 numaralı obje noktaları sarkacın tesis edildiği düşey eksen boyunca olmasından dolayı karşılaştırmada kullanılmıştır. İlgili tarihlerde baraj gövdesinin hareketini temsil eden sarkaç hareketleri ters sarkacın sabit ucu (400 m) baz alınarak rölatif hareketlerin belirlenmesi şeklinde olmuştur. Sarkaç verilerine göre barajın hareketi şekil 6.7' de, jeodezik obje noktalardaki hareketler ile birlikte sarkaç verilerine göre barajın en üst noktasındaki hareketler ise şekil 6.8 ve şekil 6.9' da verilmiştir.

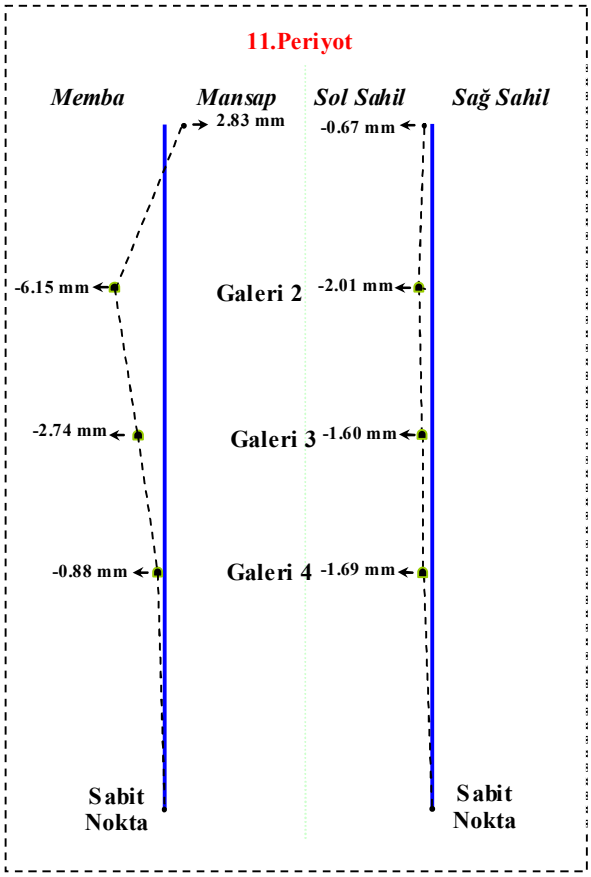



3.Periyot
Memba
Mansap
Sol Sahil
Sağ Sahil
5.31 mm
1.53 mm
0.17 mm
Galeri 2
0.00 mm
0.22 mm
Galeri 3
0.12 mm
0.54 mm
Galeri 4
0.04 mm
Sabit Nokta
Sabit Nokta
4.Periyot
Memba
Mansap
Sol Sahil
Sağ Sahil
1.28 mm
0.68 mm
-2.08 mm
Galeri 2
0.10 mm
-0.87 mm
Galeri 3
0.21 mm
0.10 mm
Galeri 4
0.20 mm
Sabit Nokta
Sabit Nokta


5.Periyot
Memba
Mansap
Sol Sahil
Sağ Sahil
-0.01 mm
0.27 mm
-4.75 mm
Galeri 2
-0.18 mm
-1.71 mm
Galeri 3
0.18 mm
-0.02 mm
Galeri 4
0.25 mm
Sabit Nokta
Sabit Nokta
6.Periyot
Memba
Mansap
Sol Sahil
Sağ Sahil
1.20 mm
0.26 mm
-5.26 mm
Galeri 2
-0.37 mm
-1.87 mm
Galeri 3
0.09 mm
-0.08 mm
Galeri 4
0.17 mm
Sabit Nokta
Sabit Nokta

