

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATATÜRK BARAJININ ÜÇ BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ**  
**İNCELENMESİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MURAT ÇAVUŞLI**

**HAZİRAN 2016**

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATATÜRK BARAJININ ÜÇ BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Murat ÇAVUŞLI**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. Murat Emre KARTAL**

**ZONGULDAK  
Haziran 2016**

**KABUL:**

Murat ÇAVUŞLİ tarafından hazırlanan “Atatürk Barajı’nın Üç Boyutlu Doğrusal Olmayan Davranışının İncelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 20/06/2016

**Danışman :**Doç. Dr. Murat Emre KARTAL

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Doç. Dr. Melih GENİŞ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü



---

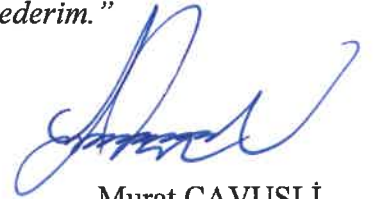
**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. ....../...../2016



Prof. Dr. Baki HAZER  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Murat ÇAVUŞLİ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **ATATÜRK BARAJININ ÜÇ BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Murat ÇAVUŞLI**

**Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat Emre KARTAL**

**Haziran 2016, 67 sayfa**

Kil çekirdekli kaya dolgu tipinde inşa edilen Atatürk Barajının memba kısmında biriktirdiği büyük su kütlesi göz önünde bulundurulursa, barajda oluşacak gerilme ve deformasyonların incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında, Atatürk barajının boş ve dolu rezervuar durumları göz önünde bulundurulmuş ve doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. 3 boyutlu baraj-temel modeli, sonlu farklar yöntemiyle çözüm yapan FLAC3D programı kullanılarak elde edilmiştir. Barajın sonlu eleman ağı, gerçek baraj geometrisine uygun olarak oluşturulmuştur. Baraj davranışını elde etmek için, malzeme parametreleri deneysel verilerden seçilmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan analizlerde, baraj ve temel zemini için Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Sınır koşulu olarak, taban ve yan yüzeylerin hareketi statik analizlere göre uygun bir sınır koşulu seçilerek kısıtlanmıştır.

Bu çalışmada, analizler iki farklı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, baraj rezervuarının boş olması durumu için sonlu eleman analizlerini ve sonuçlarını içermektedir. Bu bölümde ilk olarak zemin, kendi ağırlığı altında çözdürülmüştür. Hemen ardından, statik çözüm yapılmış

## **ÖZET (devam ediyor)**

zeminin üzerine barajın gövde kısmı eklenmiştir ve barajın zemin-gövde kısmı kendi ağırlığı altında çözdürülmüştür. İkinci bölümde ise birinci bölümde çözdürülen barajın memba kısmına su yükleri eklenmiştir ve baraj su yükleriyle çözdürülmüştür. Her iki bölümde de barajda oluşan asal gerilmeler ve düşey yerdeğıştirmeler incelenmiştir. Ayrıca baraj rezervuarının boş ve dolu olması durumlarında meydana gelen asal gerilmeler ve düşey yerdeğıştirmeler karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler** Atatürk Barajı, Kil çekirdekli kaya dolgu baraj, Mohr-Coulomb malzeme modeli, Sonlu farklar yöntemi.

**Bilim Kodu:** 624.03.01.

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THREE DIMENSIONAL NON-LINEAR BEHAVIOUR OF ATATURK DAM**

**Murat ÇAVUŞLI**

**Bülent Ecevit University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat Emre KARTAL**

**June 2016, 67 pages**

If considering accumulated huge mass of reservoir water in the upstream side of Atatürk dam which was built as clay core rockfill dam, investigation of stresses and deformations of the dam has great importance. In this thesis study, empty and full reservoir conditions considering nonlinear behaviour of Atatürk dam was examined. Three dimensional dam-foundation finite element model was designed by FLAC3D program which makes solution with finite difference approach. Finite element model of the dam was created according to real dam geometry. Material properties were selected from real material properties of the dam to obtain nonlinear behaviour of dam. In addition, Mohr-Coulomb material model was used at nonlinear analysis for dam-foundation. The movement of base and side surfaces is restricted by selecting the appropriate boundary conditions according to analysis type.

In this study, numerical analyses are comprised of two parts. In the first part, there is a numerical analysis of empty reservoir condition of dam. In this case, firstly, foundation was solved under its self-weight. Then, the dam body was added on the foundation which was already settled in

## **ABSTRACT (continued)**

static solution. In the second part of the study, reservoir water effects on the upstream side of the dam were considered after the first part of the numerical analysis. The stresses and vertical displacements in both parts of the dam were examined. In addition to this, stresses and deformations were compared for empty and full reservoir conditions of dam.

**Keywords:** Atatürk dam, Clay Core Rockfill Dams, Mohr-Coulomb material model, Finite Difference Method.

**Science Code:** 624.03.01.



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını, bana öneren ve çalışmanın her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, önerileriyle ufkumu açan, idari görevlerindeki yoğunluğa rağmen değerli zamanını bana ayıran danışmanım ve saygıdeğer hocam Doç. Dr. Murat Emre KARTAL'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Çalışma süresince değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan ve çalışmayı inceleyen değerli hocam Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a teşekkür ederim. Ayrıca FLAC3D programını analizlerimde kullanmama imkan sağlayan Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na da teşekkür ederim. Çalışma süresince her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan ve desteğini bir an olsun esirgemeyen kıymetli arkadaşım Arş. Gör. Muhammet KARABULUT'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde emeği olan, hoşgörüsünü benden esirgemeyen ve haklarını ödeyemeyeceğim annem Havva ÇAVUŞLİ'ye ve babam Fevzi ÇAVUŞLİ'ye şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım sırasında sevgisini ve desteğini benden esirgemeyen kardeşlerim Ömer ÇAVUŞLİ ve Kübra ÇAVUŞLİ'ye de teşekkür ederim.

Bu çalışmanın bundan sonra gerçekleştirilecek çalışmalara öncülük etmesini ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL: .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 DOLGU BARAJLAR İLE İLGİLİ BAZI ÇALIŞMALAR .....	2
1.2 BARAJLARIN SINIFLANDIRILMASI .....	4
1.2.1 Gövde Dolgu Malzemesi ve Gövde Biçimine Göre Sınıflandırma .....	5
1.2.2. Büyüklüklerine Göre Sınıflandırma.....	5
1.2.3. Yapılış Amaçlarına Göre Sınıflandırma .....	5
1.3. KAYA DOLGU BARAJLAR .....	6
1.4. KİL ÇEKİRDEKLİ KAYA DOLGU BARAJLAR .....	9
1.5 ATATÜRK BARAJI .....	10
BÖLÜM 2 FLAC (FAST LAGRANGIAN ANALYSIS OF CONTINUA) 3D YAZILIMI ..	17
2.1. FLAC3D PROGRAMI İLE MODELLEME YAPMANIN TEORİK TEMELİ.....	18
2.2. BAŞLANGIÇ VE SINIR KOŞULLARI.....	19
2.3. ANALİZ HESAP ADIMLARI.....	20
2.4. SONLU FARKLAR YÖNTEMİ.....	21
2.5. MOHR – COULOMB YENİLME ÖLÇÜTÜ .....	23

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 3 ATATÜRK BARAJININ SONLU ELEMAN AĞININ OLUŞTURULMASI ...	31
3.1 ATATÜRK BARAJININ BOŞ REZERVUARLI SONLU ELEMAN MODELİ.....	32
3.2 ATATÜRK BARAJININ DOLU REZERVUARLI SONLU ELEMAN MODELİ.....	39
BÖLÜM 4 BULGULAR VE İRDELEMELER.....	43
4.1 BARAJIN BOŞ REZERVUARLI DURUMUNDA DÜŞEY YERDEĞİŞTİRMELER	45
4.2 BARAJIN BOŞ REZERVUARLI DURUMU İÇİN MAKSİMUM ASAL GERİLMELER.....	49
4.3 BARAJIN DOLU REZERVUARLI DURUMU İÇİN DÜŞEY YERDEĞİŞTİRMELER	52
4.4 BARAJIN DOLU REZERVUARLI DURUMU İÇİN MAKSİMUM ASAL GERİLMELER.....	58
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ .....	67

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
1.1	Barajların Genel Sınıflandırılması.....	5
1.2	Barajların yapılış amaçlarına göre sınıflandırılması.....	6
1.3	Kaya temel üzerine inşa edilen farklı baraj en kesitlerinin alternatifleri.....	8
1.4	Tipik kaya dolgu baraj kesiti .....	9
1.5	Atatürk Barajının jeopolitik konumu.....	10
1.6	Atatürk Barajı.....	11
1.7	Atatürk Barajının en kesiti.....	13
1.8	Atatürk Barajının genel planı.....	14
1.9	Memba kısmından parçalanmış bazalt malzemesinin görüntüsü .....	15
1.10	Mansap kısmından parçalanmış bazalt malzemesinin görüntüsü.....	15
2.1	FLAC 3D sonlu eleman modelinin kısımları.....	17
2.2	FLAC 3D programında bulunan mesh elemanlar.....	19
2.3	FLAC 3D programında statik çözüm için akış diyagramı.....	21
2.4	Düzgün dörtyüzlü.....	22
2.5	Mohr - Coulomb ölçütünün Mohr diyagramında gösterimi .....	24
2.6	Mohr - Coulomb dayanım zarfının jeolojik malzemelere uygulanışı.....	25
2.7	Üç eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılma yüzeyine etkiyen gerilmelerin Mohr diyagramında gösterimi .....	25
2.8	Mohr - Coulomb ölçütünün asal gerilmeler uzayındaki görünümü ve oktahedral düzlemindeki izi .....	26
2.9	Mohr - Coulomb ölçütünün asal gerilmeler diyagramında gösterimi .....	27
2.10	Mohr - Coulomb ölçütüne göre tek eksenli çekme ve basınç dayanımlarını belirten diyagramlar .....	28
2.11	Mohr - Coulomb dayanım zarfının çekme dayanımına göre düzeltilmesi .....	29
2.12	Mohr - Coulomb ölçütünün kaya malzemesi ve kaya kütlesi için gösterimi .....	30
3.1	Atatürk Barajının sonlu eleman modelinin genel görünüşü.....	33
3.2	Atatürk Barajının sonlu eleman ağında bulunan kesitler.....	34
3.3	5-5 kesitinden kesilen barajın genel görünümü.....	35
3.4	5-5 kesitinden kesilen barajın kretinin detaylı görünümü.....	36
3.5	Atatürk Barajının gövde geometrisinin genel görünümleri.....	38
3.6	Barajın memba kısmına etki ettirilen su yüklerinin genel görünümleri .....	42

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
4.1	Barajda oluşan düşey yerdeğiştirme sonuçları.....	48
4.2	Yerdeğiştirme vektörlerinin düzlem görünümü.....	48
4.3	Yerdeğiştirme vektörlerinin üç boyutlu görünümü. ....	49
4.4	Barajda oluşan maksimum asal gerilme sonuçları.....	51
4.5	Barajda oluşan düşey yerdeğiştirme sonuçları.....	54
4.6	Düşey yerdeğiştirmelerin 5-5 kesitinden görünümü.....	56
4.7	Düşey yerdeğiştirmelerin düzlem görünümü.....	56
4.8	Yerdeğiştirme vektörlerinin düzlem görünümü.....	57
4.9	Yerdeğiştirme vektörlerinin üç boyutlu görünümü. ....	57
4.10	Barajda oluşan maksimum asal gerilme sonuçları.....	60
4.11	Barajda oluşan maksimum asal gerilmelerin iki boyutlu görünümü. ....	60

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Atatürk Barajının genel özellikleri .....	12
1.2 Gövde yükseklikleri ve gövde hacimleri bakımından dünyanın ilk 10 barajı .....	13
4.1 Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri .....	45





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\nu$	: Poisson Oranı.
$S$	: Alan.
$c$	: Kohezyon.
$\phi$	: İçsel sürtünme açısı.
$\tau$	: Kırılma anında etkiyen kayma gerilmesi.
$\sigma$	: Kırılma yüzeyine etkiyen normal gerilme.
$\mu$	: İçsel sürtünme katsayısı.
$\sigma_{\max}$	: En büyük asal gerilme.
$\sigma_{\min}$	: En küçük asal gerilme.
$N\phi$	: Üç eksenli dayanım faktörü.
$c_m$	: Kaya kütlelerine ait kohezyon.
$\phi_m$	: Kaya kütlelerine ait içsel sürtünme açısı.

### KISALTMALAR

DSİ	: Devlet Su İşleri
-----	--------------------



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Su, canlıların yaşamlarını devam ettirebilmeleri için hayati öneme sahiptir. Suyun hayatımızda bu kadar büyük öneme sahip olmasının en önemli nedeni, en küçük canlı organizmadan, en büyük canlı varlığa kadar, bütün biyolojik yaşamı ve bütün insan faaliyetlerini ayakta tutmasıdır. Su, dünyamızın % 70'ini kaplamaktadır ve bedenimizin de önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Dünya'da her yıl yaklaşık olarak 400 000 km<sup>3</sup> su buharlaşmakta ve yağış olarak tekrar dünyaya dönmektedir. Bunun 300 000 km<sup>3</sup>'ü denizlere, 100 000 km<sup>3</sup>'ü ise karalara düşmektedir. Karalara düşen yağışın ise ancak 1/3'ü yerüstü akışı haline geçmekte ve akarsuları oluşturmaktadır [1].

Anadolu, tarih boyunca birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Bu medeniyetlerin, Anadolu'da yaklaşık 4000 yıldır süren hidrolik mühendisliği çalışmaları, özellikle Selçuklu ve Osmanlıların yaptıkları muhteşem eserler, Türkiye'yi tarihi su yapıları açısından en zengin ve en muhteşem açık hava müzelerinden birisi haline getirmiştir [2]. İnsanoğlu için bu kadar hayati öneme sahip olan sudan çok yönlü faydalanmak için dünyada ve ülkemizde çeşitli barajlar inşa edilmiştir ve hala daha birçok baraj inşa edilmektedir.

Barajın bugün belirlenebilmiş ilk uygulamaları, M.Ö. 3000 dolayında başkent Memfis'i kurması sırasında, firavunun 15 metre yüksekliğinde ve 450 metre kret uzunluğunda bir kargir barajla Nil nehrini çevirdiği Herodot tarihinde yer almaktadır. Yerinde kalıntıları bulunan en eski barajın, Ürdün'de eski Jawa kentine su temini amacıyla yapılan, azami 5 metre yüksekliğinde bir sedde niteliğindeki, M.Ö. 3000 civarından kalma Jawa barajı olduğu ifade edilmektedir. Mısır'da Nil'in doğu kollarından Garawi vadisinde, M.Ö. 2600 dolayından kalmış olduğu belirlenen 12 metre yüksekliğindeki Sedd-el-kefere barajı bulunmaktadır. Belucistan'da Mashkai vadisinde ve Lakonian geçidinde iki barajın M.Ö. 2000'lerde inşa edildiği belirtilmektedir. Mezopotamyada Samarra yakınında Dicle üstünde inşa edilmiş olan Marduk barajının, birkaç bin yıl hizmet gördüğü ve M.S. 1296'da yıkıldığı ifade edilmektedir. Suriye'de

Asi ırmağı üstünde, Katinah barajı olarak da anılan Homs barajının M.Ö. 14. yüzyılda firavunlar döneminde yapılıp, M.S. 3. yüzyılda Roma imparatorluğunda esaslı biçimde onarıldığı; Lazkiye yakınındaki Raşşamra'da bulunan iki barajın M.Ö. 12. yüzyıldan kaldığı sanılmaktadır. Mora yarımadasında Tiryns'i taşkından korumak amacıyla inşa edilmiş olan 10 metre yükseklikteki Kofini barajı ile çevirme kanalının M.Ö. 1300 civarından kaldığı belirtilmektedir. Anadolu'daki en eski baraj kalıntısı, Uzunyaylanın sulanması amacıyla M.Ö. 2000'in ortalarında Hititler tarafından yapılan Karakuyu barajıdır. Alacahöyük yakınındaki Gölpınar ve Ilgın yakınındaki Köylütolu barajlarının da Hitit döneminden kaldığı sanılmaktadır. Beyşehir yakınındaki Eflatunpınarda küçük bir havuz oluşturan sedde, Ilgın yakınında Yalburt'ta kesme taş duvarlarla inşa edilmiş ve pınar sularını toplayan bir hazne, Boğazkalede taş kaplama bir kehriz niteliğindeki pınar derleme yapısı, Alacahöyük'te ve Keban barajı gölünde kalmış olan Korucutepe'de de bazı kanal kesimleri Hitit döneminin diğer ilginç su yapılarıdır. [3]

Yapılan her yapıda olduğu gibi insanoğlu için çok büyük öneme sahip olan barajlarda da, belirli yükler altında deformasyonlar ve gerilmeler oluşmaktadır. Kil çekirdekli kaya dolgu barajlar, inşa edildikten sonra kaya dolgusunda ve zeminde su yükü, deprem yükü gibi birçok dış kuvvetten dolayı birtakım oturmalar meydana gelmektedir. Atatürk barajının su tutmaya başlamasından sonra da bu oturmaların ortaya çıktığı bilinmekte olup bunlar gözlemlenmiştir [4]. Barajda meydana gelen oturmaların incelenmesi ve su yüklerinden dolayı barajın davranışının incelenmesi barajın emniyeti açısından hayati öneme sahiptir.

## **1.1 DOLGU BARAJLAR İLE İLGİLİ BAZI ÇALIŞMALAR**

Miglio L. vd. Sonlu farklar yöntemiyle çözüm yapan FLAC2D programını kullanılarak barajın sonlu eleman ağı oluşturmuşlardır ve kaya dolgu barajlarda sismik analizler yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre deformasyonlar ve gerilmeler incelenmiştir [5].

Djarwadi D. vd. yaptıkları çalışmada, farklı kil çekirdekli kaya dolgu barajlar için geçirimsiz kil malzemelerinin mekanik özelliklerini, 3 eksenli basınç deneyi ile elde etmiştir ve incelemiştir [6]. Bu barajlar için dolgu malzemesinin mekanik özellikleri, deprem gibi büyük dış yükler karşısında barajın davranışı için büyük öneme sahiptir.

Charatpangoon B. vd. yaptıkları çalışmada, toprak dolgu barajlarda, barajın sismik davranışı incelemiştir. Barajın sonlu eleman ağı oluşturulmuş ve barajın deprem sırasında nasıl davranış gösterdiği gözlemlenmiştir [7].

Chen G. vd. rezervuar suyunun barajın davranışına olan etkisini incelemiştir. Bu çalışmaya göre rezervuarın, barajın deprem davranışına etkisi ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Çalışmada ayrıca, rezervuarın farklı doluluk oranlarında barajda oluşturduğu risk incelenmiştir [8].

