

## MURATLI KAYA DOLGU BARAJININ DEFORMASYON DAVRANIŞI ANALİZİ

Yük. Müh. Yeşim Sema  
ÜNSEVER  
Araştırma Görevlisi  
Ortadoğu Teknik  
Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü  
Ankara , Türkiye  
e-posta:  
unsever@metu.edu.tr

Yük. Müh. Gülru Saadet  
YILDIZ  
Devlet Su İşleri Genel  
Müdürlüğü  
Ankara, Türkiye  
Tel.312 4178300-2348  
e-posta: gulru@dsi.gov.tr

Prof. Dr. M. Yener ÖZKAN  
Ortadoğu Teknik  
Üniversitesi İnşaat  
Mühendisliği Bölümü  
Ankara, Türkiye  
e-posta:  
myozkan@metu.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışmada Türkiye'nin ilk ön yüzü asfalt kaplı kaya dolgu barajı olan Muratlı barajının inşa aşamasında ve dolum sırasında oturma davranışı incelenmiştir. Toplam gerilmelerin ve yer değiştirmelerin belirlenmesi amacıyla iki boyutlu düzlem şekil değiştirme prensibi kullanılarak, sonlu elemanlar metodu analizleri gerçekleştirilmiştir. Kaya dolgu malzemesinin doğrusal ve elastik olmayan, gerilme bağımlı davranışını temsil etmek için sertleşen zemin modeli kullanılmıştır. Malzeme model parametreleri, önceki çalışmalar temelinde seçilmiştir ve daha sonra geri analiz yapılarak en uygun parametreler belirlenmiştir. İnşaat sonrasına ve rezervuar dolum aşamasına ait hesaplanan gerilmeler ve oturmalar ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır.

### GİRİŞ

Baraj mühendisliğindeki ve teknolojiadaki gelişmelerle, ön yüzü geçirimsiz kaya dolgu barajlar yaygın olarak uygulanmaktadır. Bu tip barajlar özellikle geçirimsiz malzemenin az olduğu ve yağış sezonunun çok olduğu bölgelerde tercih edilmektedir. Bu tip büyük yapıların inşaat sonrası ve rezervuar dolum aşamalarındaki davranışlarının incelenmesi barajın emniyeti ve ileride yapılacak yeni barajlarda oluşturulacak tasarım kriterleri açısından büyük önem taşımaktadır.

## AMAÇ

Türkiye'nin ilk ön yüzü asfalt barajı olan Muratlı Barajının oturma davranışı ve toplam gerilmeleri Plaxis programıyla incelenmiştir. Muratlı Barajı'na yatay ve düşey deformasyonları, gerilmeleri ve boşluk suyu basıncını ölçebilen aletler yerleştirilmiştir. Ölçümler hem inşaat sonrasında ve hem de rezervuar dolum aşamasında devam etmiştir. Analizlerde iki boyutlu düzlem şekil değiştirme prensibi ve “sertleşen zemin modeli” kullanılmıştır. Analiz sonucunda çıkan değerler, ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır.

## MURATLI BARAJI' NIN GENEL ÖZELLİKLERİ

Temelden yüksekliği 42 m olan Muratlı Barajı Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunmaktadır ve Çoruh nehri üzerine inşa edilmiştir. Çoruh nehri üzerinde Deriner, Borçka, Muratlı Barajları kaskat sisteminde inşa edilen barajların en mansapta olanıdır. Baraj, Türkiye-Gürcistan sınırına yaklaşık 100 m uzaklıktadır. Muratlı Barajı, Muratlı köyüne 2 km, Borçka ilçesine 17 km uzaklıktadır. Baraj, enerji üretmek ve taşkın önlemek amacıyla inşa edilmiştir. Barajın üretim kapasitesi, 115 MW'tır ve yıllık enerji üretimi 444.12 GWh'dur.

Muratlı Barajı'nın memba ve mansap yüzü eğimleri 2:1 olup barajın kret uzunluğu 240 m'dir. Muratlı Barajı'nda kullanılan malzemelerin cinsini ve bunların kullanıldığı bölgeler Şekil 1'de ve Tablo 1'de verilmiştir. Baraj alüvyon temel üzerine oturmaktadır, bu sebeple batardodan geçirimsiz ana kayaya kadar geçirimsizlik duvarı inşa edilmiştir.