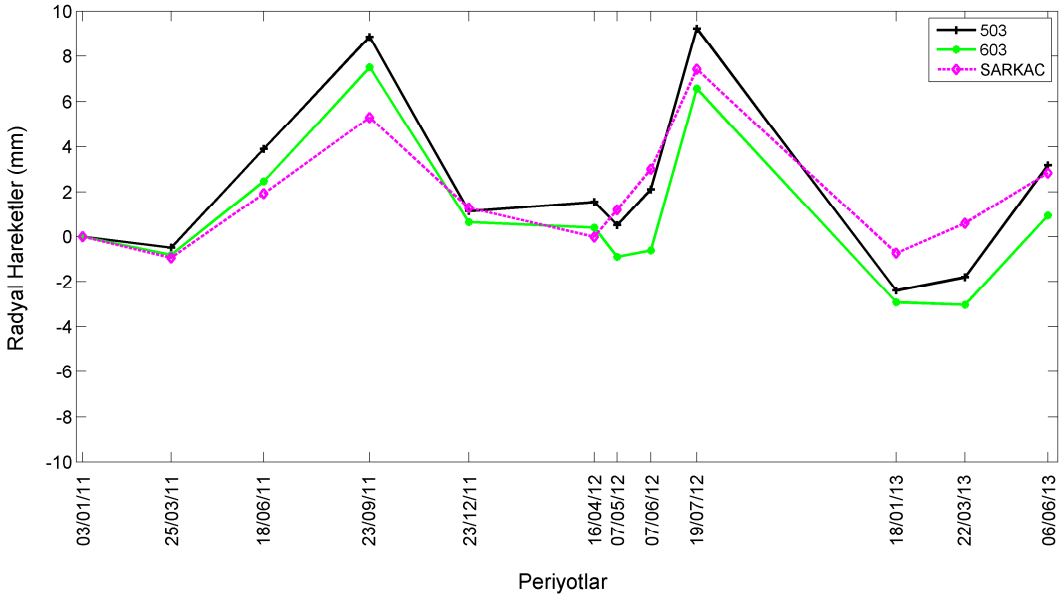

7.Periyot
Memba
Mansap
Sol Sahil
Sağ Sahil
3.01 mm
0.39 mm
-5.59 mm
Galeri 2
-0.39 mm
-2.11 mm
Galeri 3
0.08 mm
-0.22 mm
Galeri 4
0.16 mm
Sabit Nokta
Sabit Nokta
8.Periyot
Memba
Mansap
Sol Sahil
Sağ Sahil
7.43 mm
0.96 mm
-4.90 mm
Galeri 2
-0.07 mm
-1.86 mm
Galeri 3
0.44 mm
-0.20 mm
Galeri 4
0.47 mm
Sabit Nokta
Sabit Nokta


9.Periyot
Memba
Mansap
Sol Sahil
Sağ Sahil
-0.73 mm
-0.39 mm
-6.74 mm
Galeri 2
-0.79 mm
-3.21 mm
Galeri 3
-0.29 mm
-1.20 mm
Galeri 4
-0.28 mm
Sabit Nokta
Sabit Nokta
10.Periyot
Memba
Mansap
Sol Sahil
Sağ Sahil
0.60 mm
0.46 mm
-5.37 mm
Galeri 2
0.01 mm
-1.69 mm
Galeri 3
0.47 mm
0.51 mm
Galeri 4
0.47 mm
Sabit Nokta
Sabit Nokta

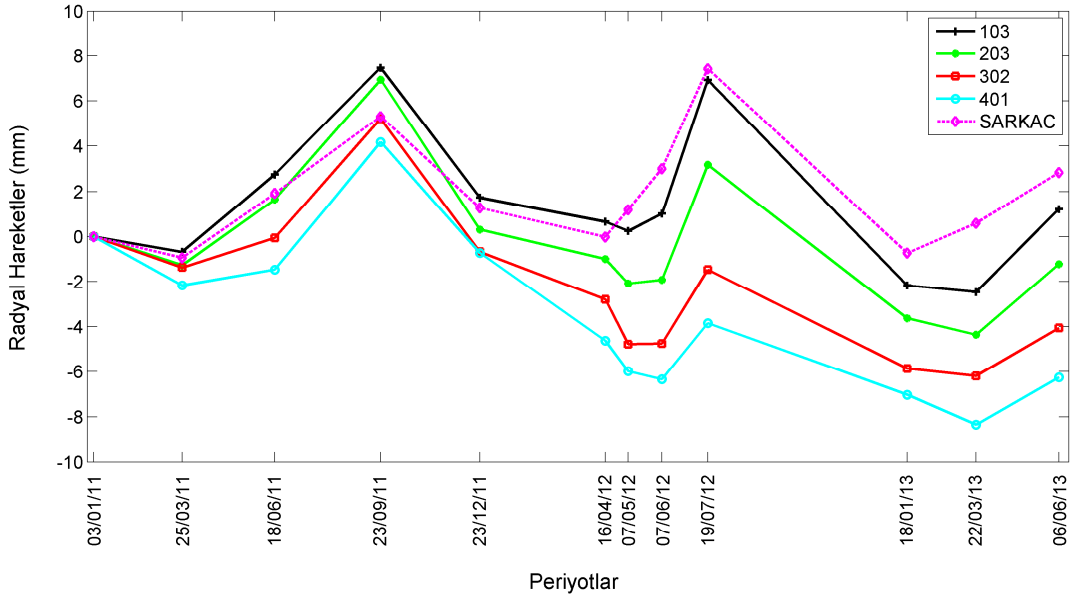


Şekil 6.7. Periyotlara göre sarkaç hareketleri

Sarkacın üst noktasına yakın olan 503 numaralı obje noktası ile sarkaç hareketleri karşılaştırıldığında memba-mansap yönünde 6. periyot hariç baraj hareketlerinin benzer ve uyumlu olduğu, 1-2 mm mertebesinde oluşan farkların ise ölçü hassasiyetlerinden ve sarkacın sabit kabul edilen ucundaki muhtemel hareketlerinden kaynaklandığı söylenebilir (Şekil 6.8). Ayrıca 503-603 ve 103-203-302-401 noktaların birbirlerine göre rölatif hareketlerine bakıldığında üstteki noktaların alttaki noktalara nazaran mansap hareketi gösterdiği ve bu durumun sarkaç değerleriyle uyumluğu olduğu söylenebilir. Barajın sol-sağ sahil yönünde anlamlı bir hareketi olmadığı için bu yöne ilişkin her hangi bir karşılaştırma sonucu burada verilmemiştir.