Noorzad R. vd. yaptıkları çalışmada, FLAC2D programı kullanılarak dolgu barajın iki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturmuşlardır. Çalışmalarında, farklı sınır şartları kullanarak barajın deprem davranışı incelenmiştir [9] .

Akköse M. vd. kaya dolgu bir baraj olan Keban barajının stokastik sismik davranışı incelemiştir. Çalışmada, barajın iki boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulup, deprem esnasında yükseklik boyunca barajda oluşabilecek yerdeğiştirme ve gerilmeler incelenmiştir [10].

Dolgu barajlarda oluşabilecek en büyük tehlikelerden birisi sızma tehlikesidir. Athani S. S. vd. yaptıkları çalışmada, dolgu barajlarda oluşan sızma tehlikesi ve barajın kendi ağırlığı altındaki davranışını incelemiştir [11].

Literatürde nadir sayıda laboratuvar ortamında baraj modellemesi yapılarak, barajın deprem analizinin yapıldığı çalışmalar çok azdır. Yuan L. vd. yaptıkları çalışmada ise laboratuvar ortamında baraj modelleyip, sarsma tablası cihazını kullanılarak barajın deprem performansını belirlemiştir [12].

Çetin K. Ö. ve Unutmaz B. yaptıkları çalışmada, kaya dolgu barajların deprem davranışının değerlendirilmesinde mevcut yöntemler incelenmiştir. Çalışmada kaya dolgu barajların deprem sırasında ve deprem sonrasındaki performansları değerlendirilmiştir [13].

Zhou C. B. vd. kaya dolgu bir barajın 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturup, barajda sızma tahkiki yapılmıştır. Bu çalışmada sızmanın nerede olduğu belirlenmiş ve sızma tehlikesi, sebebiyle birlikte sunulmuştur [14].

Albano M. vd. kaya dolgu barajların 3 boyutlu sismik performansı değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında deprem esnasında barajda oluşabilecek gerilme ve yerdeğiştirmeler incelenmiştir [15].

Liu C. vd. kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda deprem analizini yapmışlardır. Bu çalışmada, 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulup, barajın 3 boyutlu doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Deprem esnasında barajda oluşabilecek gerilmeler incelenmiştir [16].

Korkmaz M. kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda oluşan gerilme ve deformasyon miktarlarını araştırmıştır. Çalışmalarında iki boyutlu sonlu eleman ağı oluşturulup, baraj gövdesinde meydana gelebilecek gerilme ve baraj kretinde oluşabilecek yerdeğiştirmeler incelemiştir [17]. Oral Y. Z. kil çekirdekli kaya dolgu barajların sismik analizini yapmıştır. Barajın maruz kaldığı gerilme ve deformasyonlar değerlendirilmiştir [18].

Baziar M. H. vd. yaptıkları çalışmada, kil çekirdekli kaya dolgu baraj ile asfalt çekirdekli kaya dolgu barajın deprem davranışı incelenmişlerdir. Bu iki barajın kendi ağırlıkları altında oturmaları ve deprem yükü karşısında oluşan gerilmeleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır [19].

Shakya Y. vd. kil çekirdekli kaya dolgu barajların deprem analizini yapmışlardır. Burada, deprem esnasında barajda oluşabilecek düşey yerdeğiştirmeler incelenmiştir [20].

Anastasiadis A. vd. yaptıkları çalışmada, kaya dolgu barajların deprem davranışını incelemişlerdir. Barajın deprem esnasında maruz kalabileceği gerilme ve yerdeğiştirmeler detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir [21].

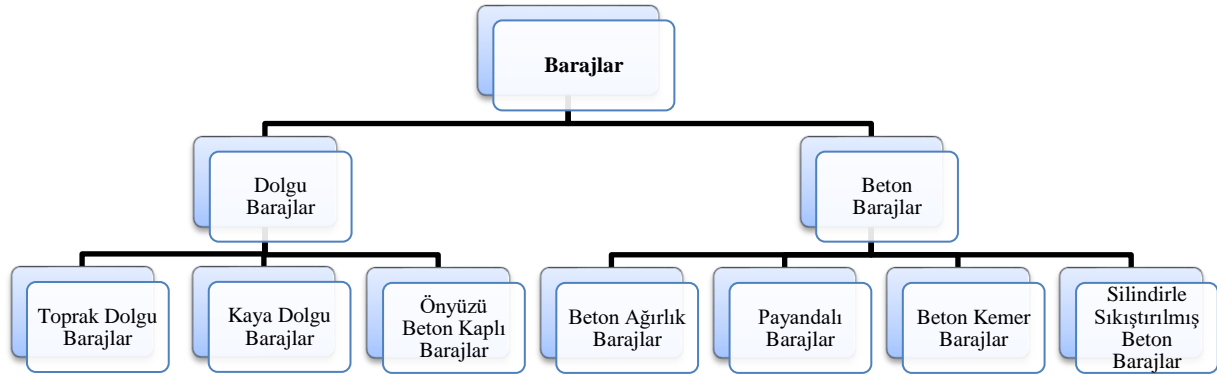
Dong W. vd. yaptıkları çalışmada, kil çekirdekli kaya dolgu barajın üç boyutlu sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır ve kendi ağırlığı altında ve deprem yükü altında, barajın maruz kalabileceği gerilme ve yerdeğiştirmeler incelenmişlerdir [22].

## **1.2 BARAJLARIN SINIFLANDIRILMASI**

Dünya literatüründe birçok baraj sınıflandırılması yapılmıştır. Yapılan sınıflandırmalar farklı olsa bile hepsinin içeriği aynıdır.

### 1.2.1 Gövde Dolgu Malzemesi ve Gövde Biçimine Göre Sınıflandırma

Barajlar, dolgu malzemesi ve gövde biçimine göre dolgu barajlar ve beton barajlar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu barajlar hem gövde yapıları olarak hem de gövdesinde bulunan malzemelerin mekanik özellikleri olarak çok farklı yapılara sahiptir. Dolgu barajlar, gövdesinde dolgu malzemesi bulunduran barajlardır. Beton barajlar ise adından anlaşılacağı gibi gövdesinde beton malzemesi bulunduran barajlardır. Genel olarak barajlar Şekil 1.1'deki gibi sınıflandırılır.



Şekil 1.1 Barajların Genel Sınıflandırılması.

### 1.2.2. Büyüklüklerine Göre Sınıflandırma

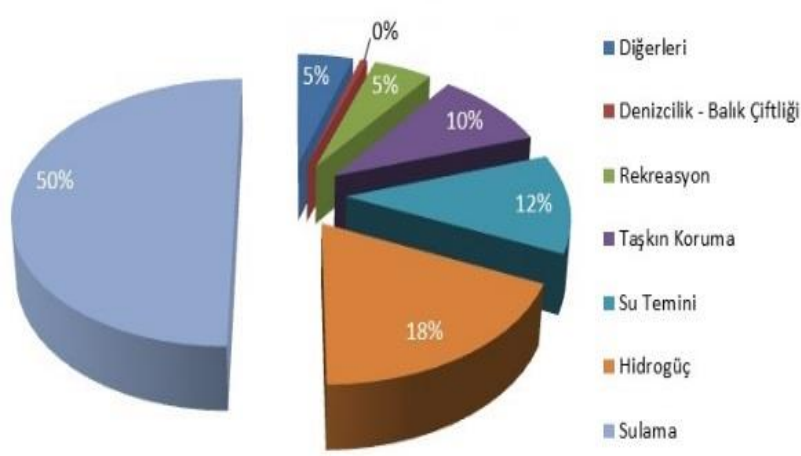
Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD: International Commission on Large Dam), kreti ile temeli arasındaki yükseklik 15 m'den fazla olan barajlar büyük baraj olarak adlandırılır. Ayrıca yüksekliği 10-15 m arasında olan fakat kret uzunluğu 500 metreden fazla olma, hazne hacmi  $1106 \text{ m}^3$  olma ve en büyük debisi  $1000 \text{ m}^3/\text{sn}$  den fazla olma özelliklerinden en az birisini taşıyan barajlar da büyük baraj olarak isimlendirilir.

Küçük baraj ise, büyük baraj tanımının dışında kalan, projesi daha basit ve çabuk sonuç alınan yapılardır. Yüksekliği 50 m'den fazla olan barajlar yüksek baraj olarak adlandırılır.

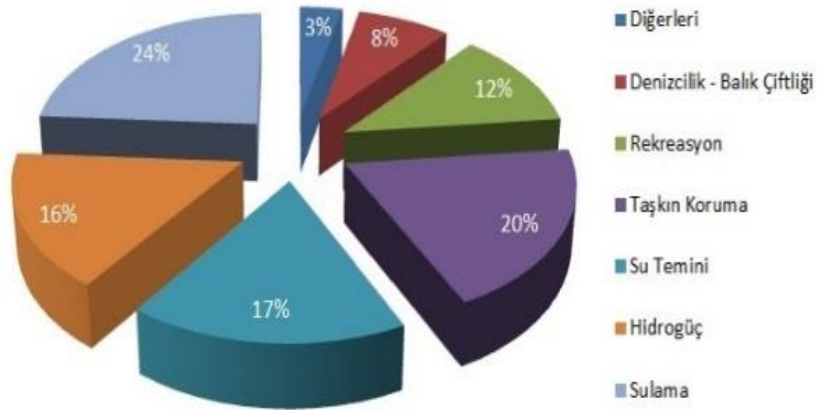
### 1.2.3. Yapılış Amaçlarına Göre Sınıflandırma

Bir baraj tek veya çok amaçlı olarak planlanır. Tek amaçlı barajlar içme suyu temini, endüstri suyu temini, sulama, hidroelektrik enerji, taşkın kontrolü vb. için yapılırlar. Bunların birkaçını

birlikte temin eden baraja çok amaçlı baraj denir. Tek amaçlı ve çok amaçlı barajların kullanım amaçları Şekil 1.2'deki gibi verilebilir.



a) Tek Amaçlı



b) Çok Amaçlı

Şekil 1.2 Barajların yapılış amaçlarına göre sınıflandırılması.

### 1.3. KAYA DOLGU BARAJLAR

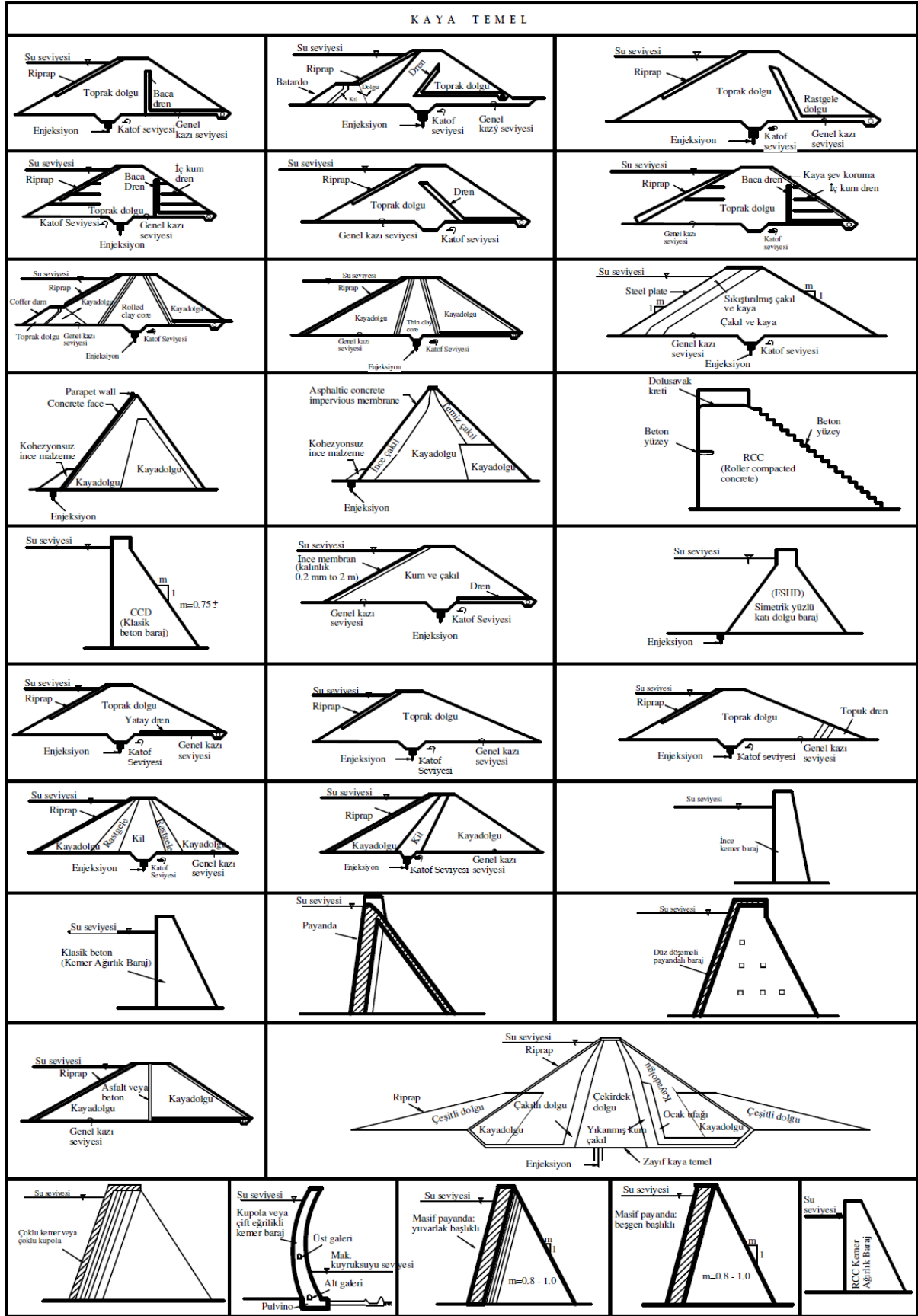
Kaya dolgu barajlar, gövdelerini kaya, kum-çakıl ve kil gibi malzemelerin oluşturduğu barajlardır. Bu barajlar, toprak dolgu, kil çekirdekli (merkezi, eğimli) kaya dolgu, ön yüzü beton veya asfalt kaplı kaya dolgu olarak sıralanabilir. Baraj gövdesinin merkezinde bulunan geçirimsiz kil zonu ile geçirimsizliğin sağlandığı barajlar kil çekirdekli kaya dolgu baraj olarak adlandırılır. Türkiye'nin en büyük barajlarından biri olan Atatürk barajı da kil çekirdekli kaya dolgu barajdır. Bu barajlara dolgu malzemeleri seçilirken birçok kriter aranmaktadır. Bu da



dolgu malzemesi seçiminin önemi ortaya çıkartmaktadır. Örneğin suda çözünebilir, inorganik ve likit limiti 80'in üzerinde olan geçirimsiz malzeme kullanılmamalıdır. Sağlam kaya malzemesinin kullanılması tercih edilir. Kazı esnasında veya dolgu esnasında ezilebilen ve dolguyu geçirimsiz hale getiren malzeme kullanılmamalıdır. Soğuk iklimlerde don tehlikesine karşı dış kabuk dolgularında daha sağlam malzeme kullanılmalıdır [23].

Barajlarda kaya malzemesi, gövdenin menba yüzünün korunmasında, kaya dolgu riprap olarak ve gövdenin dolgu zonunda dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Baraj dolgusunun dış zonlarında özellikle menba yüzünde kullanılacak olan kaya malzemesinin doğal tesirlere karşı dayanıklı olması hava ve su etkilerine, don ve dalga tesirlerine mukavemet gösterebilir olması gerekmektedir. Dolguda iç zonlarda kullanılan kaya malzemelerin özellikleri kullanma yerine göre, menba veya mansapta olmaları halinde farklı olabilirler. Su ile temas halinde, özelliklerini kısmen de olsa değiştiren, kaybeden kaya malzemeleri menba zonunda kullanılmayıp, mansap zonunda belirli bölgelerde kullanılabilir [24].

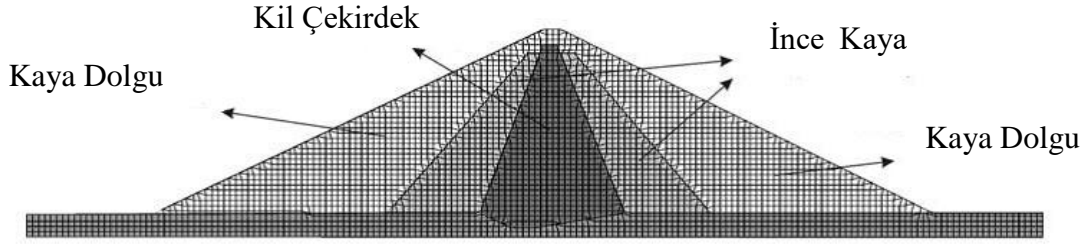
Kaya malzemedede istenen en önemli özellik, sağlam ve büyük parçalar halinde olmasıdır. Kaya malzeme etüdü, yüzeyde görülen kayalık bölgenin incelenmesiyle başlar, ardından karotlar alınarak kayacın tüm özellikleri belirlenerek dolguda kullanılıp kullanılmayacağına karar verilir [25]. Kaya temeller üzerinde inşa edilebilecek baraj alternatifleri Şekil 3'de sunulmuştur [26].



**Şekil 1.3** Kaya temel üzerine inşa edilen farklı baraj en kesitlerinin alternatifleri [26].

#### 1.4. KİL ÇEKİRDEKLİ KAYA DOLGU BARAJLAR

Gövdelerini kaya, kum-çakıl ve kil gibi malzemelerin oluşturduğu barajlara kil çekirdekli kaya dolgu barajlar denilmektedir. Gövdesinin merkezinde bulunan geçirimsiz kil malzemesi ile geçirimsizliğin sağlandığı dolgu barajlar da Merkezi Kil Çekirdekli Dolgu Barajlar olarak adlandırılır. Şekil 1.4’te tipik kaya dolgu barajın kısımları sunulmuştur.



Şekil 1.4 Tipik kaya dolgu baraj kesiti [13].

Kil çekirdekli kaya dolgu barajlar, farklı amaçlar için değişik şekillerde tasarlanmaktadır. Gövde mansap eteğini toparlamak için dolgu şevini dikleştirmek, baraj aksındaki jeolojik olumsuzluklardan kil çekirdek temelini çıkarmak veya kil malzemesinin miktarını azaltmak için kil çekirdeğin temelini menbaya tarafına kaydırmak gerekebilir. Kil çekirdeği bu şekilde tasarlanan barajlar “Eğik Kil Çekirdekli Dolgu Barajlar” olarak adlandırılır.