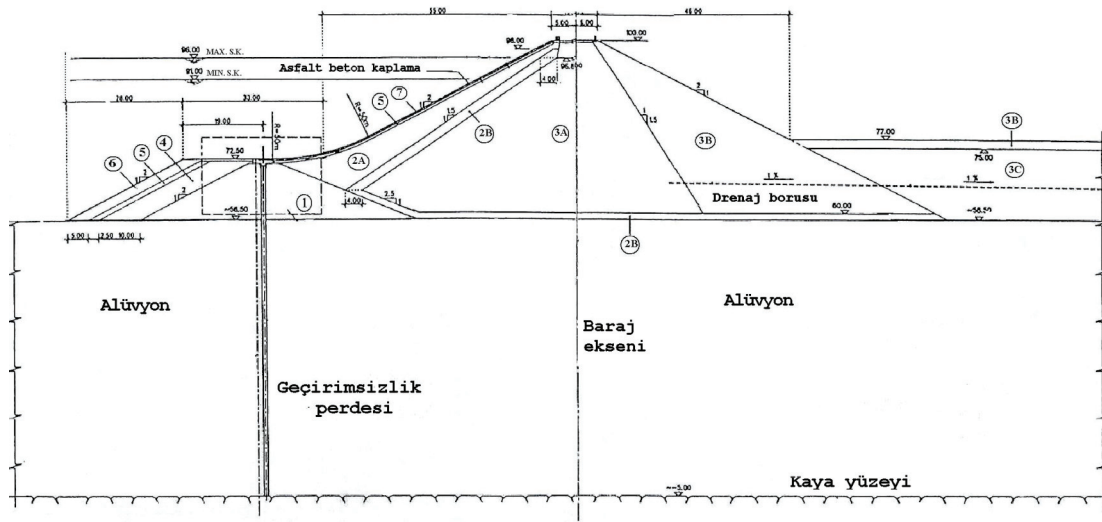
### Baraj Ölçüm Aletleri:

Muratlı Barajı'na baraj davranışının takibi için çeşitli ölçüm aletleri yerleştirilmiştir. Barajın davranışını incelemek için baraj gövdesine yerleştirilen ölçüm aletleri aşağıda verilmiştir:

- Inklinometre (IC) : Baraj gövdesi ve temel alüvyonundaki yatay ve düşey hareketi gözlemlemek amacıyla yerleştirilmiştir.
- Dolgu tipi ekstensometre (EW) : Asfalt yüzeyin altına düşey ve yanal yüzey hareketini gözlemlemek ve memba batardosu içerisine ve temel zeminine düşey hareketi gözlemlemek için yerleştirilmiştir.

- Boşluk suyu basıncı ölçer (PW): Perde duvarın geçirimsizliğinin kontrolü için duvarın memba ve mansabına ve gövde içerisine olası sızma kontrolü için yerleştirilmiştir.
- Gerilme ölçer (EC): Baraj gövdesinde oluşacak gerilmeleri takip etmek için gövde ve memba batardosu içerisine yerleştirilmiştir.

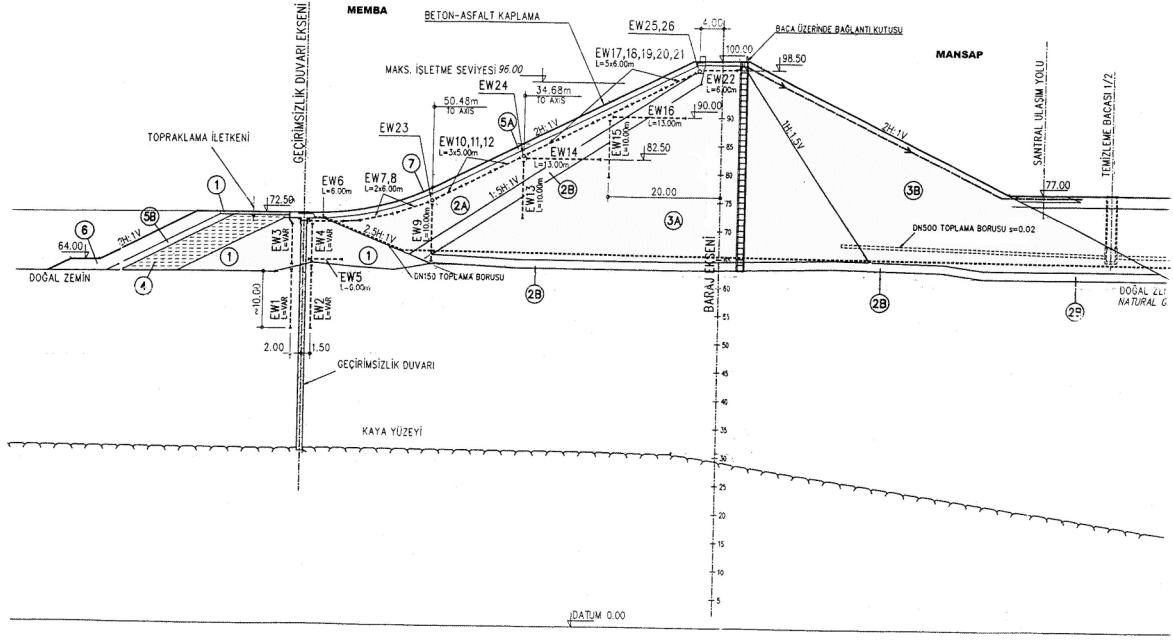
Toplamda 48 adet extensometre, 4 adet inklometre, 51 adet boşluk suyu basıncı ölçer ve 34 adet gerilme ölçer iki kesite yerleştirilmiştir. A1 kesiti için ölçüm aletlerinin yerleri şekil 2 ve 3' te görülmektedir. Şekil 2'de extensometrelerin yerleşimini, Şekil 3'te de inklometre, boşluk suyu basıncı ölçer ve gerilme ölçerlerin yerleşimi görülmektedir.