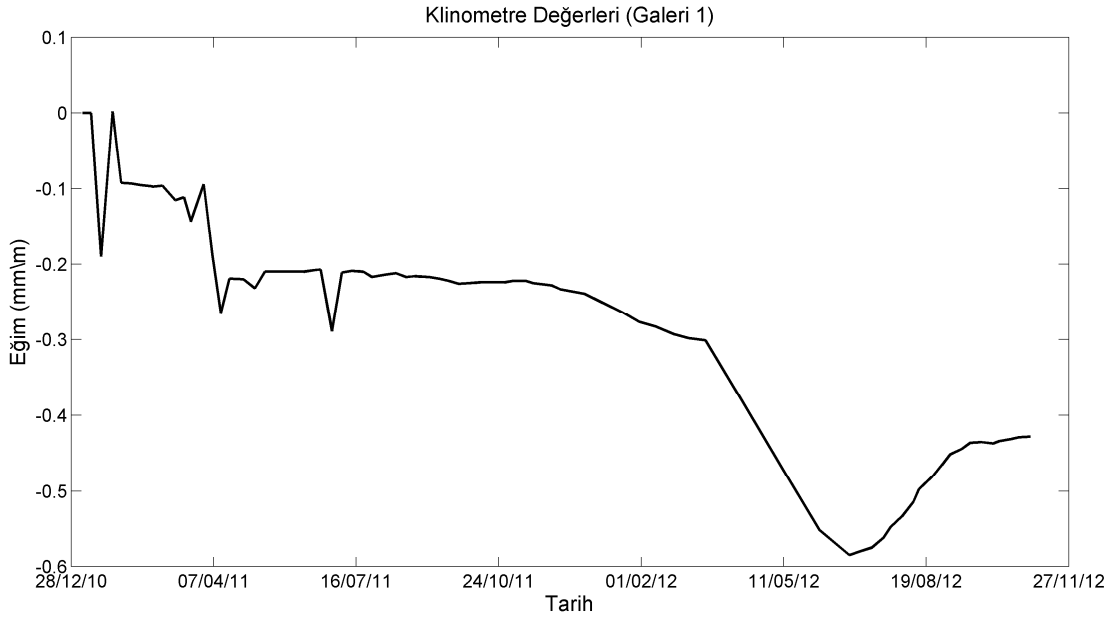
Şekil 6.8. Memba tarafındaki obje noktalarının hareketleri



Şekil 6.9. Mansap tarafındaki obje noktalarının hareketleri

Sarkaç ve jeodezik veriler oldukça uyumlu olmasına rağmen manuel olarak okuması gerçekleştirilen 1 m uzunluğundaki klinometreden beklenen sonuçlar elde edilememiştir. Yukarıda belirtilen tarih aralıkları göz önüne alınarak elde edilen klinometre verilerine göre klinometrenin üst kısmı alt kısma göre genelde memba hareketi gösterdiği, Temmuz 2012 ile Kasım 2012 tarihleri arasında ise mansap hareketi gösterdiği görülmektedir (Şekil 6.10). Klinometrenin boyunun 1m olduğu

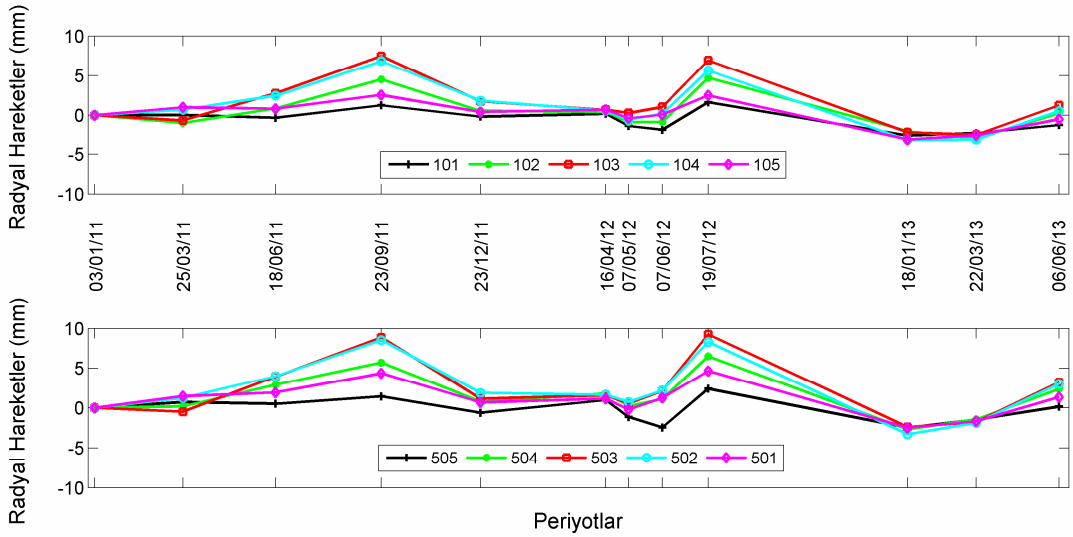
düşünüldüğünde elde edilen maksimum 0.58 mm lik hareketin lokal bir hareket olduğu sonucuna varılabilir. Çünkü bu hareket sarkaç uzunluğu ile düşünüldüğünde (70 m) yaklaşık 40 mm' lik bir harekete karşılık gelmektedir. Bu pek de mantıklı görünmemektedir. Elde edilen sonuçlar, klinometre boyunun oldukça kısa olması nedeni ile sarkaç veya jeodezik veriler ile doğrudan karşılaştırılmasının anlamlı olmadığını göstermiştir.