Baraj yerinin topoğrafyası, jeolojisi ve temel şartları, baraj yüksekliği, baraj dolgusunda kullanılacak malzemenin fiziksel özellikleri, miktarı, taşıma mesafesi, deprem durumu vb. göz önüne alınarak baraj kabuk dolgusunda kullanılmak üzere seçilen malzemeye göre kil çekirdekli dolgu barajlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- a) Homojen gövdeli barajlar
- b) Zonlu Barajlar
  - Kum çakıl dolgu (yarı geçirimli ve geçirimli)
  - Kaya dolgu
  - Karışık zonlu dolgu

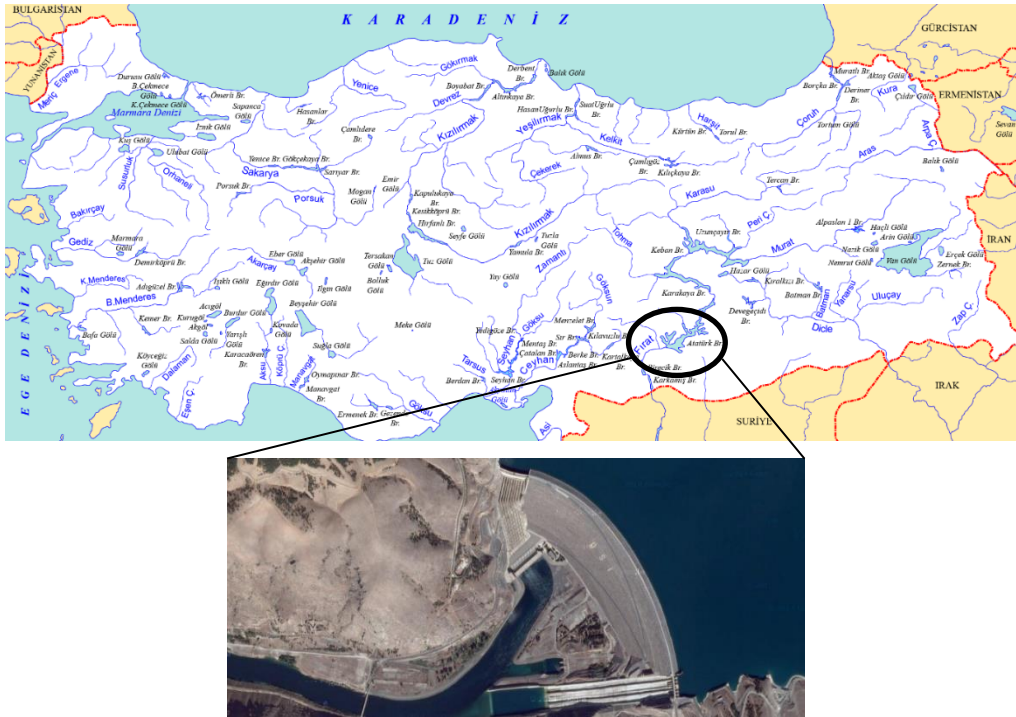
Kil çekirdekli kaya dolgu barajlarda gövde dolgusunda kullanılan malzemenin granülometresine göre filtre tahkiki yapılarak filtre zonları tasarlanmaktadır. Baraj rezervuar seviyesinin aniden düşmesi durumunda kilin menba kabuk dolgusuna, su sızmasını önlemek

için düşey filtre tasarlanır. Sızma, dolgu barajlarda görülmekte olan en büyük tehlikelerden biridir. Kil çekirdek dolgusundan sızan suların mansap şevinden çıkmasını, buna bağlı olarak da borulanma riskini yok etmek ve sızan suların dolgulara zarar vermeden tahliye edilmesini sağlamak amacıyla kil çekirdek mansabına düşey filtre ve buna bağlı olarak da mansap dolgu tabanında yatay filtre tasarlanır.

Baraj mansap dolgusunda kum çakıl veya kil malzemesi kullanılması halinde, mansap şevi yağmur sularının erozyonuna maruz kalacaktır. Bunu önlemek amacı ile mansap şevinin üzerine koruyucu örtü tabakası tasarlanır [2].

## 1.5 ATATÜRK BARAJI

Atatürk Barajı, Şanlıurfa İlinin Bozova İlçesine 24 km uzaklıkta kurulmuştur. Fırat nehri üzerinde inşa edilen Atatürk Barajı, hem enerji hem de sulama amaçlı yapılmıştır. Barajın, Türkiye'deki konumu Şekil 1.5'te sunulmuştur.



Şekil 1.5 Atatürk Barajının jeopolitik konumu.

Güney-Doğu Anadolu Projesi (GAP) projesi kapsamında planlanan ve yapılan Atatürk Barajı, Türkiye'nin en büyük barajlarından birisidir. Şekil 6'da Atatürk Barajının genel görünümü sunulmuştur. 169 metre yüksekliğinde olan bu baraj, sulama ve enerji amaçlı yapılmıştır. Kret

yüksekliği 549 metre, kret uzunluğu 1664 metre ve kret genişliği ise 15 metre'dir. Ayrıca gövde dolgu hacmi  $85.500 \times 10^3 \text{ m}^3$  maksimum su depolama hacmi  $48.7 \text{ km}^3$  ve rezervuar alanı  $817 \text{ km}^2$ 'dir. Barajın dolu savak yapısında sol tarafında 6 adet ana kapak ve 2 adet yardımcı kapak bulunmaktadır. Ana kapakların eni 16 metre ve yüksekliği ise 18 metre'dir. Buna ek olarak, yardımcı kapakların eni 5 metre ve yüksekliği ise 8 ve 10 metre'dir. Ana kapakların her biri yaklaşık 240 ton ağırlığındadır.



**Şekil 1.6** Atatürk Barajı.

Barajın dolu savağı, toplam  $1275000 \text{ m}^3$  beton hacmine sahiptir. Ana kapakların maksimum boşaltma kapasitesi  $16800 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dür. Yardımcı kapaklarla birlikte ise bu sayı  $22000 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye çıkmaktadır. Barajın su alma yapısı sağ kısmında 70 metre yüksekliğinde ve 200 metre uzunluğundadır. Su alma yapısının toplam beton hacmi ise  $580\,000 \text{ m}^3$ 'dür. Sağ kısmında inşa edilen hidroelektrik santral 49 metre genişliğe 55 metre yüksekliğe ve 257 metre uzunluğa sahiptir. 8 adet düşey eksenli Francis Tipi türbinlerin kurulu gücü  $2400 \text{ MW}$ 'tır. Atatürk Barajı, 42 zonlu kaya dolgudan oluşmaktadır ve dolgu hacmi  $84,5$  milyon  $\text{m}^3$ 'tür [27]. Çizelge 1.1'de barajın genel özellikleri verilmektedir [28].

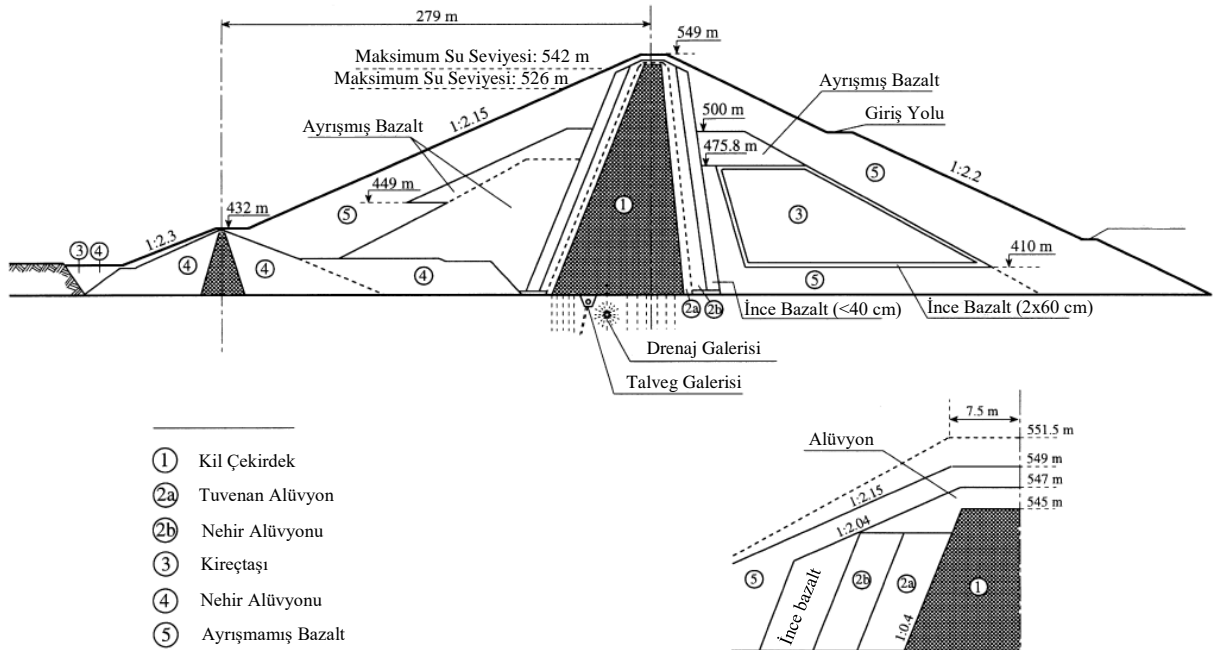
**Çizelge 1.1** Atatürk Barajının genel özellikleri [28].

Tip	Kil Çekirdekli Kaya Dolgu Baraj
Amaç	Sulama ve Enerji
Hacim	$84.5 \times 10^6 \text{ m}^3$
Kret Yüksekliği	549 m
Kret Uzunluğu (Dolgu)	1664 m
Kret Genişliği	15 m
Temel Genişliği	184 m
Talvegten Yükseklik	169 m
Maksimum Su Seviyesi	542 m
Minimum Su Seviyesi	526 m
Minimum Kullanılabilir Su Seviyesi	513 m
Maksimum Rezervuar Hacmi	$48.7 \text{ km}^3$
Minimum Rezervuar Hacmi	$29.4 \text{ km}^3$
Rezervuar Alanı	$817 \text{ km}^2$
Drenaj Alanı	$92338 \text{ km}^2$
Türbin Sayısı	8
Kurulu Kapasite	2400 MW
Yıllık Enerji Üretimi	8900 GWh

Dünya’da günümüzü dek birçok kaya dolgu baraj yapılmıştır ve halen yapılmaktadır. Bu barajlar gövde hacimlerine ve gövde yüksekliklerine göre farklılık göstermektedir. Atatürk Barajı’nın, dolgu hacmine göre, dünyada inşa edilmiş olan barajlar arasındaki yeri Çizelge 1.2’de belirtilmektedir. Atatürk Barajı, gövde hacmine göre Dünya’da inşa edilen kaya dolgu barajlar arasında 10. sırada yer almaktadır. Bu da Atatürk Barajı’nın çok büyük gövde hacmine sahip olduğunun göstergesidir.

**Çizelge 1.2** Gövde yükseklikleri ve gövde hacimleri bakımından dünyanın ilk 10 barajı [29].

Gövde Yüksekliklerine Göre				Gövde Hacimlerine Göre		
Sıra No	Baraj Adı	Ülke	Yükseklik (m)	Baraj Adı	Ülke	Gövde Hacmi × 1000 m <sup>3</sup>
1	Rogun	Tacikistan	335	Syncrude Tailings	Kanada	540 000
2	Nurek	Tacikistan	300	Chapeton	Arjantin	296 200
3	Grande Dixence	İsviçre	284	Pati	Arjantin	238 180
4	Inguri	Gürcistan	272	New Cornelia Tail.	ABD	209 500
5	Boruca	Kosta Rika	267	Tarbela	Pakistan	121 720
6	Vaiont	İtalya	262	Kambaratinsk	Kırgızistan	112 200
7	Chicoasen	Meksika	261	Fort Pect	Montana	96 049
8	Manuel M.Torres	Meksika	261	Lower Usuma	Nijerya	93 000
9	Alvaro Obregon	Meksika	260	Cipasang	Endonezya	90 000
10	Mauvoisin	İsviçre	250	<b>Atatürk</b>	<b>Türkiye</b>	<b>84 500</b>



**Şekil 1.7** Atatürk Barajının en kesiti [28].

Şekil 1.7’de Atatürk Barajı’nın en kesiti görülmektedir. Barajın gövde dolgusunda, kil, bazalt, alüvyon, kireçtaşı gibi dolgu malzemeleri bulunmaktadır. Baraj gövdesinde, ince bazalt, az

aşınmış bazalt ve sağlam bazalt olmak üzere 3 farklı bazalt kullanılmıştır. Ayrıca gövdede filtre malzemesi olarak ince filtre ve kalın filtre olmak üzere 2 farklı filtre kullanılmıştır. Barajın memba ve mansap bölgesinde yoğun olarak bazalt malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 1.8 Atatürk Barajının genel planı [28].

Atatürk Barajı'nın genel yapım planı Şekil 1.8'de görülmektedir. Bu şekilde, her numara barajın bir bölgesini temsil etmektedir. 1 numara, Atatürk Barajının gövdesinin bulunduğu yeri temsil etmektedir. Barajın giriş kısmı ise 2 numara ile temsil edilmektedir. Barajda elektrik üretiminin sağlandığı en önemli kısımlardan biri olan türbinler 3 numaralı bölgede bulunmaktadır. 4 numaralı kısım, elektrik santralini temsil etmektedir. Derivasyon tünelleri 5 numaralı bölgede ve barajın dolu savağı da 6 numaralı bölgede bulunmaktadır. Memba tarafında bulunan batardo, 7 numara ile temsil edilmektedir. Ayrıca mansap tarafındaki batardo ise 8 numaralı bölgede bulunmaktadır. 9 numaralı bölge şalt sahasını göstermektedir. Barajın etrafında kalıcı yerleşim yerleri bulunmaktadır. 10 numaralı alan kalıcı yerleşim yerini temsil etmektedir. 11 numaralı yer ise enjeksiyon galerilerini temsil etmektedir.



Atatürk Barajı'nın gövde dolgusunda, yoğun olarak bazalt malzemesi kullanılmıştır. Parçalanmış halde dolgu malzemesi olarak kullanılan bazaltın, barajın inşa aşamasında memba ve mansap kısımlarındaki görünüşü Şekil 1.9 ve 1.10'da gösterilmiştir.



**Şekil 1.9** Memba kısmından parçalanmış bazalt malzemesinin görüntüsü [28].



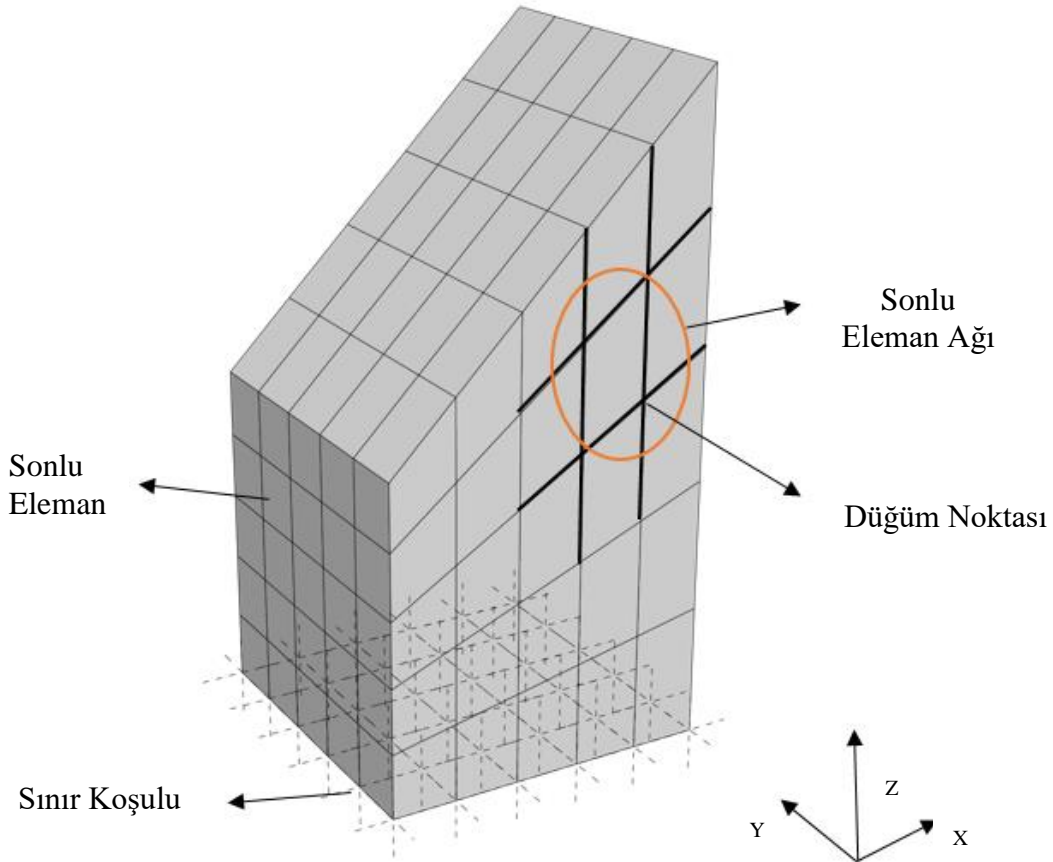
**Şekil 1.10** Mansap kısmından parçalanmış bazalt malzemesinin görüntüsü [28].



## BÖLÜM 2

### FLAC (FAST LAGRANGIAN ANALYSIS OF CONTINUA) 3D YAZILIMI

FLAC programı, ilk olarak 1995 yılında iki boyutlu sayısal analiz programı olarak geliştirilmiştir. 1997 yılında ise, üç boyutlu modelleri analiz yapabilecek kapasiteye getirilerek FLAC3D adıyla araştırmacılara sunulmuştur. Bu program Lagrangian hesaplama mantığıyla çalışmaktadır ve Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Method) prensibine dayalı bir çözümlenme yapmaktadır. FLAC 3D programında modelleme yaparken, ağ oluştururken veya malzeme atarken programın dilini çok iyi analiz etmek gerekmektedir. Modelleme yaparken, düğüm noktaları girilip geometriler oluşturulur ve oluşturulan geometriler belirli aralıklara bölünerek sonlu eleman ağı oluşturulur. Şekil 2.1’de, temsili bir sonlu eleman modelinin kısımları belirtilmiştir.