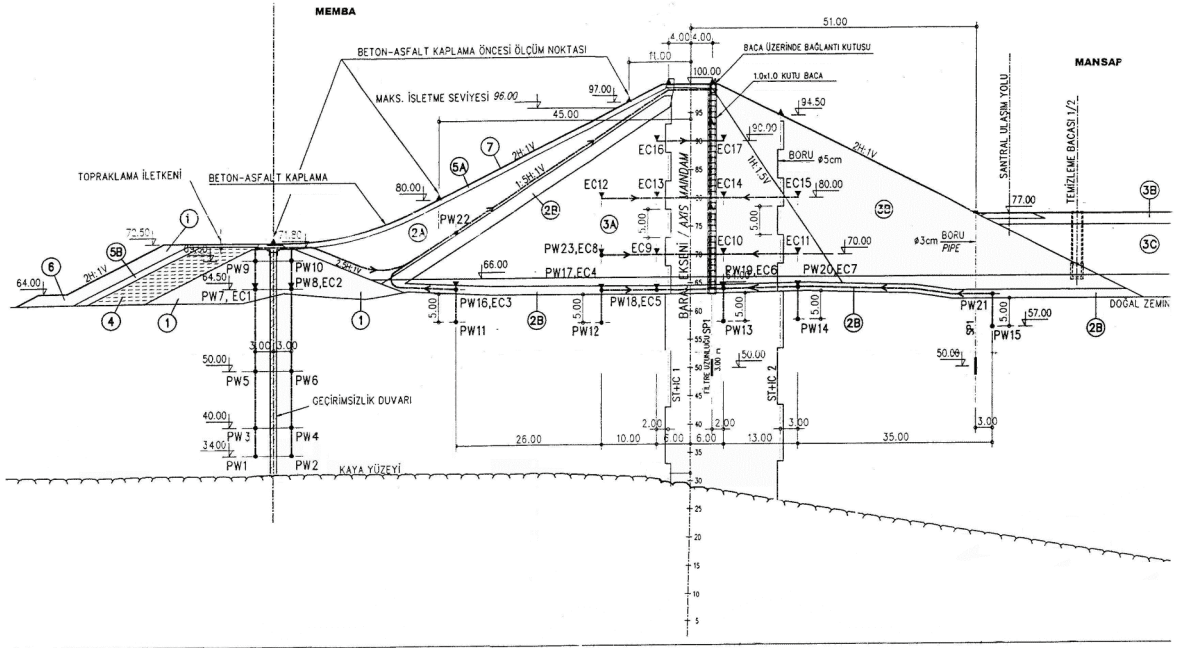
**Şekil 1: Muratlı Barajı'nın Tipik Enkesiti**

**Tablo 1: Muratlı Barajı'nın Tipik Enkesitinin Lejantı**

| Zon | Tip                                                           |
|-----|---------------------------------------------------------------|
| 1   | Nehir Alüvyonu                                                |
| 2A  | Nehir Alüvyonu ya da Kayadolgu Malzemesi (ince malzeme)       |
| 2B  | Nehir Alüvyonu ya da Kayadolgu Malzemesi (iri daneli malzeme) |
| 3A  | Kaya Malzemesi (Tip1)                                         |
| 3B  | Kaya Malzemesi (Tip 2)                                        |
| 3C  | Random Dolgu                                                  |
| 4   | Geçirimsiz Malzeme                                            |
| 5   | Filtre Malzemesi                                              |
| 6   | Riprap                                                        |
| 7   | Asfalt-beton yüz                                              |