Şekil 6.10. Galeri 1' deki klinometre verileri ("-" üst kısmın alt tarafa göre memba hareketi)

6.4. Kret Üzerindeki Memba ve Mansap Obje Noktalarının Karşılaştırılması

Bu bölümde kret üzerinde bulunan memba ve mansap noktalarının hareket değerlerinin birbirleriyle uyumlu olup olmadığı incelenmiştir. Şekil 6.11' de noktalara ilişkin radyal hareketler verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi memba ve mansap noktalarının hareketleri birbirleriyle oldukça tutarlıdır. Aralarında maksimum 1 mm lik fark bulunmaktadır. Bu fark muhtemelen farklı gözlem planından ve rastgele hatalardan kaynaklanmaktadır. Barajın her iki tarafında obje noktasının seçilmesi, daha sonraki çalışmalarda noktalardan birinde hasar olması durumunda diğeri ile analizlerin sürekliliğinin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.



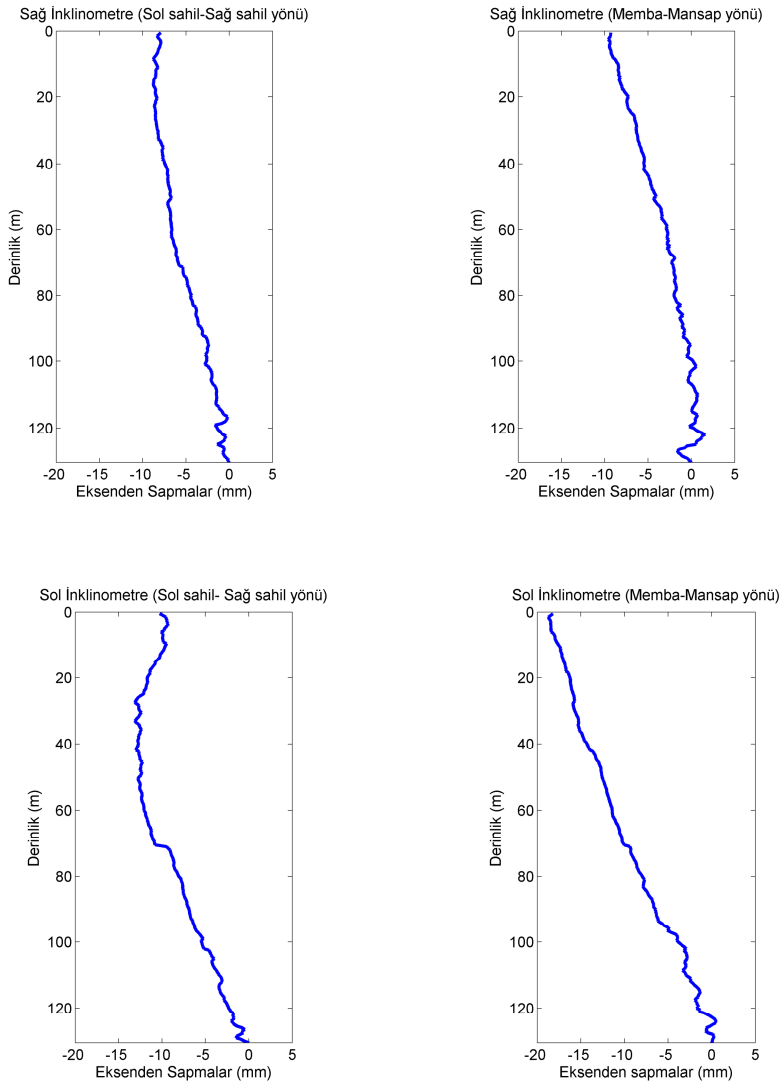
Şekil 6.11. Memba ve mansap tarafındaki noktaların radyal hareketleri