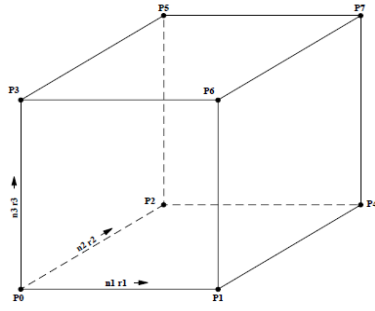
Şekil 11 FLAC 3D sonlu eleman modelinin kısımları

FLAC3D yazılımı, birçok mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Ancak esasında yer bilimleri mühendisliği alanındaki uygulamalar için geliştirilmiştir. Bu yazılımın kullanım alanları aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

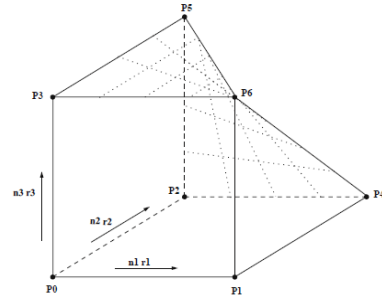
- Dolgu barajların statik ve deprem analiz sonuçlarına göre gerilme ve deformasyon sonuçlarının irdelenmesi.
- Temellerin tasarımında deformasyonların ve taşıma kapasitelerinin hesaplanması.
- Tünel gibi özel yapıların tasarımında deformasyon oluşumlarının değerlendirilmesi.
- Zeminlerin güvenlik katsayısının hesaplanması.
- Maden araştırma projelerinde fay yapısının ve etkisinin değerlendirilmesi.
- Konsolidasyon ve yeraltı su hareketi araştırmalarında kullanılan doygun ve kısmen doygun olan ortamdaki akışkanın hareketi, boşluk suyu basıncının oluşumu ve sönümlenmesi olaylarının incelenmesi.
- Tünel ve maden kazılarında titreşim ve patlama nedeniyle oluşacak dinamik etkilerin incelenmesi ve birçok mühendislik dallarının problemlerine çözüm bulmak için kullanılmaktadır [30].

## **2.1. FLAC3D PROGRAMI İLE MODELLEME YAPMANIN TEORİK TEMELİ**

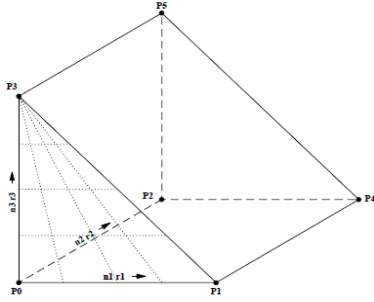
FLAC3D zaman tanım alanında eksplisit sonlu farklar yöntemine dayalı çalışan bir yazılımdır. Programda dinamik analiz yapılırken, ortamın mekaniği, bünye denklemlerinden elde edilmektedir. FLAC3D yazılımı, modelleme yapıldıktan sonra modelin dengeye yakın durumundaki gerilme ve şekil değiştirmesiyle ilgilenmektedir. Doğrudan denge durumunu incelememesine rağmen modellemeye denge denklemlerinin doğrudan dahil edilmesi bu programın en önemli özelliklerinden birisidir. FLAC3D’de tam hareket denklemleri kullanılmaktadır. Bundan dolayı hem statik hem de dinamik modda kullanılabilir [30]. Programda modellenen ağa sonlu elemanlar ağı denilmektedir. FLAC3D yazılımında yapımızı birçok farklı şekilde modelleyebilir ve sonlu elemanlar ağı oluşturabiliriz. Programda bulunan elemanlar ve ağ biçimleri Şekil 2.2’deki gibi gösterilebilir.



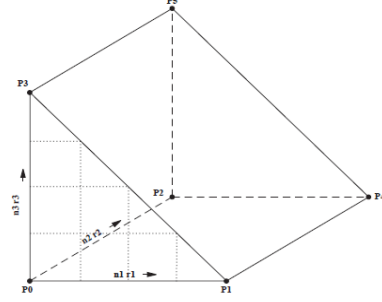
a) Brick Eleman



b) Degenerate Brick Eleman



c) Wedge Eleman



d) Uniform Wedge Eleman

**Şekil 12** FLAC 3D programında bulunan mesh elemanlar

Modelleme yapılırken bu elemanlardan biri kullanılır ve elemana uygun mesh şekli uygulanır. Atatürk barajı üçboyutlu modellenirken, brick elemanlar, wedge elemanlar ve uniform wedge elemanlar kullanılmıştır.

## 2.2. BAŞLANGIÇ VE SINIR KOŞULLARI

FLAC3D programında, herhangi bir problem çözülmek istediği zaman, problemin başlangıçtaki koşulları şunlardır:

- 1- Yüzeysel çekim
- 2- Yığılmış noktasal yükler
- 3- Şekil değiştirmeler

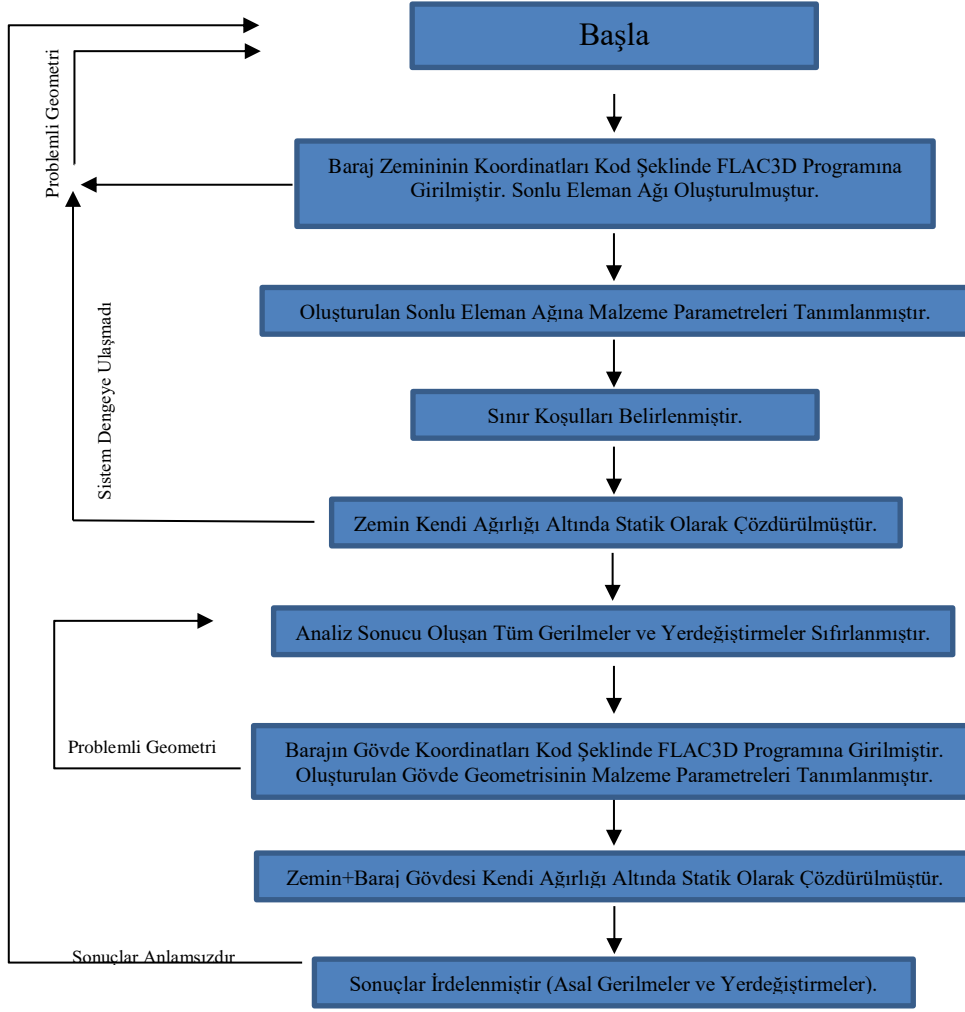
Tüm bunlara ek olarak, sisteme dış kuvvetler ve başlangıç gerilme koşulları da eklenebilmektedir.

FLAC3D'de bir problem çözülmek istendiğinde, problemin başlangıç sınır koşulları hiç el değmemiş bir arazi koşulları olarak varsayılmaktadır. Yani uygulamasında tüm gerilmeler,

yerdeğiştirmeler ve düğüm noktalarındaki hızlar ilk başta sıfır olmakta, sonrasında ise uygulanması gereken başlangıç gerilmeleri atanmaktadır. Eğer noktasal bir yük uygulamak istediğimiz zaman, hedef düğüm noktasına uygulanmalı ve sınırdaki şekil değiştirmeler düğüm noktalarındaki hız miktarıyla hesaplanmaktadır. Yüzeysel çekim kuvveti de program tarafından statik olarak denge durumunda olan eşdeğer düğüm noktasındaki yüklere dönüştürölmektedir [30] Bu çalışmada ise, bir analiz yapıldıktan sonra başka bir analiz yapılmak istendiğinde, önceki analizde oluşan tüm gerilme ve yerdeğiştirmeler sıfırlanıp yeni analize geçilmiştir. Çünkü yeni analiz yapılırken, analizi yapılacak arazi hiç el değmemiş bir arazi olarak kabul edilmelidir.

### **2.3. ANALİZ HESAP ADIMLARI**

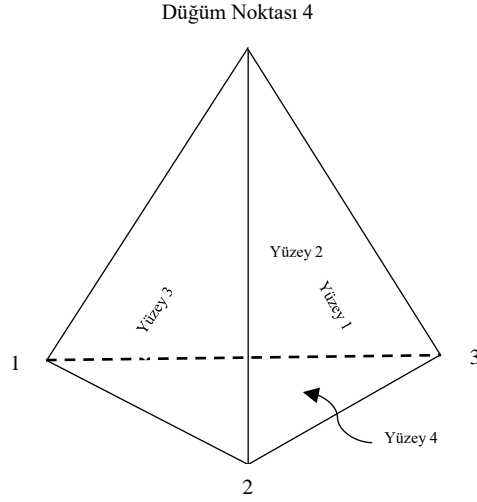
FLAC3D’de modelleme yaparken ve hesap yapılırken izlenen yol Şekil 2.3’de sıralanmaktadır. Modellemeyi yapmak için FLAC3D’nin öngördüğü kod yazma kuralına uymak çok önemlidir. Çünkü herhangi bir düğüm noktası yanlış yazıldığı takdirde program hata verecektir. Dikkat edilmesi gereken bir diğer husus, sınır koşullarının doğru girilmesidir. Eğer sınır koşulları yanlış girilirse program çözüm yapmaz ve “illegal geometri” hatası verip programı kapatmaktadır. FLAC3D programı çözüm yaparken sistem dengeye gelene kadar analizi sürdürür. Eğer sistem dengeye gelmiyorsa sabit bir değere yaklaşmaya başlayacak, bu da sistemin bir kısmı veya tamamının plastik akma durumunda olduğunun göstergesi olacaktır. Bunun çözümü ise geometri, malzemeler ve sınır koşulları tekrar kontrol etmektir.



Şekil 13 FLAC 3D programında statik çözüm için akış diyagramı.

## 2.4. SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Bu kısımda sonlu farklar yöntemi ile ilgili temel bilgiler sunulmaktadır. Hareket denklemlerinin düğüm noktalarındaki formülasyonunun başlangıcı olan düzgün dörtyüzlünün, şekil değiştirme oranı bileşenlerinin sonlu farklar yöntemiyle ifadesi verilmektedir. Sonlu elemanlar ağı modellenen probleme göre en az bir adet dörtyüzlü elemandan teşkil edilebilmektedir. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi düzgün dörtyüzlünü düğüm noktaları 1, 2, 3, 4 olarak numaralandırılmaktadır.



**Şekil 14** Düzgün dörtyüzlü.

Her bir düğüm noktasına karşılık gelen yüzey  $n$ . Yüzey olarak adlandırılmaktadır. Gauss ıraksama teorisi dörtyüzlüye uygulandığında aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$\int_V v_{i,j} dV = \int_S v_i n_j dS \quad (2.1)$$

Bu integral ifadeleri sırasıyla dörtyüzlü elemanın hacim ve yüzeyi üzerinde alınmaktadır. Bu bağıntıda  $V$  hacim,  $S$  alan ve  $[n]$  ise dörtyüzlünün her yüzünde yüzey dışı yönündeki birim vektördür.

Bir sabit şekil değiştirme oranlı dörtyüzlünün hız alanı doğrusal varsayıldığında,  $[n]$ 'ile tanımlanan birim vektörü de dörtyüzlünün her yüzeyinde sabit kalmaktadır. Buradan denklem 2.1'deki integrasyon sonucu aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$V v_{i,j} = \sum_{f=1}^4 \bar{v}_i^{(f)} n_j^{(f)} S^{(f)} \quad (2.2)$$

Bu denklemde,  $(f)$ ,  $f$  cephesi üzerindeki değişkenin değeriyle ilişkilidir.  $\bar{v}_i$  ise hızın bileşeninin ortalama değeridir. Hız değişiminin lineer olduğu durumda,

$$\bar{v}_i^{(f)} = \frac{1}{3} \sum_{l=1, l \neq f}^4 v_i^l \quad (2.3)$$



Bu denklemdeki 1, l'inci düğüm noktasındaki değer ile ilişkilidir. Denklem 2.3, denklem 2.2'de yerleştirildiğinde,

$$V_{v_{i,j}} = \frac{1}{3} \sum_{l=1}^4 v_l^i \sum_{f=1, f \neq l}^4 n_j^{(f)} S^{(f)} \quad (2.4)$$

İfadesi elde edilir. Denklem 2.1'de yerine 1 konulup iraksama teorisinin uygulanmasıyla;

$$\sum_{f=1}^4 n_i^{(f)} S^{(f)} = 0 \quad (2.5)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Elde edilen son bağıntının kullanıldığında ve diğer taraftan da Denklem 2.4 V'ye bölüldüğünde,

$$v_{i,j} = -\frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 v_l^i n_j^{(l)} S^{(l)} \quad (2.6)$$

elde edilmektedir. Dolayısıyla şekil değiştirme oranı tensoru aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir [30].

$$\xi_{i,j} = -\frac{1}{6V} \sum_{l=1}^4 (v_l^i n_j^{(l)} + v_j^l n_i^{(l)}) S^{(l)} y_t = \phi_1 \cdot y_{t-1} + \epsilon_t \quad (2.7)$$

## 2.5. MOHR – COULOMB YENİLME ÖLÇÜTÜ

Mohr Coulomb yenilme ölçütü literatürde “Coulomb” ve “Coulomb – Navier” ölçütü olarak da anılır. Yenilme ölçütleri normal olarak üç gruba ayrılır. Bunlar, kuramsal, fiziksel ve görgül yenilme ölçütleridir. Mohr Coulomb yenilme ölçütü ise fiziksel yenilme ölçütü grubuna girer. 1773 yılında Coulomb tarafından ortaya atılan bu ölçüt, 1776'da yayımlanmıştır. Bu ölçüte göre; “kayma gerilmesinin yol açacağı bir kırılmaya malzemenin kohezyonu ( $c$ ) ve muhtemel kırılma yüzeyine etkiyen normal gerilmenin bir sabitle çarpımı karşı koyar.” Buna göre Mohr-Coulomb (M-C) yenilme ölçütünü veren bağıntılar denklem (2.8.a) ve (2.8.b)'de sunulmaktadır. Verilen bu iki denklem birbirine eşittir [31, 32].

$$\tau = c + \sigma\mu \quad (2.8.a)$$

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.8.b)$$

Burada;

$c$  = kohezyon (normal gerilmenin etkilediği bir yüzey boyunca malzemeyi kırmak için gerekli kayma gerilmesinin değeri)

$\phi$  = içsel sürtünme açısıdır (kırılma anında kırılma yüzeyinde etkili olan sürtünme açısı)

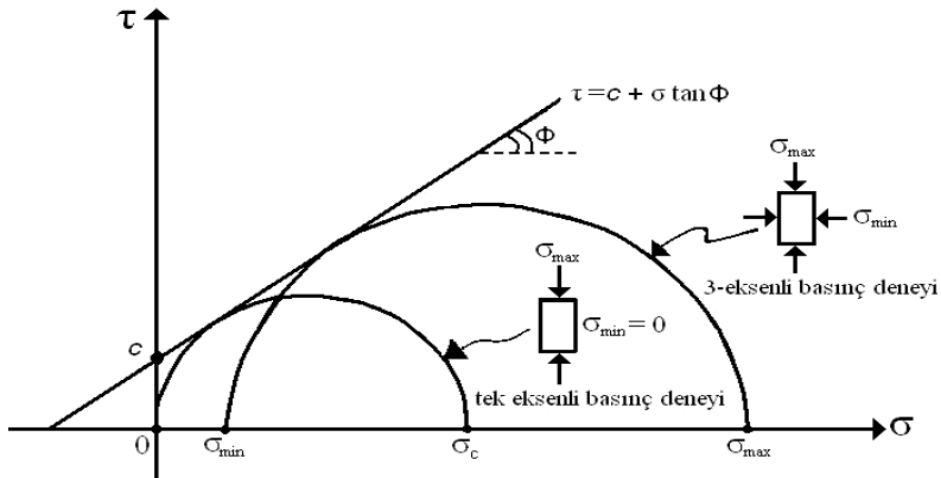
$\tau$  = kırılma anında etkiyen kayma gerilmesi,

$\sigma$  = kırılma yüzeyine etkiyen normal gerilme,

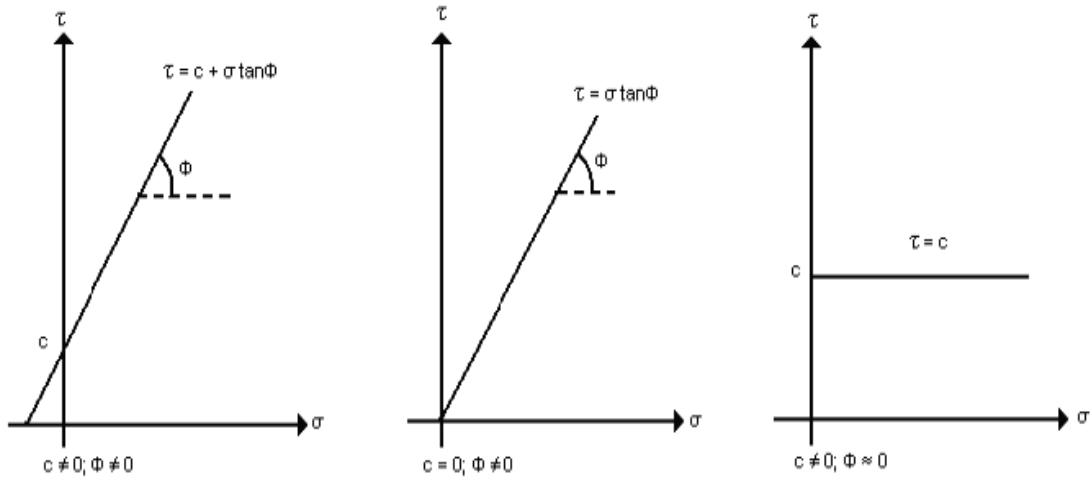
$\mu$  = içsel sürtünme katsayısı =  $\tan \phi$

Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre, dayanım zarfının Mohr diyagramındaki görünüşü Şekil 2.5'de görülmektedir. Burada, üç eksenli ve tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin yapılması sonucu elde edilen iki boyutlu Mohr daireleri, malzemenin yenilme anındaki gerilme durumlarını teşkil ederler ve dayanım zarfına teğettirler.