Şekil 2: A1 Enkesiti Üzerindeki Extensometrelerin Yerleşimi



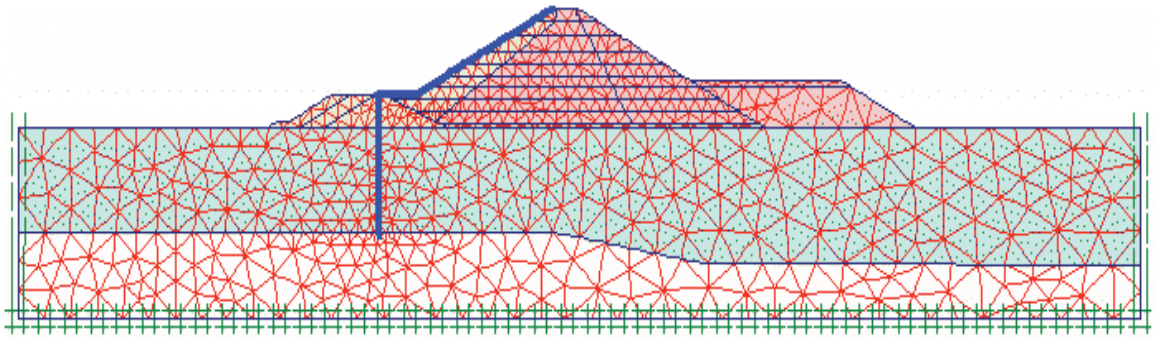
Şekil 3: A1 Enkesiti Üzerindeki İnklinometre, Boşluk Suyu Basıncı Ölçer ve Gerilme Ölçerlerinin Yerleşimi

## SONLU ELEMENLAR METODU ANALİZİ

Daha önceden de belirtildiği gibi analizlerde iki boyutlu düzlem şekil değiştirme prensibi ve “sertleşen zemin modeli” kullanılmıştır. Sertleşen zemin modeli, hiperbolik modelin geliştirilmiş halidir [1]. Bu model, kaya malzemesinin elastik ve doğrusal olmayan, gerilime bağlı davranışını göz önüne alabilmektedir. Analiz için gerekli olan malzeme parametrelerinin ön değerleri, yeterli deney sonucu olmadığı için geçmiş çalışmaların ışığında tahmin edilmiştir. Öte yandan, asfalt yüzün özellikleri Lollino v.d. (2005)’ nin yaptıkları çalışmalar doğrultusunda belirlenmiştir.

Baraj ile birlikte temel zemininin davranışını da gözlemlemek için barajın altındaki zemin de baraj gövdesiyle beraber modellenmiştir. Analizlerde dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, analizin basamaklar halinde yapılması gerektiğidir, çünkü baraj gerçekte tek bir kademede değil, kademeler halinde inşa edilmektedir. Bu sebeple, analizin tek bir kademede yapılmasıyla kademeler halinde yapılması arasında oturma mekanizmaları açısından ciddi bir fark vardır. Gerçekte maksimum oturma baraj gövdesinin ortalarında oluşur, fakat baraj tek bir kademede modellendiği zaman maksimum oturmanın krette olduğu gözlemlenir [3]. Modelin sonlu elemanlar ağı Şekil 4’de verilmiştir.

Analizler inşaat sonrası ve rezervuar dolum sonrası için yapılmıştır. İlkinde deformasyonlar barajın kendi ağırlığı altında oturması sonucu oluşmaktadır, ikinci durumda ise rezervuardaki su yükünden dolayı deformasyonlar oluşmaktadır.