6.5. İnklinometre Kuyularındaki Hareketlerin Jeodezik Noktalara Dayalı Olarak Yorumlanması

5. bölümde de bahsedildiği gibi mesnetlerde bulunan inklinometre sondaj deliklerinin hemen yakınına pilye şeklinde obje noktaları tesis edilmiştir. İnklinometre ile elde edilen hareketler rölatif hareketler olduğundan sondaj deliğinin tabanı baz alınarak elde edilen en üst taraftaki hareket, tabandaki muhtemel hareketler nedeniyle gerçek durumu yansıtmamaktadır. İnklinometre sondaj deliğinin üst kısmındaki mutlak hareketin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Ermenek barajında inklinometre sondaj deliklerinin hemen yakınında bulunan 4 ve 10 numaralı obje noktalarından yararlanılmıştır (Çizelge 6.1). 07.04.2011 – 07.06.2012 tarihleri arasında oluşan hareketler incelenmiştir. Noktadaki hareketlere göre, sol sahildeki noktada (4) 0.4 mm mansap, sağ sahildeki noktada (10) ise 1.5 mm lik mansap ve 1.3 mm sol sahil hareketi görülmektedir. İnklinometre verilerine göre ise üst noktalarda çok daha büyük değerler elde edilmiştir(kuyu tabanı sabit alınarak) (Şekil 6.12). İki yöntem birlikte düşünüldüğünde, hareketlerin sondaj deliğinin üst kısmında değil de alt kısmında olduğu jeodezik noktalara göre belirlenmiştir. Bu durum iki yöntemin birlikte kullanılmasının önemini bir kez daha göstermiştir.

Çizelge 6.1 4 ve 10 numaralı obje noktalarını hareketleri

N.N	dx(mm)	dy(mm)
4	0.0	0.4
10	1.3	1.5

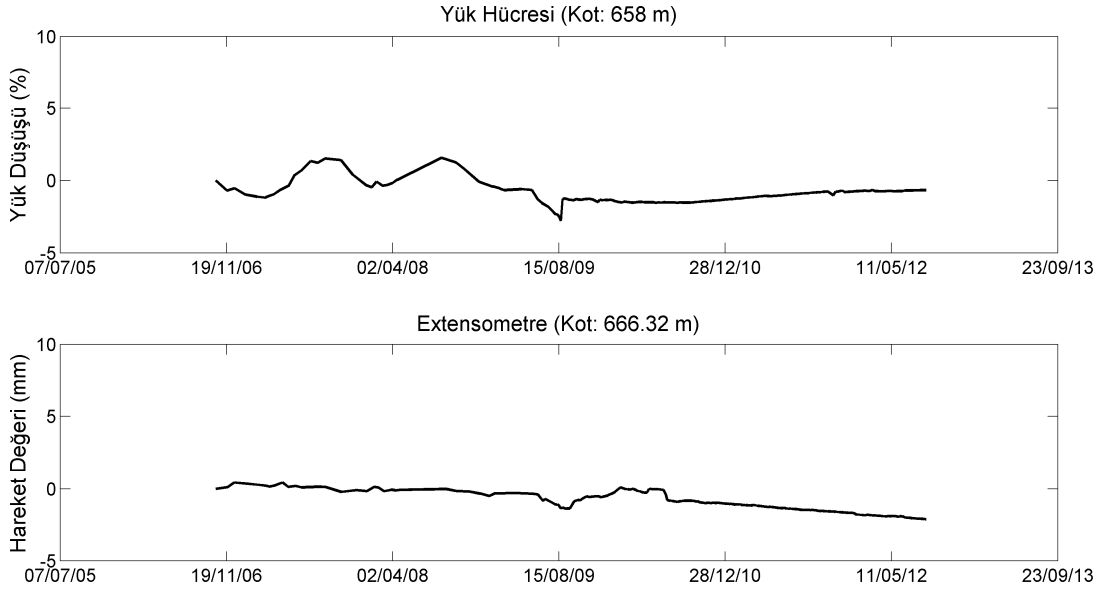


Şekil 6.12. 07.04.2011-07.06.2012 tarihleri arasında sağ ve sol inklinometre kuyularındaki değişimler