M-C yenilme ölçütü birçok mühendislik dalında kullanılmaktadır ve birçok jeolojik malzeme davranışını modellemede başarılı sonuçlar vermiştir. Bu malzemelere örnek olarak; kohezyonlu zeminleri, kayaları, suya doymun zeminleri ve kohezyonsuz zeminleri sayabiliriz. Mohr Coulomb yenilme ölçütünün bu malzemelere uygulanışını gösteren grafikler Şekil 2.6'da verilmektedir [32].



Şekil 15 Mohr - Coulomb ölçütünün Mohr diyagramında gösterimi [32].



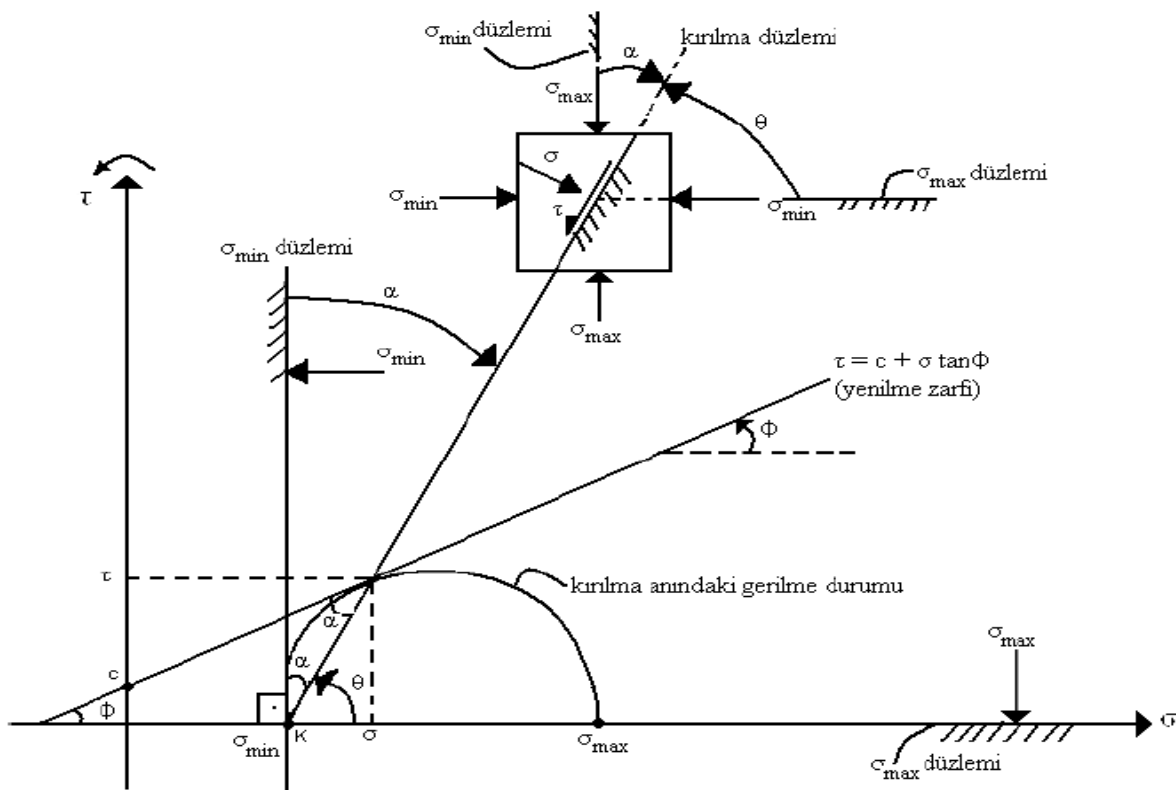
a- Kaya ve kohezyonlu zemin

b- Kohezyonsuz zemin

c- Suyu doymuş zemin.

Şekil 16 Mohr - Coulomb dayanım zarfının jeolojik malzemelere uygulandığı [32].

Mohr coulomb yenilme ölçütüne göre, kırılma anında etkiyen asal gerilmeler arasındaki ilişki doğrusallık arz eder. Bu duruma ait iki boyutlu kırılma düzlemi ve ona etkiyen gerilmelerin Mohr diyagramında gösterimi Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 17 Üç eksenli basınç dayanımı deneyinde kırılma yüzeyine etkiyen gerilmelerin Mohr diyagramında gösterimi [31].

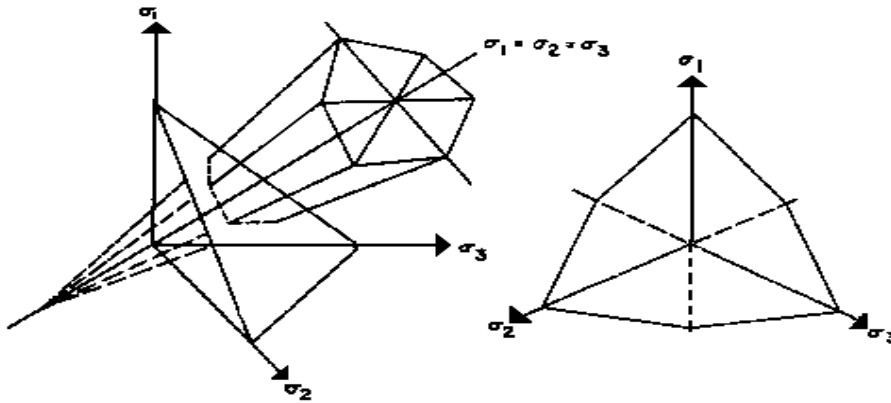
Malzemenin kohezyonu ve içsel sürtünme katsayısı bilirse; Denklem 2.8’de verilen, kırılma anındaki maksimum ve minimum asal gerilmeler arasındaki ilişki elde edilir.

$$\sigma_{\max} = [2c \cos \phi + \sigma_{\min} (1 + \sin \phi)] / (1 - \sin \phi) \quad (2.8)$$

Bu eşitlikte;  $\sigma_{\max}$  = en büyük asal gerilme ve  $\sigma_{\min}$  = en küçük asal gerilmedir.

M-C yenilme ölçütünün üç boyutlu asal gerilmeler uzayındaki görünümü ve oktahedral düzlemdeki izi Şekil 2.8’de görülmektedir. Ayrıca Denklem 2.8’de verilen ifadenin diğer bir yazılışı Denklem 2.9’da görülmektedir.

$$\sigma_{\max} = (\sigma_c)_{M-C} + N \phi \sigma_{\min} \quad (2.9)$$



**Şekil 18** Mohr - Coulomb ölçütünün asal gerilmeler uzayındaki görünümü ve oktahedral düzlemindeki izi [33].

Burada,  $(\sigma_c)_{MC}$  = malzemenin M-C yenilme ölçütünün öngördüğü tek eksenli basınç dayanımı olup, Denklem 2.10’da verilmektedir.

$$(\sigma_c)_{MC} = (2c \cos \phi) / (1 - \sin \phi) \quad (2.10)$$

Burada;

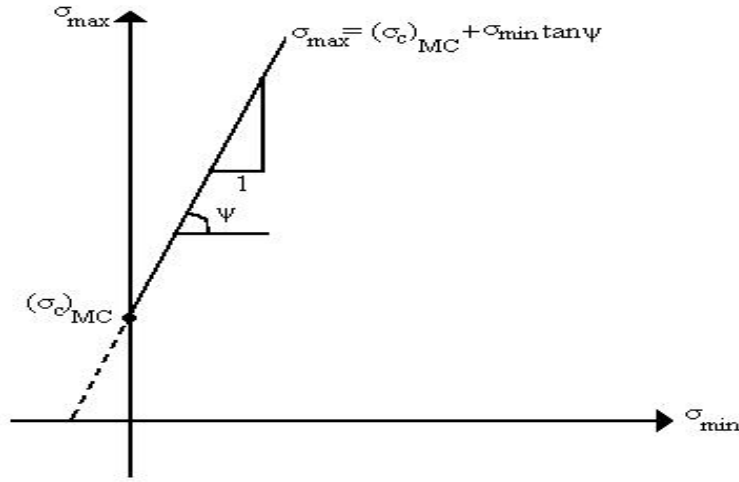
$N \phi$  = üç eksenli dayanım faktörü olup Denklem 2.11a ve 2.11b’de verilmektedir. Ayrıca  $N \phi$  dayanım zarfının asal gerilmeler diyagramındaki eğimi olup, literatürde [34] tarafından pasif

toprak basıncı ( $K_p$ ) olarak nitelenir. Şekil 19’da gösterildiği gibi  $N\phi$  aynı zamanda “ $\tan \psi$ ” ifadesine eşittir.

$$N\phi = K_p = \tan \psi = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) \quad (2.11a)$$

$$N\phi = \tan^2(45 + \phi/2) \quad (2.11b)$$

Denklem 2.11a ve 2.11b’de ifadeler birbirine eşittirler; farklı şekilde yazılmışlardır.



Şekil 19 Mohr - Coulomb ölçütünün asal gerilmeler diyagramında gösterimi [32].

Mohr – Coulomb yenilme ölçütünün diğer alternatif yazılışları Denklem 2.12, 2.13 ve 2.14’de verilmektedir.

$$\sigma_{\max} = [(\mu^2 + 1)^{1/2} - \mu] \sigma_{\min} + 2c \quad (2.12)$$

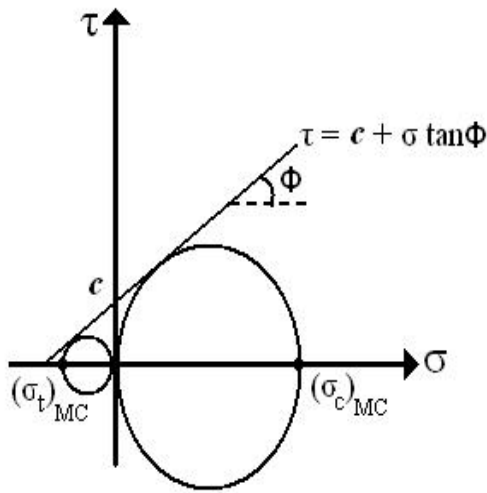
$$\sigma_{\max} = 2c \tan(45 + \phi/2) + \sigma_{\min} \tan^2(45 + \phi/2) \quad (2.13)$$

$$\sigma_{\max} = 2c (N_\phi)^{1/2} + \sigma_{\min} N_\phi \quad (2.14)$$

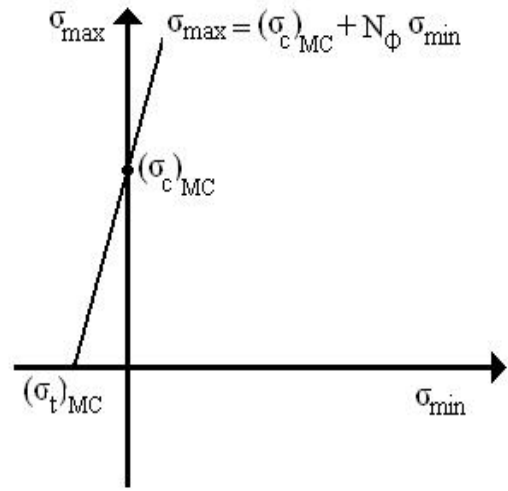
Kohezyonu ve içsel sürtünme açısı bilinen bir malzeme (kaya) için M-C yenilme ölçütünün öngördüğü tek eksenli çekme dayanımını belirten bağıntı Denklem 2.15’de verilmiştir.

$$(\sigma_t)_{MC} = -(2c \cos \phi) / (1 + \sin \phi) \quad (2.15)$$

Denklem 2.15’de verilen M-C yenilme ölçütünün tek eksenli çekme dayanımını ve tek eksenli basınç dayanımını karakterize eden iki boyutlu Mohr ve Haigh diyagramları Şekil 2.10’da verilmektedir.



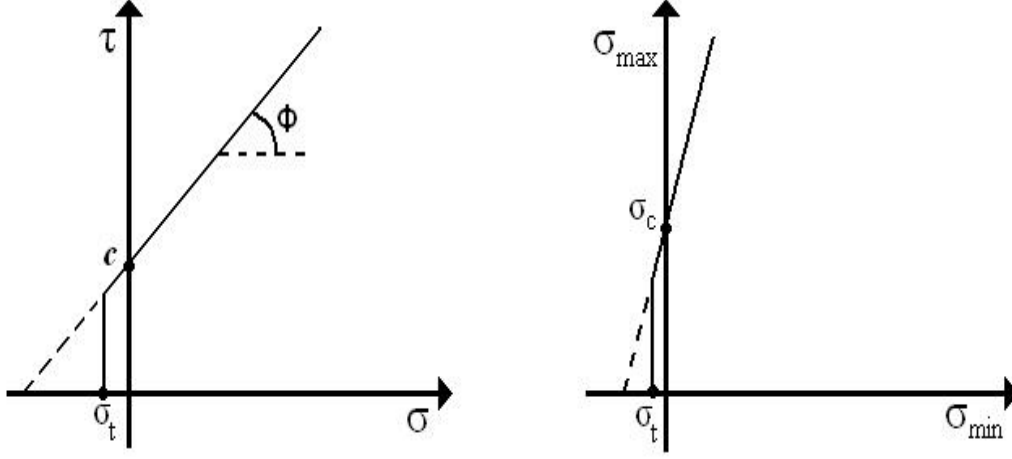
a) Mohr diyagramında gösterim.



b) Haigh diyagramında gösterim.

**Şekil 20** Mohr - Coulomb ölçütüne göre tek eksenli çekme ve basınç dayanımlarını belirten diyagramlar [32].

Mohr – Coulomb yenilme ölçütünün öngördüğü çekme dayanımı  $(\sigma_t)_{MC}$ , laboratuvar deneylerinden alınan dayanım değerlerine nazaran daha büyük çıkar. Bunun için uygulamalarda dayanım zarfı, deneysel olarak saptanan tek eksenli çekme dayanımına göre baz alınarak düzeltilir. Bu düzeltmeye İngilizce kaynaklarda “tension cut-off” denir. Düzeltme Şekil 2.11’de gösterilmektedir [32].



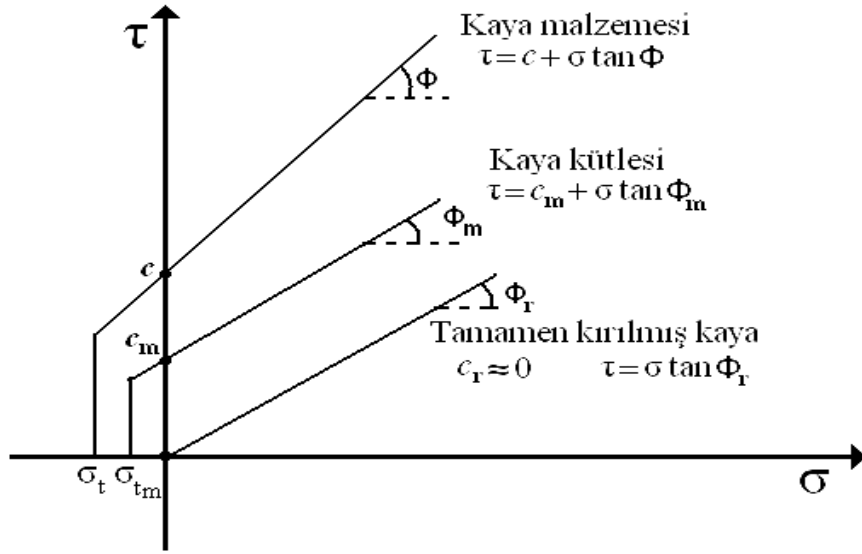
Şekil 21 Mohr - Coulomb dayanım zarfının çekme dayanımına göre düzeltilmesi [32].

Kaya malzemesinin dayanımını karakterize eden Mohr – Coulomb dayanım zarfı, tek ve üç eksenli basınç dayanımı deneylerinden bulunan değerlerin doğrusal bağlanım (regresyon) modeli kullanılarak çözümlenmesinden elde edilir. Gerçekte kayanın dayanımına dair sentezlenen bilgiler, kaya malzemesinin en yüksek dayanım zarfının genellikle doğrusal olmadığı savını doğrular. Buna göre, farklı yanal basınç aralıklarına göre farklı dayanım bağıntılarından yararlanılarak düzenlemeler yapılmaktadır.

Kaya kütlelerinin (rock mass) dayanım zarfının belirlendiği Mohr – Coulomb bağıntısı Denklem 2.16’da verilmektedir.

$$\tau = c_m + \sigma \tan \phi_m \quad (2.16)$$

Burada;  $c_m$  = kaya kütlelerine ait kohezyon ve  $\phi_m$  = kaya kütlelerine ait içsel sürtünme açısıdır. Eklemlili kaya kütlelerinde eklem açıklıklarının büyümesi ile kohezyon düşer. Buna göre, Şekil 2.12’de gösterildiği gibi kohezyonun çok düşük olduğu durumlarda  $c_m = 0$  alınır [32].



Şekil 22 Mohr - Coulomb ölçütünün kaya malzemesi ve kaya kütlesi için gösterimi [32].



## BÖLÜM 3

### ATATÜRK BARAJININ SONLU ELEMAN AĞININ OLUŞTURULMASI

Barajın sonlu eleman modeli yapılırken, oluşturulan geometrinin gerçek baraj geometrisine uygun olması, yapılan analiz sonuçlarının tutarlılığı açısından büyük öneme sahiptir. Yapılan bu çalışmada, Atatürk Barajı'nı modellerken oluşturulan geometrinin gerçek baraj geometrisiyle birebir aynı olmasına özen gösterilmiştir. Atatürk Barajı, kil çekirdekli kaya dolgu tipinde inşa edilmiş bir barajdır ve gövde dolgusunda birbirinden farklı mekanik özelliklerde birçok malzeme bulunmaktadır. Barajın gövde geometrisi oluşturulurken izlenen yol şu şekilde sıralanabilir;

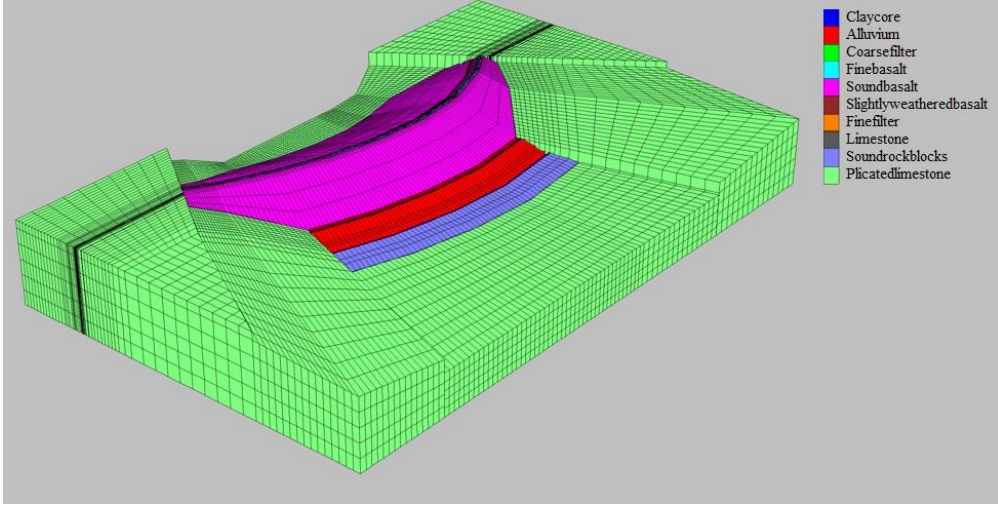
- 1- Atatürk Barajının gövdesinde birçok kesit bulunmaktadır. Herbir kesitin geometrik özellikleri birbirinden farklıdır. Tüm kesitler tek tek incelenmiştir ve kesitlerde bulunan düğüm noktalarının tüm koordinatları tek tek hesaplanmıştır.
- 2- Baraj gövde geometrisine uygun olarak, FLAC3D programında bulunan sonlu elemanlardan hangisinin kullanılacağına karar verilmiştir.
- 3- Hesaplanan düğüm noktaları, FLAC3D programının kodlama kurallarına uygun olarak kod şeklinde programa girilmiştir.