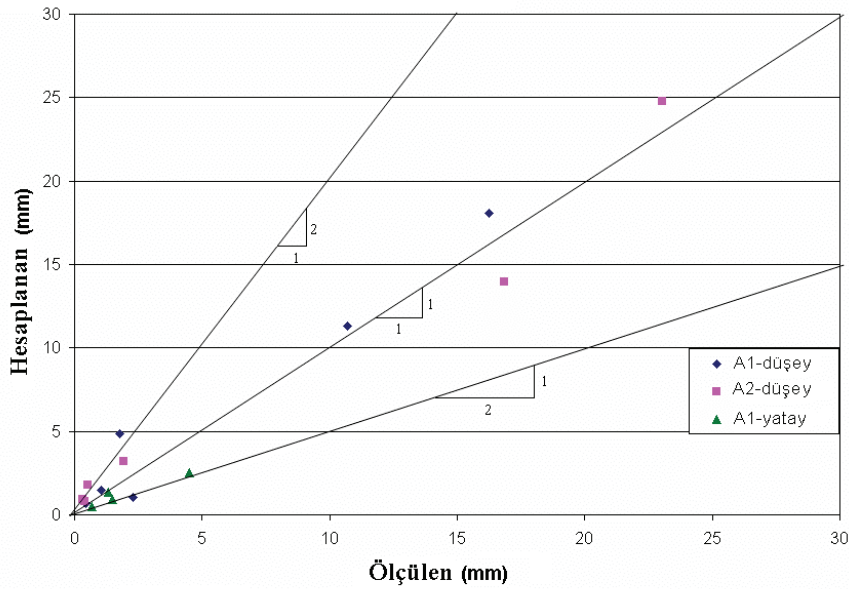


**Şekil 4: Sonlu elemanlar ağı**

## ANALİZ SONUÇLARI

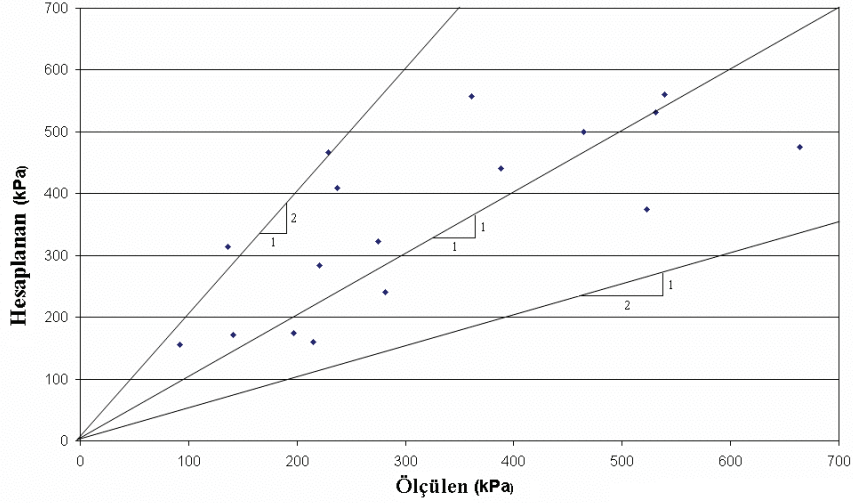
### İnşaat Sonu Durumu:

İnşaat sonu durumu için yatay ve düşey ekstensometre ölçümleri hesaplanan deplasmanlarla karşılaştırılmıştır. Ölçülen değerlerle analiz sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5'te verilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi ön yüz oturmalarının analizlerle genellikle uyum içinde olduğu görülmektedir. Uyumsuzlukların barajın homojen olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Baraj gövdesinde hesaplanan oturma değerlerini, inklinometrelerden alınan ölçümlerin sağlıklı olması nedeniyle karşılaştırmak mümkün olmamıştır. Beklenildiği gibi maksimum oturma baraj gövdesinin ortalarındadır, ve maksimum oturma değeri A1 kesiti için yaklaşık 110 mm ve A2 kesiti için 145 mm'dir.