6.6. Ekstensometre ve Yük Hücresi Verilerinin Karşılaştırılması

Mesnetlerdeki hareketler izlenirken kullanılan ekstensometre ve yük hücresi verileri birlikte ele alınması doğru yorumlama açısından oldukça önemlidir. Ermenek barajında, sağ ve sol mesnetlerdeki ekstensometre ve yük hücresi verileri Bölüm 5' de detaylı olarak verilmiştir. Burada ise ekstensometre ve yük hücresi verilerinin tutarlı olup olmadığı incelenmiştir. Birbirlerine yakın sağ ve sol mesnetlerde birer yük hücresi ve ekstensometre bulunmaktadır. Ancak sağ sahildekiler memba tarafında olduğundan ekstensometre verileri su yüksekliğine bağlı olarak belirli tarihten itibaren

alınamamıştır. Bu nedenle sol sahilde bulunan 666.32 kotundaki ekstensometre ile 658 kotundaki yük hücresi verileri göz önüne alınmıştır (Şekil 6.13). Aynı zaman dilimi dikkate alınmıştır. Şekil 6.13' de de görüldüğü gibi Ağustos 2009 tarihine kadar yük hücresinde salınımlar oluşmuştur. Bu tarihten sonra ise daha düzenli hareketler oluşmuştur. Haziran 2010 tarihinden itibaren ekstensomete ve yük hücresi verileri uyumlu bir davranış göstermektedir. Ekstensometre kısalma hareketi göstermekte olup, yük hücresinde ise benzer şekilde yük düşüşünde artış yaşanmaktadır. Böylece ekstensometre ve yük hücresi verilerinin birbirlerini test edebildiği ve doğruladığı görülmüştür.



Şekil 6.13. Mesnetteki ekstensometre ve yük hücresi verileri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye'nin en yüksek ikinci barajı olan Ermenek beton kemer barajında yapılan deformasyon izleme çalışmaları ve kullanılan yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Deformasyonların izlenmesi amacıyla jeodezik ve geoteknik yöntemlerden yararlanılmıştır. Jeodezik yöntemlerle yapılan çalışmalar Ocak 2011 tarihinde başlamış olup, oluşturulan mikrojeodezik ve yükseklik ağında belirli periyotlarda ölçüler gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında 11 periyotluk ölçü süresi göz önüne alınmıştır. Elde edilen mikrojeodezik ağ sonuçlarına göre obje noktalarına ilişkin radyal hareketlerin teğetsel hareketlere nazaran daha büyük olduğu görülmüştür. Özellikle üçüncü ve sekizinci periyotlarda hareketlerin büyüklüğü diğer periyotlara nazaran fazladır. Hareketlerin sıcaklık ve su seviyesi ile olan ilişkisi incelenmiş ve aralarında oldukça yüksek korelasyon elde edilmiştir. 15 Cº' lik sıcaklık dalgalanmasının barajda 8 mm' lik bir harekete neden olduğu belirlenmiştir. Su seviyesindeki 58 m lik artışın ise 10 mm lik bir rölatif harekete sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Genelde hareketler barajın üst kısımlarında mansaba doğrudur. En büyük hareketlenme beklenildiği gibi barajın orta kesitinde görülmüştür. Mesnetlere doğru kesitlerdeki hareketlenmeler azalmıştır. Yükseklik ağına bakıldığında ise yatay mikrojeodezik ağ ile benzer olarak üçüncü ve sekizinci periyotta hareketler artmıştır. Düşey yönlü hareketler 6 mm' nin altında kalmıştır.

Geoteknik ölçme aletleri yardımıyla yapılan izleme çalışmaları jeodezik çalışmalardan daha önce başlamıştır. Her bir ölçme aletinin ölçü başlangıç tarihleri farklıdır. Geoteknik ölçmeler, sıcaklık ölçmeleri, deformasyon ölçmeleri, gerilim, basınç ve boşluk suyu basıncı ölçmeleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Deformasyon belirlemek amacıyla gerçekleştirilen derz ölçer ve ekstensometre ölçümleri sonucunda önemli bir hareketlenme görülmemiştir. Sarkaç değerlerine göre ise en üst sarkaçta maksimum 1.2 cm lik bir hareket görülmüştür. Buna göre barajın üst kısmı Galeri 2' ye göre mansap hareketi göstermiştir. Sarkaç ile elde edilen değerlerin jeodezik obje noktalarıyla olan uyumu karşılaştırılmış ve oldukça tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Oluşan küçük farkların ise yöntemlere ilişkin ölçü doğruluklarının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece, iki yöntemin birbirini test etme imkanı olmuştur. Ayrıca üstteki iki sarkaç ile elde edilen hareketlerin sıcaklık ve su seviyesi ile olan ilişkisi incelenmiştir. Özellikle su seviyesi ile yüksek korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Gerilim ve basınç ölçümlerinde ise önemli bir duruma rastlanmamıştır. Boşluk suyu basınç ölçümlerinde ise alt kotlardaki birkaç piyezometrenin yüksek basınç değeri gösterdiği belirlenmiştir.