FLAC3D programında, Atatürk Barajı gibi oldukça kompleks geometriye sahip olan yapıları modellerken ve doğrusal olmayan analizlerini yaparken çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Çünkü çok fazla sayıda düğüm noktasına sahip bir geometride, girilen herbir düğüm noktasının koordinatlarını ondalıklı hanelerine kadar doğru girmek ve tüm komşu kenarları üst üste çakıştırmak gerekmektedir. Eğer küçük bir kenar, kendisine komşu bir diğer kenar ile üst üste çakışmıyorsa veya birbirlerinin üzerine binmişse, analizler sonuçlansa bile o çakışmayan yerlerde, olması gerekenden çok daha fazla gerilme ve deformasyonlar oluşmaktadır. Bu da analizin sağlıklı sonuç vermesini engellemektedir. Bu çalışmada modelleme yaparken ilk olarak, barajın boş rezervuarlı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, gerilme ve deformasyon sonuçları sıfırlandıktan sonra ise barajın memba kısmında suya temas eden yüzeylere su yükleri etki ettirilmiştir.

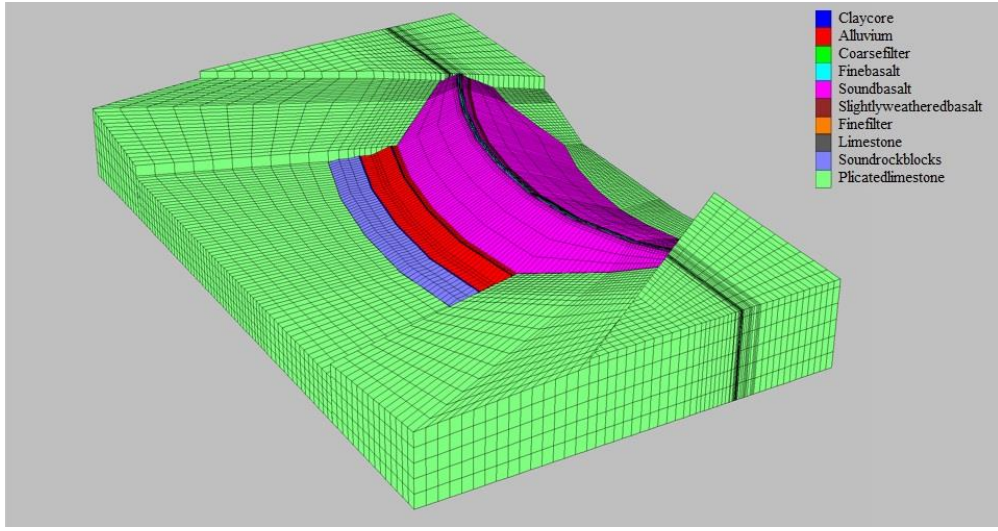
### 3.1 ATATÜRK BARAJININ BOŞ REZERVUARLI SONLU ELEMAN MODELİ

Atatürk Barajının sonlu eleman modeli oluşturulurken, toplam 15 000 adet düğüm noktasının koordinatları tek tek hesaplanmıştır. Bu hesaplanan düğüm noktalarının koordinatları FLAC3D programının kodlama mantığına uygun bir şekilde programa kodlanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde, FLAC3D programında bulunan brick, wedge ve uwedge ağ elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanın oluşturulması yaklaşık 7 aylık bir süre almıştır. Barajın gövdesi oluşturulduktan sonra gövde geometrisinin altına ve yanlarına doğru, zemin geometrisi eklenmiştir. Zemin kısmı, yanlara doğru baraj gövde yüksekliği kadar uzatılmıştır. Mansap kısmına doğru ise aynı şekilde baraj gövdesinin yükseliği kadar ve memba kısmına doğru baraj gövde yüksekliğinin 3 katı kadar uzatılmıştır. Son olarak aşağı taraflara doğru da baraj gövde yükseliği kadar uzatılmıştır.

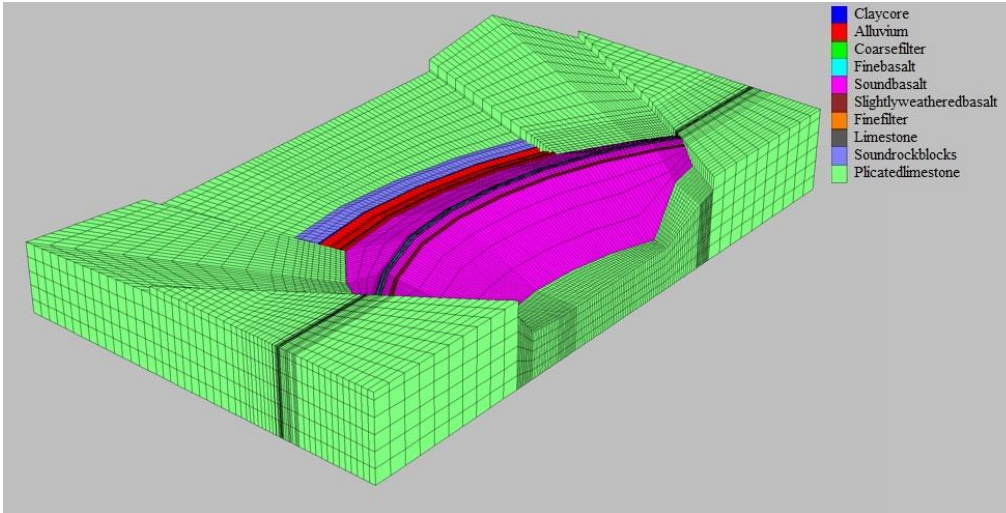
Atatürk Barajı'nın sonlu eleman modelinde, toplam 300 000 adet eleman bulunmaktadır. Herbir elemanın bir hacmi temsil ettiği düşünülürse, bu modelin çok yoğun bir geometriye sahip olduğu sonucuna varılabilir. Sonlu eleman ağı oluşturulurken, toplam 3 adet sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Bu da, model oluşturulduktan sonraki toplam 3 aylık bir süreçte oluşturulmuştur. İlk oluşturulan model, çok yoğun bir mesh ağına sahipti ve bu da herbir statik analizin 7 gün sürmesine sebep olmuştur. Bu nedenle yaşanan zaman kaybından ötürü bu modelden vazgeçilmiştir. Daha sonra, 2 sonlu eleman ağı daha oluşturulmuş ve en uygun sonlu eleman ağının hangisi olduğuna karar verilmiştir. Baraj gövdesinin düğüm noktaları ile baraj temelinin düğüm noktalarının birbiri ile üst üste çakışmasına özen gösterilmiştir. Ayrıca tüm model sonlu eleman ağına ayrıldıktan sonra, herbir hacmin ağ elemanlarının etrafındaki komşu hacimlerin ağ elemanlarıyla birbirleri ile üst üste çakışmalarına özen gösterilmiştir. Baraj gövdesi düz bir geometriye sahip olmadığı için, oluşturulan baraj temeli de düz bir geometriye sahip değildir. Atatürk Barajı'nın sonlu eleman modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



a) Sağdan Görünüş



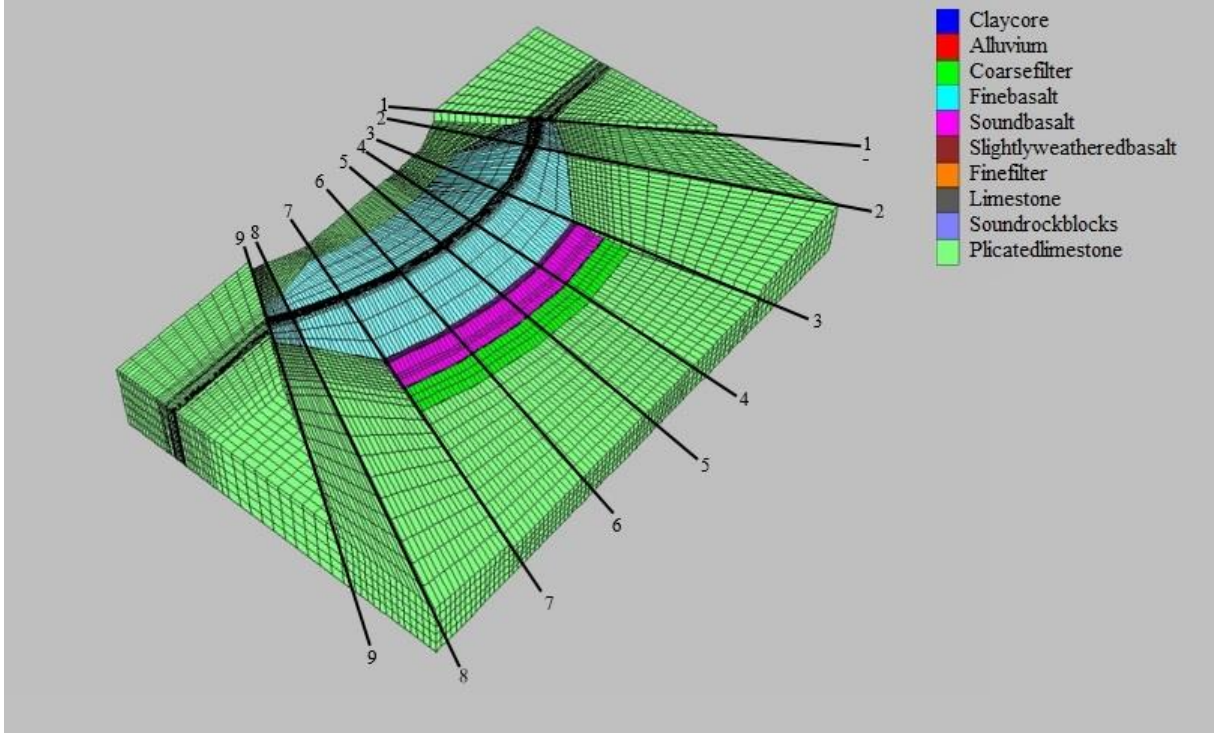
b) Soldan Görünüş



c) Arkadan Görünüş

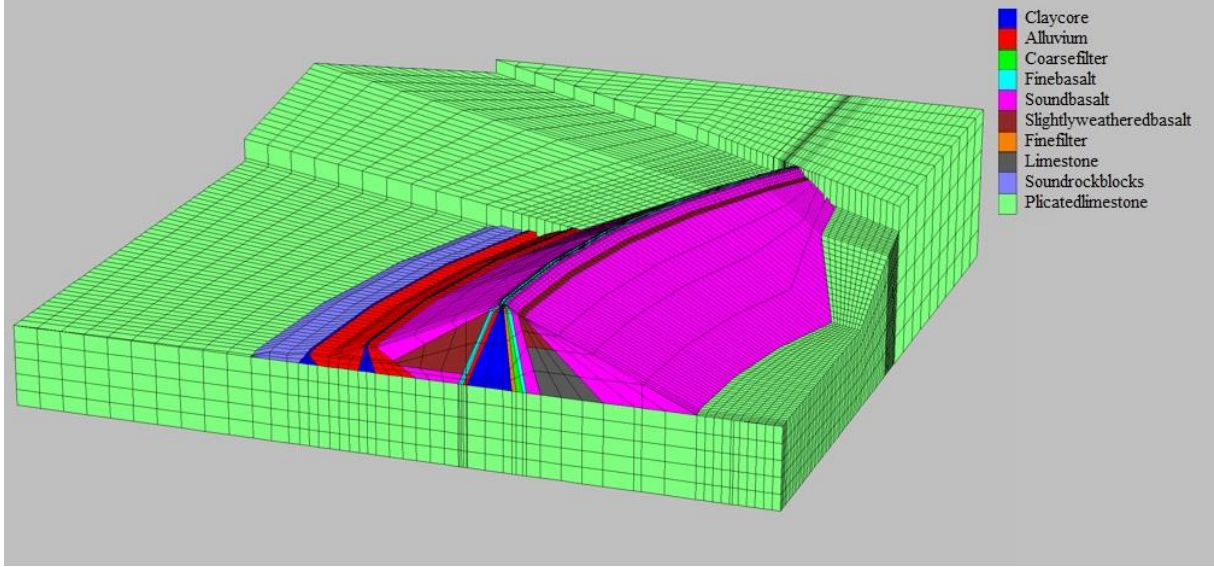
Şekil 3.1 Atatürk Barajının sonlu eleman modelinin genel görünüşü.

Atatürk Barajı'nın sonlu eleman ağı oluşturulurken, gövdesinde toplam 9 farklı kesit dikkate alınmıştır. 9 kesitin hepsi, birbirinden farklı geometrik özelliklere sahiptir. Bu kesitler, Şekil 3.2'de sunulmuştur.

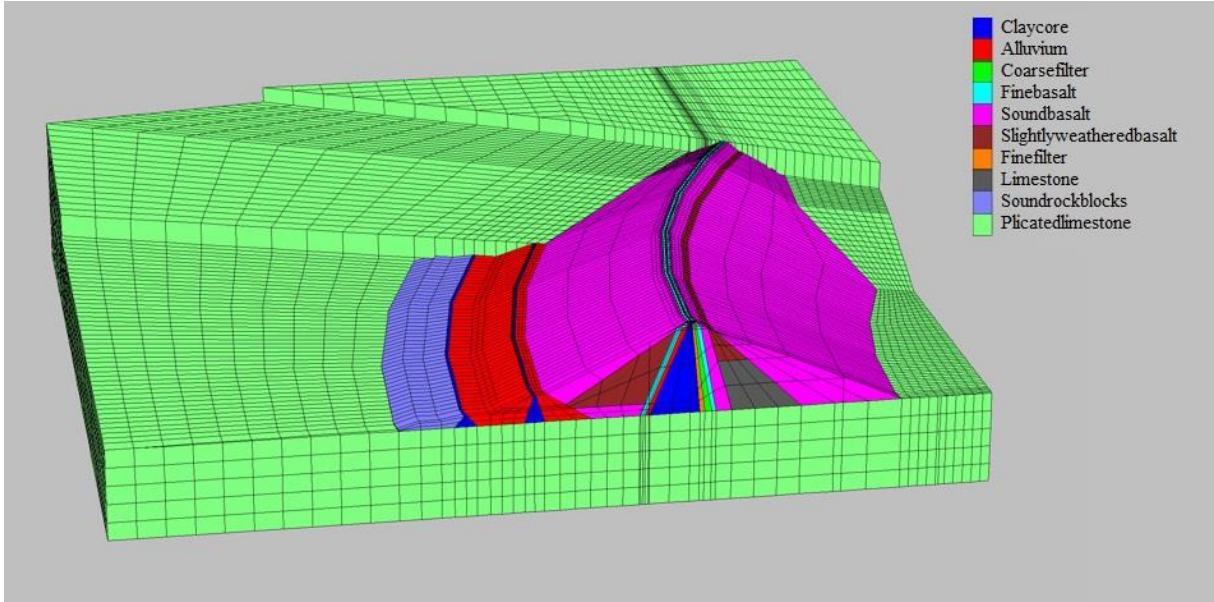


Şekil 3.2 Atatürk Barajının sonlu eleman ağında bulunan kesitler

Barajın gövde kısmındaki elemanları detaylı bir şekilde görmek için baraj, ortasından yani 5-5 kesitinden kesilmiştir. Barajın gövde ve zemin geometrisinin detayları Şekil 3.3'de sunulmuştur.