Şekil 5: İnşaat sonu durumu için ekstensometre değerlerinin karşılaştırılması

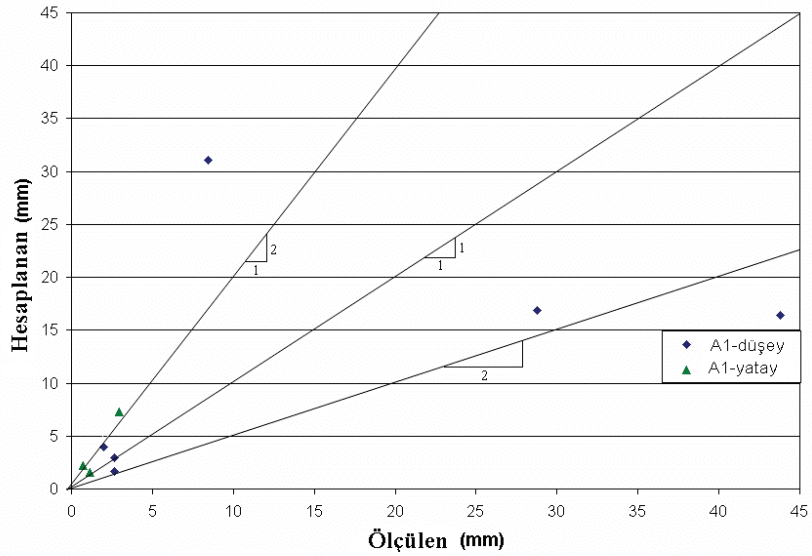
Ayrıca inşaat sonundaki ölçülen toplam gerilmeler de hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 6). Okunan değerlerle analiz sonuçları genel olarak birbirine yakındır. Fakat bazı ölçüm aletlerinin okumalarında hata olduğu düşünülmektedir, bu aletlerde okuma değerleri analiz değerlerinden oldukça azdır, ayrıca aynı kotta bulunan diğer ölçümlerle kıyasladığımızda da okunan değerlerin aynı kotta bulunan diğer değerlerden az olduğu görülmüştür. Bu aletlerdeki hatalı okumaların, inşaat sırasında ölçüm aletinin üzerindeki dolgu malzemesiyle ölçüm aleti arasında tam temas sağlanamamasından kaynaklandığı veya aletlerin kalibrasyonlarının hatalı yapıldığı düşünülmektedir.



**Şekil 6: İnşaat sonu durumu için toplam gerilme değerlerinin karşılaştırılması**

#### **Rezervuar Dolum Sonrası Durumu:**

Rezervuar dolum sırasında oluşan deformasyonları hesaplamak için de ayrıca analiz yapılmıştır. Bu aşamada deformasyonlar daha çok barajın memba kısmında oluşmaktadır. ve barajın ön yüzündeki geçirimsiz membranın performansını etkileyebilmektedir (Khalid v.d., 1990). Rezervuar dolumundan sonra okunan ekstensometre değerleri hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığı zaman bunların birbirine inşaat sonu için hesaplananlar kadar yakın olmadığı görülmüştür (Şekil 7). Hesaplanan maximum oturma perde duvarının yakınında olup 70 mm civarındadır.



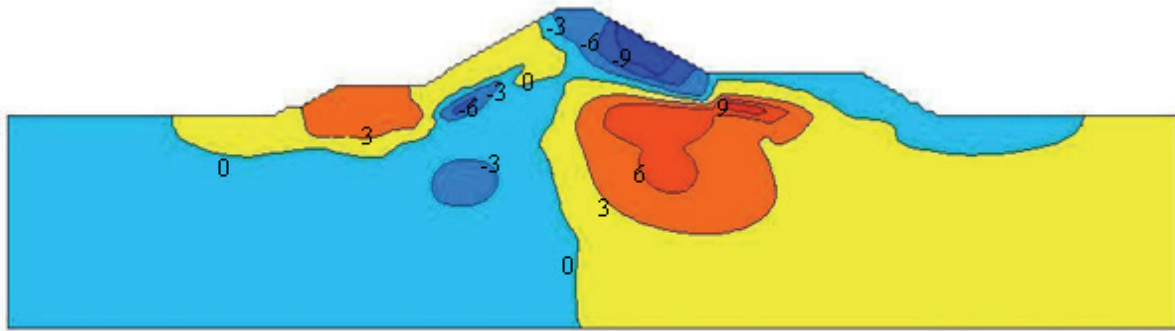
**Şekil 7: Rezervuar dolum sonrası durumu için ölçülen ve hesaplanan ekstensometre değerlerinin karşılaştırılması.**

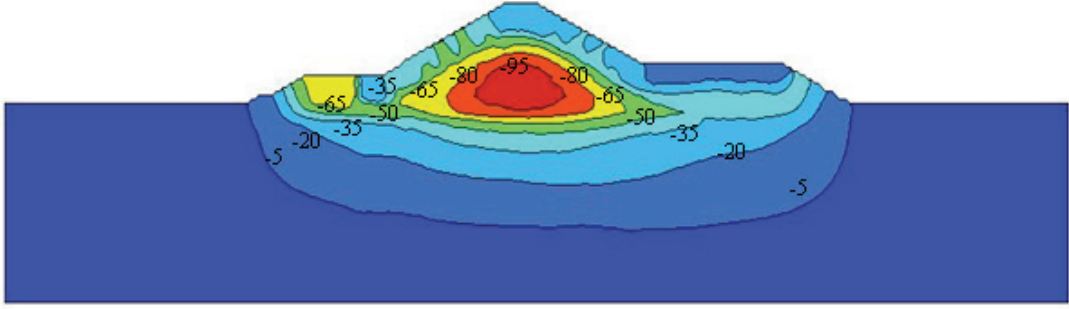
Analiz sonucu bulunan toplam gerilmeler inşaat sonunda olduğu gibi su tutma aşamasında da okunan değerlerle uyum içindedir. Su tutma aşamasından sonra oluşan gerilmeleri, inşaat sonu durumuyla kıyasladığımız zaman memba tarafında bulunan toplam gerilme ölçerlerde su yükünden dolayı artış görülmektedir, fakat bu artış mansap kısmında bulunan ölçüm aletlerini fazla etkilememiştir.