Geoteknik yöntemler ile baraj gövdesinin yanı sıra mesnetlerdeki hareketler de izlenebilmiştir. Mesnetlerde bulunan ekstensometre ve yük hücresi verilerine göre önemli bir durum söz konusu değildir. İnklinometre sonuçları ise jeodezik obje noktaları yardımıyla yorumlanabilmiştir. İnklinometre ile sadece bağıl hareketler belirlenebildiğinden oluşan hareketlerin sondaj deliğinin zemininde mi? yoksa üst kısmında mı? olduğu belirlenememektedir. Bu yüzden sondaj deliğinin hemen yakınındaki 4 ve 10 nolu jeodezik obje noktaları yardımıyla deliğin üst kısmının mutlak hareketi belirlenmiş ve üst kısımda olduğu düşünülen hareketlerin aslında alt kısımda olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede yukarıda da belirtildiği gibi iki yöntemin birbirlerini test edebildiği ve aynı zamanda da birbirlerini tamamlayabildikleri gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile maksimum 1.5 cm lik bir hareketin beklendiği belirtilmiştir. Bu değerlere hem jeodezik hemde geoteknik sonuçlarla uyuşmaktadır. Çünkü ölçü değerleri bu maksimum değerin altındadır.

Yapılan çalışma sonucunda iki farklı yöntem sayesinde Ermenek barajının detaylı bir şekilde izlenebildiği gösterilmiştir. Böylece, bu tür barajların deformasyon izleme çalışmalarında hem jeodezik hem de geoteknik yöntemlerin birlikte değerlendirilmesinin elde edilen verilerin doğru yorumlanması açısından ve barajın yük-cevap ilişkisinin ortaya konması açısından büyük önem arz ettiği rahatlıkla söylenebilir.

Baraj izleme çalışmalarında doğru sonuçların elde edilmesi ve neticesinde olası hareketlerin doğru yorumlanması oldukça önemlidir. Yapılan ölçümler ile elde edilen jeodezik ve geoteknik sonuçlar tek başına bir anlam ifade etmemektedir. Sonuçların bu konuda uzman kişiler tarafından yorumlanması gerekmektedir. Jeodezik ölçme aletlerinin kalibrasyonları belirli periyotlarda yapılmaktadır. Geoteknik cihazların da kontrollerinin belirli zaman aralıklarında yapılması gerekmektedir. Ayrıca geoteknik cihazların bozulması halinde tamir edilmeli veya eskisine eşdeğer ya da daha üstün nitelikli bir cihaz yerleştirilmelidir. Bu tür durumlarda eski ölçülerle yeni ölçüler arasındaki bağlantının sağlanması için gerekli titizlik ve hassasiyet gösterilmeli ve mümkünse eski ve yeni sistem arasındaki bağlantıyı sağlayacak ilave ölçmeler yapılmalıdır. Jeodezik noktaların ve geoteknik ölçme aletlerinin yerleri seçilirken sonuçların birlikte değerlendirilmesi açısından uygun yerlerin seçimine dikkat edilmelidir. Bu çalışmada olduğu gibi, DSİ ve Üniversite işbirliği ile gerçekleştirilen baraj izleme çalışmaları ülkemizde ki diğer barajlarda da yapılmalı ve DSİ-Üniversite işbirliği giderek yaygınlaştırılmalıdır. Baraj maliyeti göz önüne alındığında fazla

pay tutmayan fakat hayati önem taşıyan deformasyon izleme çalışmaları zorunlu olmalı ve izlenecek yöntemler ilgili yönetmeliklerce düzenlenmelidir.

8. KAYNAKLAR

Ağıralioğlu, N., 2004, Baraj Planlama ve Tasarımı, *Su vakfı yayınları*, cilt 1.

Ağıralioğlu, N., 2005, Baraj Planlama ve Tasarımı, *Su vakfı yayınları*, cilt 2.

Akanmu, J.O., Remi-John, O., Ekpo, I.E., 2011, Overview of dam development in Nigeria, *Geotech. Geol. Eng*. 29, 953-960.

Bayrak, T., 2007, Modelling the relationship between water level and vertical displacements on the Yamula dam, Turkey, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7, 289-297.

Chrzanowski, A., Massiera, M. 2006, Relation between monitoring and design aspects of large earth dams, *3. IAC/12 th FIG Symposium*, Baden, May 22-24.

Demirkaya, S., 2003, Jeodezik yöntemlerle deformasyon analizinde 35 yıl, 1. Ulusal Mühendsilik Ölçmeleri Sempozyumu, s.40-55.

Ding, X., Qin, H., 2000, Geotechnical instruments in structural monitoring, *Journal of Geospatial Engineering*, 2, 2, 45-56.

Ehiorobo, J., Ehigiator, R., 2011, Monitoring for horizontal movement in an earth dam using differential GPS, *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)* 2, 6, 908-913.

Erkaya, H., Hoşbaş, R.G., Gülal, V.E., Ersoy, N., Doğan, U., Pırtı, A., Soycan, M., Gümüş, K., Öcalan, T., Aykut, N.O., Akpınar, B., Poyraz, F., 2009, Beton kemer barajlarda deformasyonların modern ölçme teknikleri ile belirlenmesi. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 11-15 Mayıs 2009, Ankara.

Gedik, N., 2013, BAÜ Müh-Mim. Fakültesi, inşaat mühendisliği bölümü, su yapıları ders notu(http://insaat.balikesir.edu.tr/dokumanlar/suyapilari/barajlar.pdf).