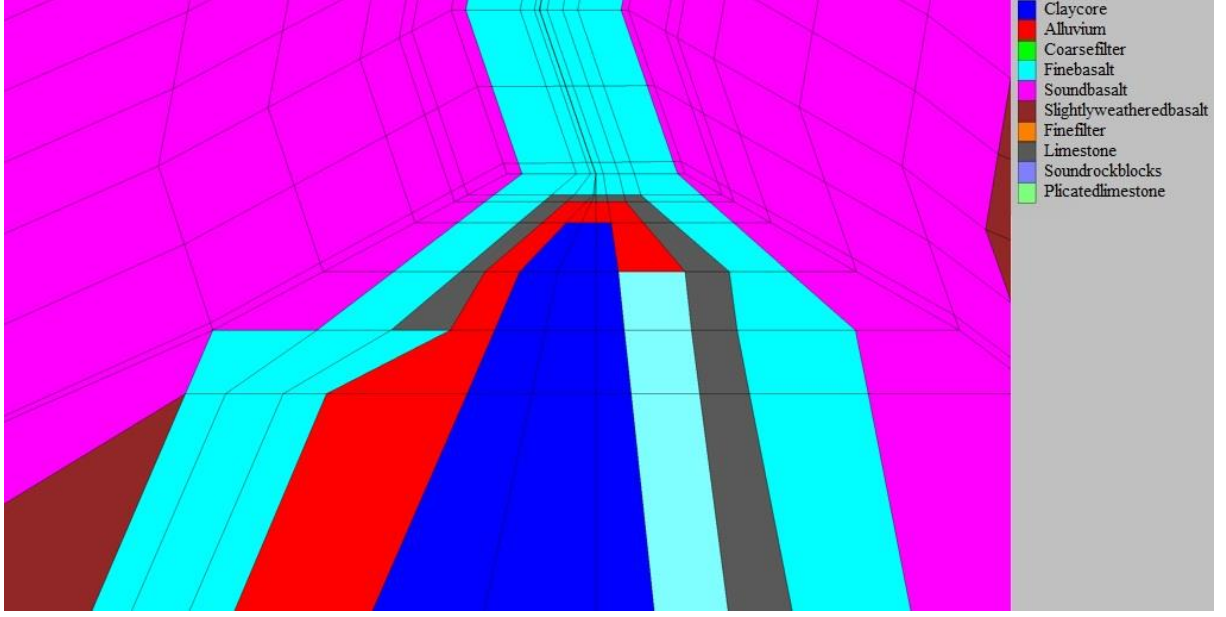
a) Mansaptan görünüm



b) Membadan Görünüm

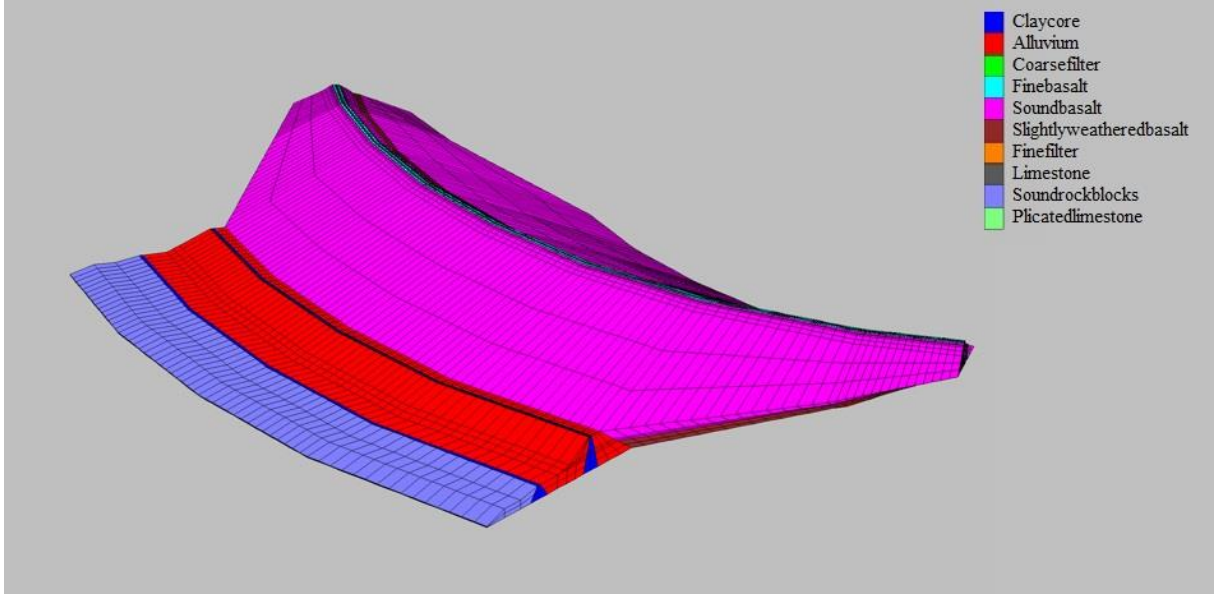
**Şekil 3.3** 5-5 kesitinden kesilen barajın genel görünümü.

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi barajın gövdesindeki her bir malzeme için ayrı ayrı hacimler oluşturulmuştur. Oluşturulan hacimler için farklı sonlu eleman ağları kullanılmıştır ve her bir hacmin ağı diğer hacmin ağı ile üst üste karşılaştırılmıştır. Baraj gövdesi için, toplam 9 ayrı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler için baraj gövdesinde farklı hacimler oluşturulmuştur ve bu malzemelerin herbirinin mekanik özellikleri birbirinden farklıdır.

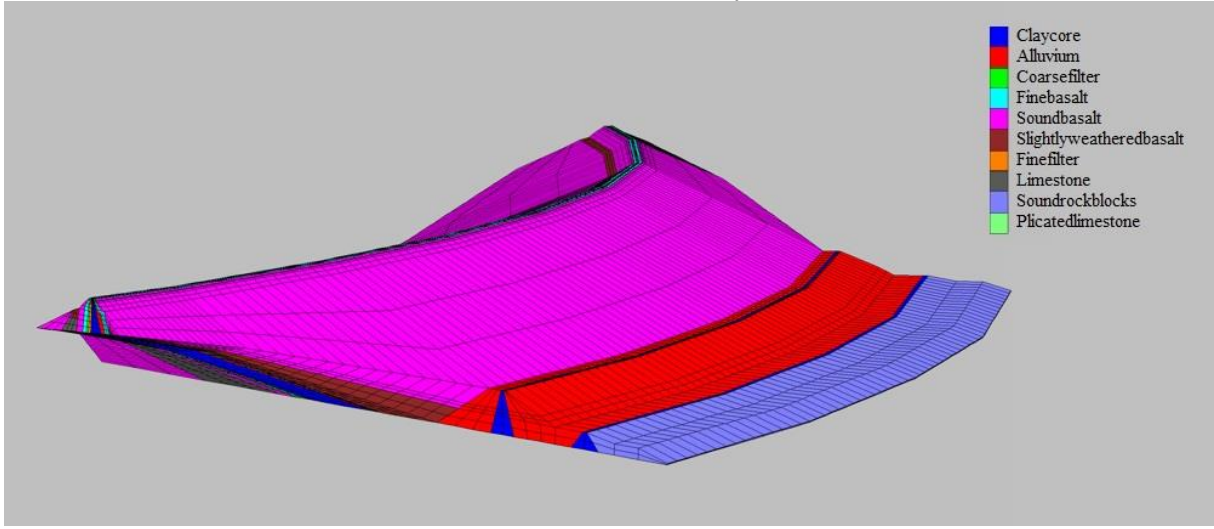


**Şekil 3.4** 5-5 kesitinden kesilen barajın kretinin detaylı görünümü.

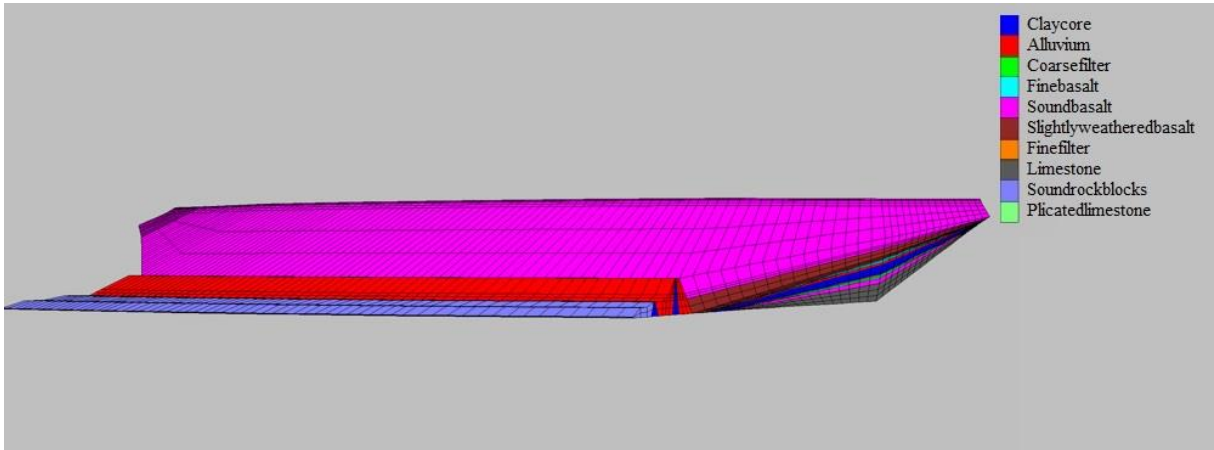
Atatürk Barajı'nın gövde kısmı, Şekil 3.5'de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Gövdenin ilk iki ve son iki kesitinin memba kısmında batardo bulunmamaktadır ve bu kesitler diğer kesitlere göre daha yüksek kotlarda inşa edilmişlerdir. 1. kesitin taban kotu ile 3. kesitin taban kotu arasında yaklaşık 140 metre kot farkı bulunmaktadır. Bu da Atatürk Barajı'nın yapıldığı arazinin, vadi şeklinde yani düz olmayan bir arazi yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca barajın gövdesi de, doğrusal bir geometriye sahip değildir. Şekil 3.5a'da görüldüğü gibi, oluşturulan gövde geometrisi hem yuvarlak geometriye sahiptir hemde iki farklı eğimden oluşmaktadır. Model oluşturulurken, ilk iki kesit ve son iki kesitin yerden yükseklikleri diğer kesitlere göre daha yukarıdadır. Ayrıca batardo kısmındaki kil çekirdek kısmı dahil tüm gövde, gerçek baraj gövde geometrisine uygun olarak modellenmiştir.



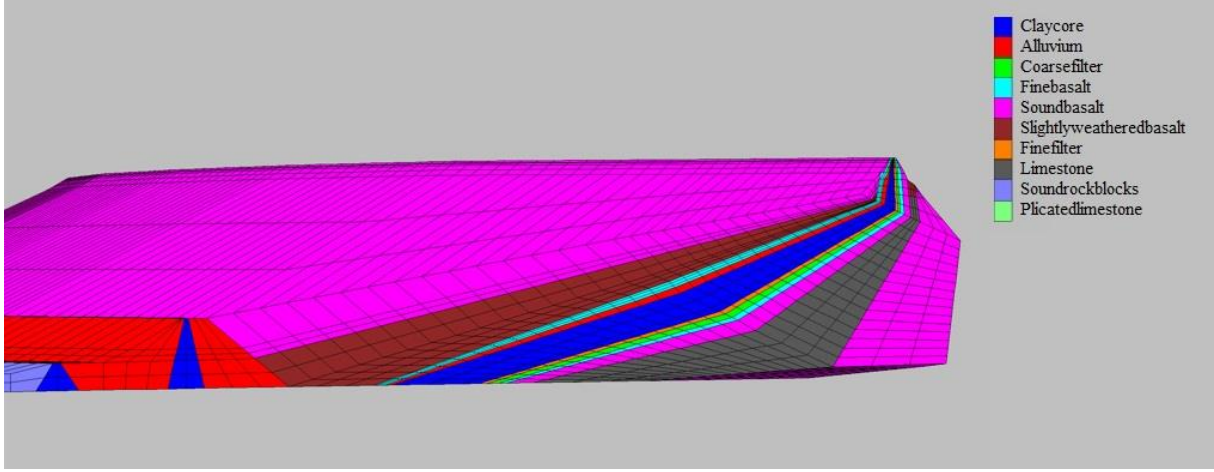
a) Soldan Görünüş



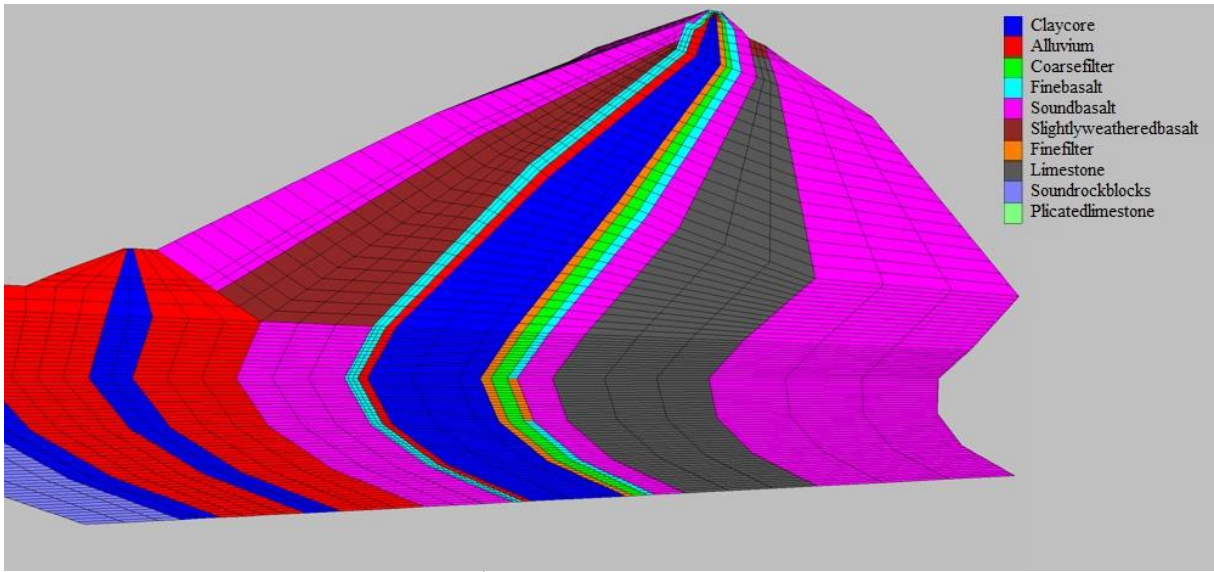
b) Sağdan Görünüş



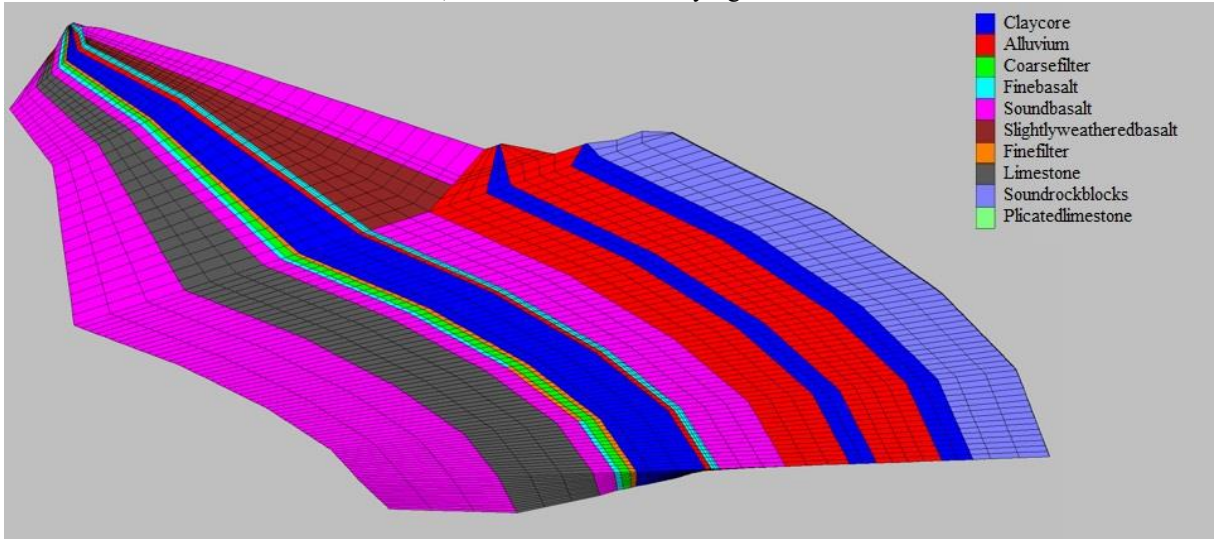
c) Önden Görünüş



d) İlk iki kesitin görüntüsü



e) İlk iki kesitin detaylı görüntüsü



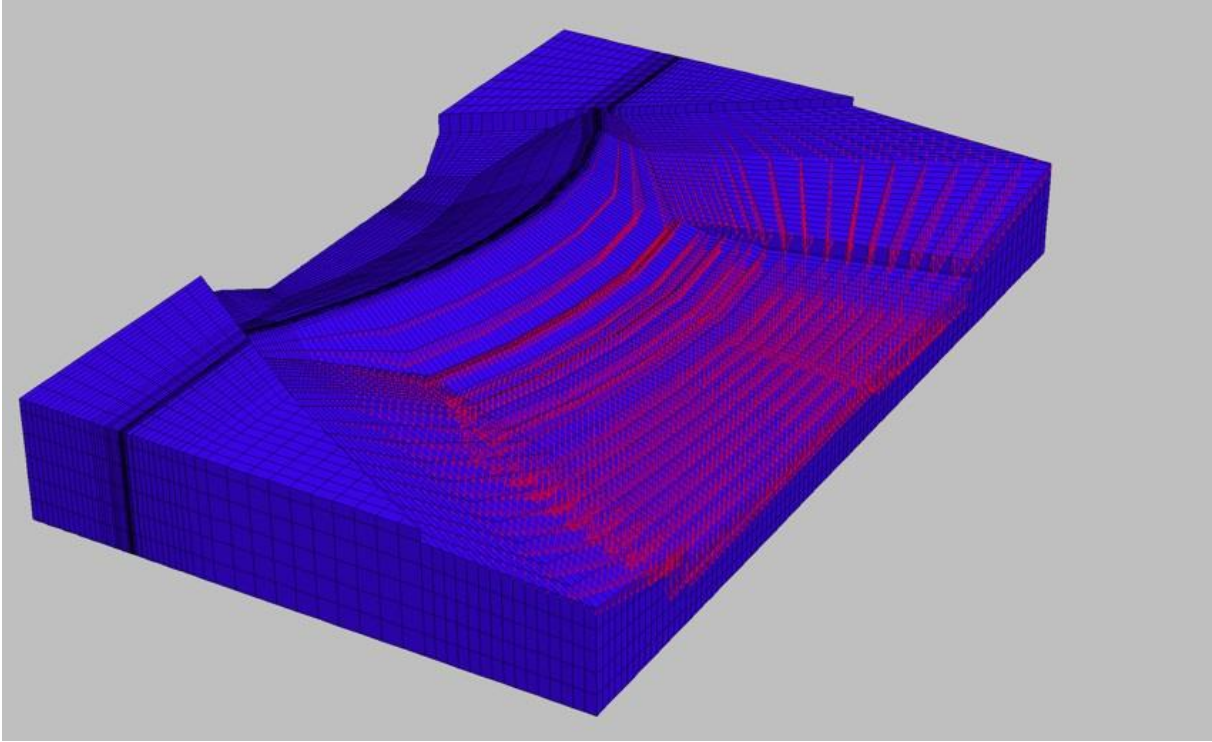
f) Son iki kesitin görüntüsü

Şekil 3.5 Atatürk Barajının gövde geometrisinin genel görünümü.