### Hesaplanan Deplasman ve Gerilme Konturleri:

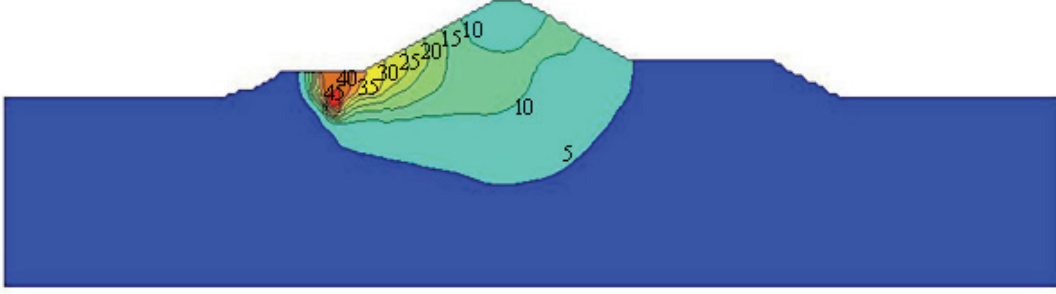
A1 kesiti için hesaplanan yatay ve düşey deplasmanlar, düşey ve kesme gerilmeleri inşaat sonu durumu için Şekil 8-11’ de su tutma sonu durumu için Şekil 9-12’ de sırasıyla verilmiştir. “-“ değeri düşey deplasmanlar için oturmayı, yatay deplasmanlar için membaya doğru hareketi temsil etmektedir. Gerilmeler de ise “-“ değeri basıncı ifade etmektedir.

İnşaat sonu durumu için deplasmanların ve gerilmelerin baraj eksenine göre simetrik olması beklenir [4]. Bu beklenti yatay deplasman konturlerinde pek sağlanamasa da düşey deplasman, düşey ve kesme gerilme konturler için geçerlidir. Şekil 9’daki düşey deplasman konturlerine baktığımız zaman maksimum oturma baraj gövdesinin ortalarında olduğu gözlenmektedir. Maksimum düşey gerilme ise baraj modelinin en altında olup değeri 1974 kPa’dır (Şekil 10). Kesme gerilmesi Şekil 11’den de görülebileceği gibi baraj ekseninde “0” olup, memba ve mansap yüzeylerine doğru artmaktadır.

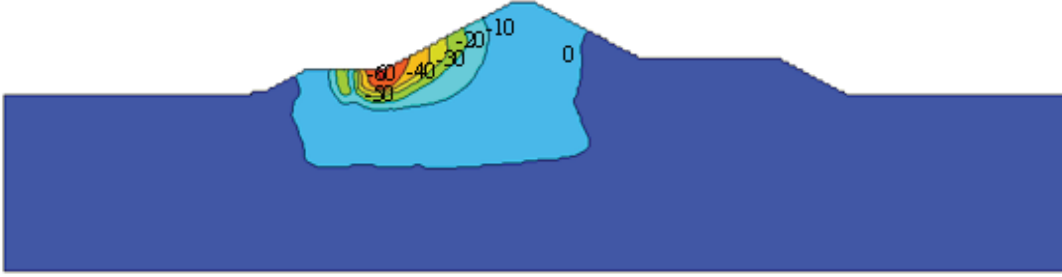




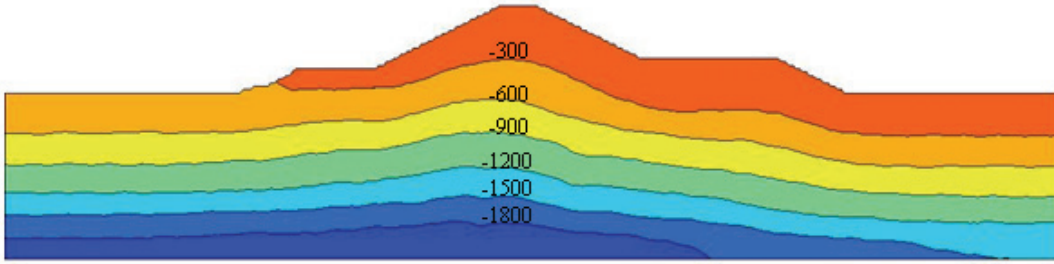
yükünün mebadaki negatif değerleri azalttığı ve mansaptaki pozitif değerleri arttırdığı görülmüştür (Şekil 15).