Gikas, V., Sakellariou, M., 2008, Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring, *Engineering Structures*, 30, 3074, 3081.

Gonzalez-Aguilera, D., Gomez-Lahoz, J., Sanchez, J., 2008, A new approach for structural monitoring of large dams with a three dimensional laser scanner, *Sensors*, 8, 5866-5883; DOI 10.3390/s8095866.

Güler, G., Kilic, H., Hosbas, G., Ozaydın, K., 2006, Evaluation of the movements of the dam embankments by means of geodetic and geotechnical methods, *Journal of Surveying Engineering*, DOI 10.1061/(ASCE)0733-9453(2006)132:1(31).

He, X., Yang, G., Ding, X., Chen, Y., 2004, Application and evaluation of a GPS multi-antenna system for dam deformation monitoring, *Earth Planets and Space*, 56, 1035-1039.

İnal, C., 2010, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Harita mühendisliği bölümü, mühendislik ölçmeleri ders notu.

İnal C., 2000, Deformasyon ölçülerinin analizi lisans üstü ders notları, Selçuk Üniversitesi, Konya.

İnal, C., Ceylan, A., 2002, S transformasyonu uygulama alanları, *Selçuk Teknik Online Dergisi*, ISSN 1302-6178.

İnal, C., Yigit, C.Ö., Alçay, S., Özkale, İ., Okka, C.T., 2011, DSİ IV. Bölge Müdürlüğü Ermenek barajı deformasyon ölçmeleri ve analizi raporu (Rapor no: 1).

Kalkan, Y., 2012, Geodetic deformation monitoring of Atatürk dam in Turkey, *Arabian Journal of Geosciences*, DOI 10.1007/s12517-012-0765-5.

Kılıç, M., 2011, Nergizlik barajı (Adana) kil çekirdek malzemesinin jeoteknik incelenmesi, Ç.Ü. F.B.E. yüksek lisans tezi.

Kohler, R., Mayer, B., 2009, PÖYRY Ermenek barajı danışmanlık raporu, Değerlendirme rapor no:1.

Latifi, N., Marto, A., Khari, M., 2012, Monitoring results of alborz earth dam during construction, *EJGE*, 17, 2474-2484.

Mata, J., Tavares de Castro, A., Sa da Costa, J., 2013, Time-frequency analysis for concrete dam safety control: Correlation between the daily variation of structural response and air temperature, *Engineering Structures*, 48, 658-665.

Mayer, B., Güven, S., 2012, PÖYRY Ermenek barajı danışmanlık raporu, Değerlendirme rapor no: 10.

Özkuzukıran, S., Özkan, M.Y., Özyazıcıoğlu, M., Yıldız, G.S., 2006, Settlement behaviour of a concrete faced rock-fill dam, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 1665-1678.

Rao, S.S., 2011, The finite element method in engineering, fifth edition.

Sevim, B., Altunişik, A.C., Bayraktar, A., 2012, Earthquake behaviour of berke arch dam using ambient vibration test results. Journal of Performance of Constructed Facilities, DOI 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000264.

Taşçı, L., 2008, Dam deformation measurements with GPS, *Geodezija ir Kartgrafija*, 34:4, 116-121.

Vladimir, S., Milos, J., 2004, Deformation measurements on bulk dam of waterwork in east Slovakia, 50, 2, 1-10, ISSN 0474-8476.

Wang, T, Perissin, D., Rocca, F., Liao, M., 2010, Three Gorges dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis, *Science China Earth Sciences*, DOI 10.1007/s11430-010-4101-1.

Wieland, M., Kirchen, G.F., 2012, Long-term dam safety monitoring of punt dal gall arch dam in Switzerland, *Front. Struct. Civ. Eng.* 6, 1 76-83.

Wittke, W., Wittke, M., Kiehl, J., 2012, Interaction of a masonry dam and the rock foundation, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30, 581-601.

Yanmaz, A.M., Sezgin, O. I., 2009, Evaluation study on the instrumentation system of cindere dam, *Journal of Performance of Conctructed Facilities*, DOI 10.1061/_ASCE_CF.1943-5509.0000051.

Yanmaz, A.M., Arı, O., 2011, A study on dam instrumentation retrofitting, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15, 2, 317-325.

URL-1 http://www.icold-cigb.org/GB/World_register/general_synthesis.asp

URL-2 http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide.asp/ chap11.pdf

URL-3 http://homepages.rpi.edu/~des/Abaqus tutorial.pdf

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Salih ALÇAY
Uyruğu : TC
Doğum Yeri ve Tarihi : Ereğli / 20.03.1984
Telefon : 05349422656
Faks :
e-mail : salihalcay@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi, Osmangazi/Bursa	2002
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu / Konya	2008
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Seçuklu / Konya	2010
Doktora	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu / Konya	2014

YABANCI DİLLER

İngilizce / İyi düzeyde