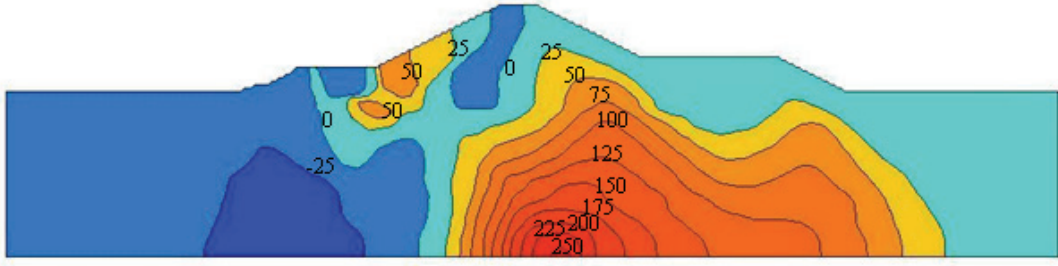
**Şekil 12: Su tutma sonu durumu için yatay deplasman konturleri**



**Şekil 13: Su tutma sonu durumu için düşey deplasman konturleri**



**Şekil 14: Su tutma sonu durumu için düşey gerilme konturleri**



**Şekil 15: Su tutma sonu durumu için kesme gerilmesi konturleri**

## **SONUÇ**

Bu çalışmada, Muratlı Barajı'nın Plaxis programıyla iki boyutlu analizi yapılmıştır. Malzeme modeli olarak zeminin gerçekte olan davranışına en yakın olan sertleşen zemin modeli seçilmiştir. Model parametrelerinin ön değerlerinin seçiminde daha önce yapılmış olan çalışmalardan faydalanılmıştır. Yapılan çalışmalarda ölçüm sonuçlarıyla, analiz sonuçları inşaat sonu ve rezarvuvar dolum aşamaları için karşılaştırılmıştır.

İnşaat sonu için baraj gövdesi içerisinde hesaplanan maksimum oturma A1 kesiti için 110 mm olup gövdenin ortasına karşılık gelmektedir. Maksimum oturma gerçeğleştığı yer daha önce yapılan çalışmalarla uyumludur [5]. Bu değeri su tutma aşaması için 70 mm hesaplanmıştır. Yerleştirilmiş olan dört inklonometrenin hiç birinden sağlıklı ölçüm alınamadığından barajın oturma davranışı hakkında analiz sonuçları ile hesaplanan değeri karşılaştırılarak kapsamlı bir yorum yapmak mümkün olmamıştır. İnklinometrelerden sağlıklı oturma ölçümü elde edilemediğinden sadece ekstensometre ölçümleri değerlendirilmiştir. Bu örnekten anlaşıldığı üzere, ölçüm aletlerinin sadece yerleştirilmesi değil inşaat sırasında korunmasının ve düzenli ve sağlıklı ölçüm alınmasının da önemi ortaya çıkmaktadır.

## **KAYNAKLAR**

1. Schanz, T., Vermeer, P. A. and Bonnier, P. G., "The Hardening Soil Model: Formulation and Verification", Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 Years of Plaxis, Balkema, Rotterdam, 1999.
2. Lollino, P., Cottechia, F. and Zdravkovic, L., "Numerical Analysis and Monitoring of Pappadai Dam", Can. Geotech. J., 42, 2005, 1631-1643.

3. Clough, R. W., and Woodward, R. J., “Analysis of Embankment Stresses and Deformations”, J. of Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 93, SM4, 1967, 529-549.
4. Khalid, S., Singh, B., Nayak, G. C., and Jain, O. P., “Nonlinear Analysis of Concrete Face Rockfill Dam”, J. Geotech. Engrg., ASCE, 116, 5, 1990, 822-837.
5. Özkuzukıran, R.S.,”Settlement Behaviour of Concrete Faced Rockfill Dams: A Case Study”, MS Thesis in Civil Engineering, METU, 2005.