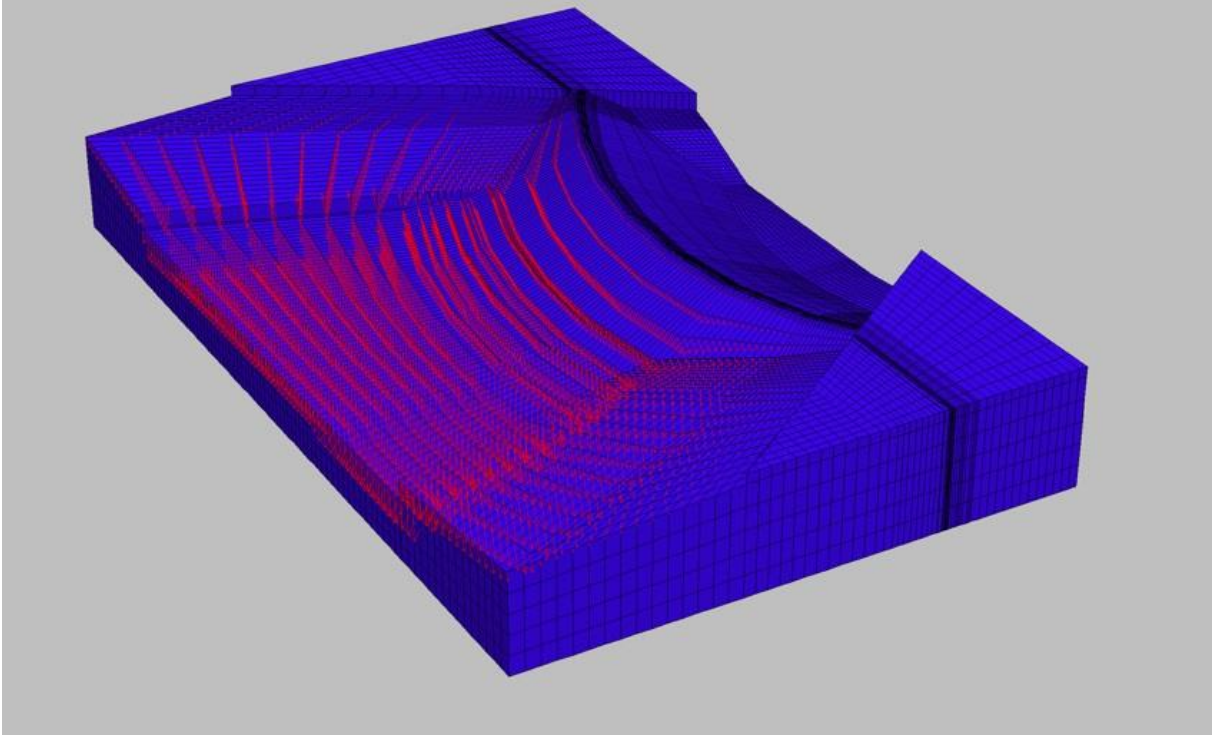


### 3.2 ATATÜRK BARAJININ DOLU REZERVUARLI SONLU ELEMAN MODELİ

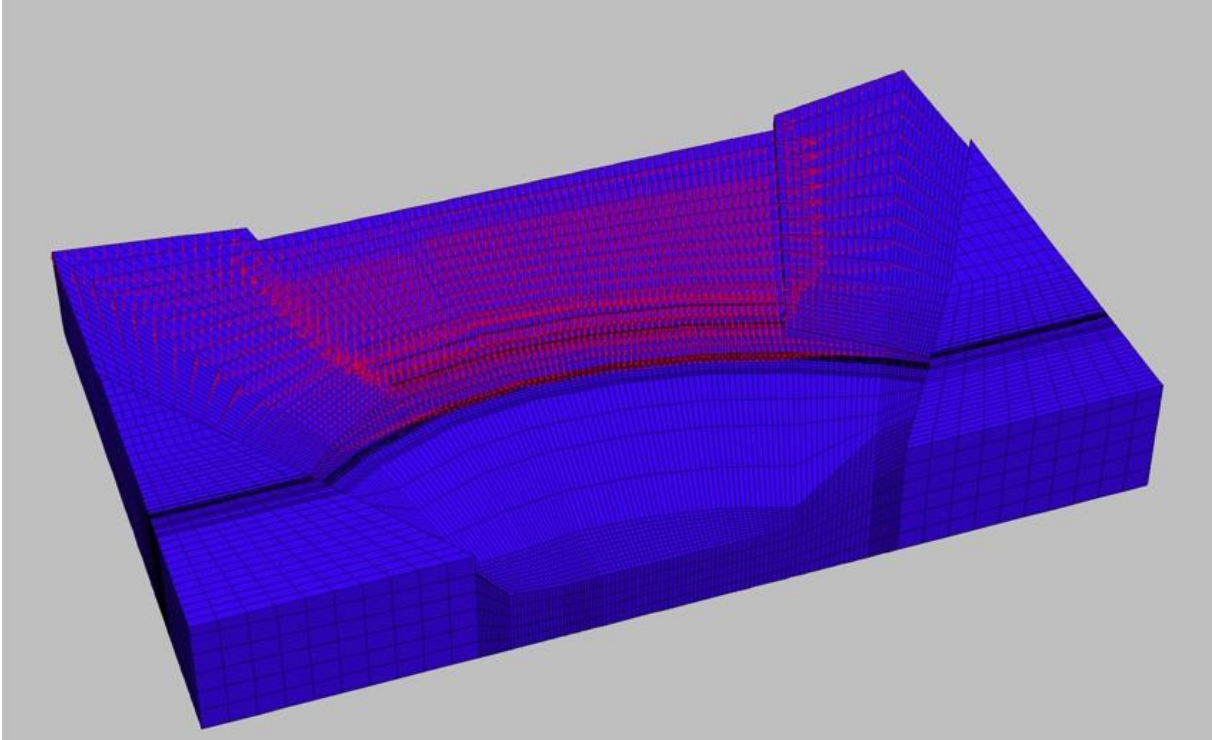
Rezervuar suyunun etkisini FLAC3D programında dikkate alabilmek için barajın memba yüzünde suya temas eden yüzeylerindeki her bir düğüm noktasına tekil yük etki ettirmek gerekmektedir. Bu da son derece külfetli bir işlemdir. Çünkü geometrinin yük etki ettirilecek yüzeyini doğru tanımlamak ve o yüzeye yükseklik boyunca artan yük etki ettirmek uzun zaman almaktadır. Bu çalışmada, Atatürk Barajı'nın maksimum su kotu 535 metre olduğu bilindiği için, 535 metre kotunda su yükü '0' olarak tanımlanmıştır. 535 metre kotundan aşağılara doğru her 1 metrede bir su yükü, suyun birim hacim ağırlığı ölçüsünde artırılmıştır. Eğimli ve dik yüzeylerde, yüzey normaline dik su yükü uygulanmıştır. Barajın suyla temas eden yüzeylerine etki ettirilen su yükleri Şekil 3.6'da sunulmuştur.



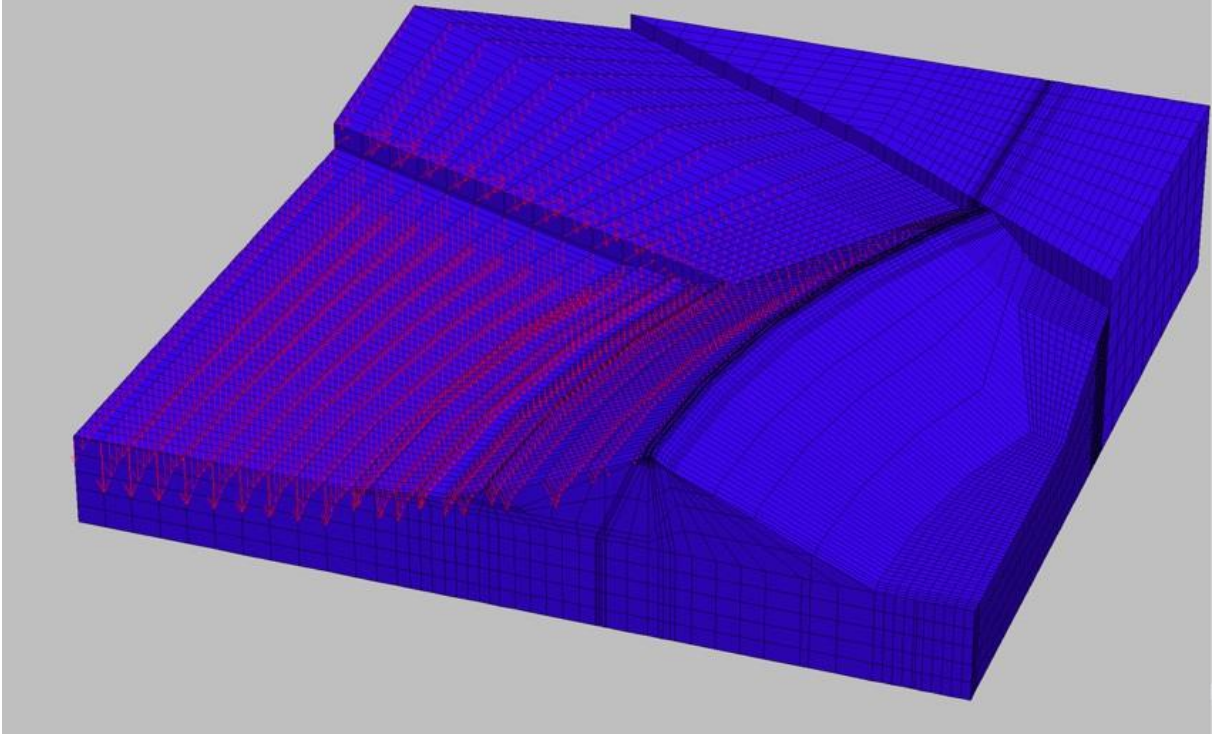
a) Barajın sağdan görünümü



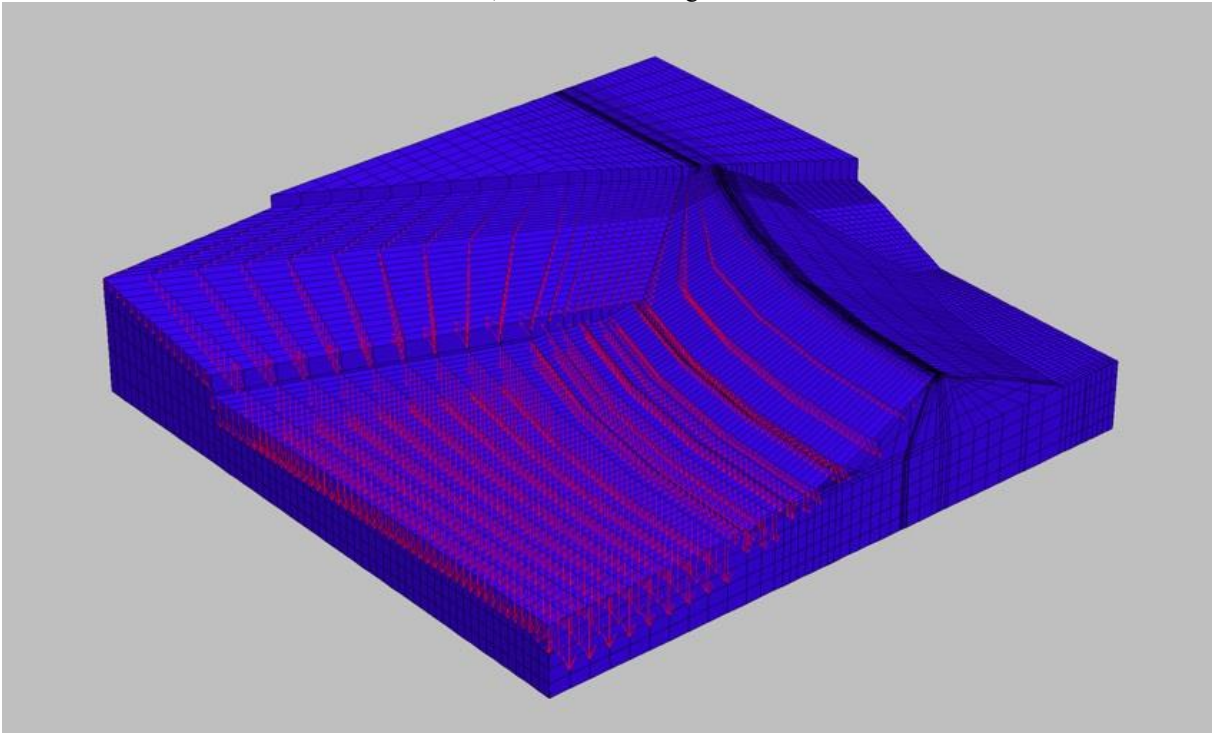
b) Barajın soldan görünümü



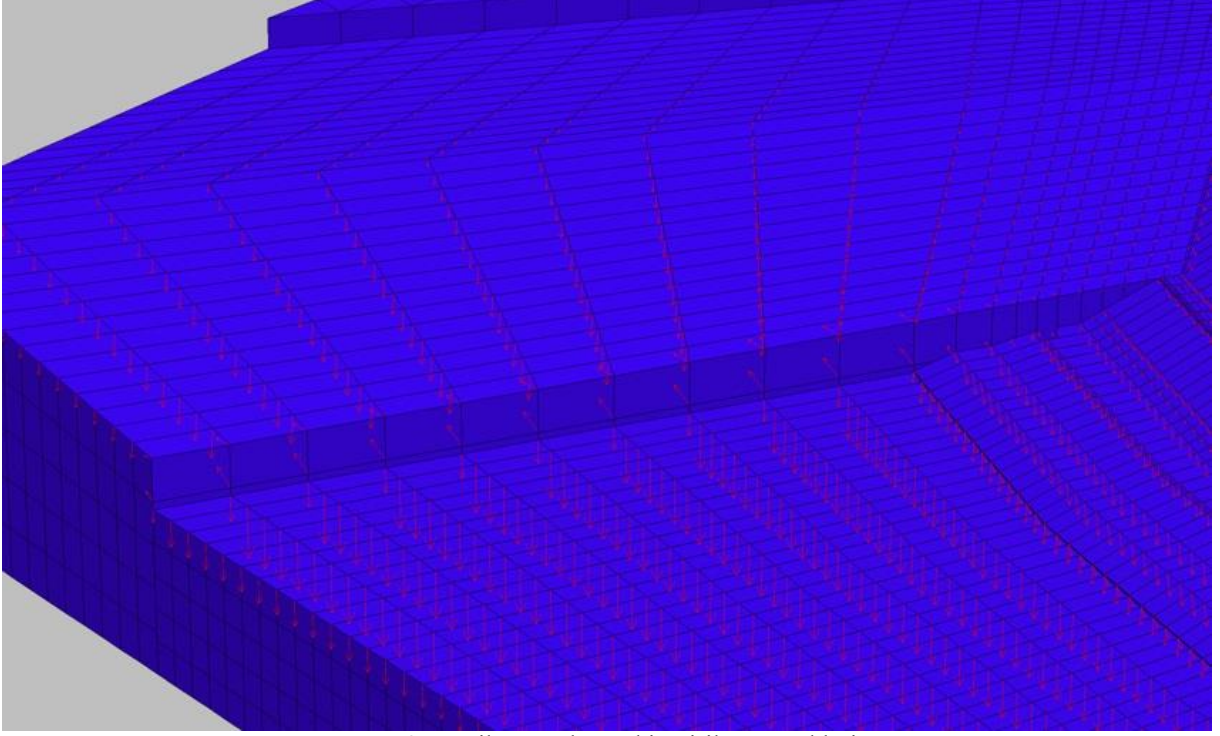
c) Barajın Arkadan Görünümü



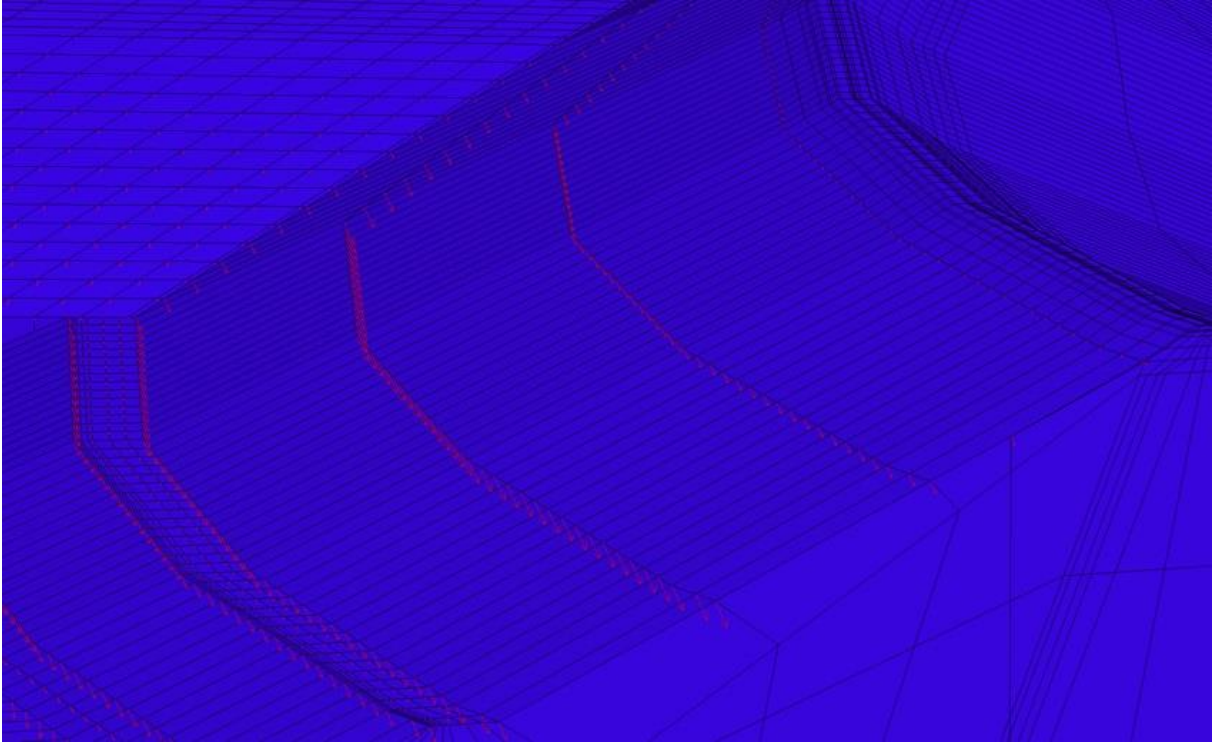
d) 5-5 kesitinden görünüm



e) 5-5 Kesitinin önden detaylı görünümü



f) Dik yüzeylere etki ettirilen su yükleri



g) Yükseklik boyunca değişen su yükünün detaylı görünümü

**Şekil 3.6** Barajın memba kısmına etki ettirilen su yüklerinin genel görünümü

## BÖLÜM 4

### BULGULAR VE İRDELEMELER

Atatürk Barajı'nın geometrisinin nasıl oluşturulduğu Bölüm 3'de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra, sonlu eleman ağındaki hacimlere malzeme parametrelerinin ataması gerçekleştirilmiştir. Malzemeler parametreleri, Atatürk Barajı'nın gerçek malzeme parametreleri kullanılarak modele tanımlanmıştır. FLAC3D programında yapılan non-linear analizlerin hepsinde, Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Ayrıca tüm malzemelerin, doğrusal olmayan davranış gösterdiği düşünülmüştür. Bu bölümde FLAC3D programında yapılan analiz sonuçları iki kısımda sunulmuştur. İlk olarak analizlere, Atatürk Barajı'nın boş rezervuarlı durumu göz önünde bulundurularak başlanmıştır. Barajın boş rezervuarlı durumu için, yerdeğiştirmeler ve gerilmeler incelenmiştir. İkinci kısımda ise, barajın dolu rezervuarlı yani barajın memba yüzünde hidrostatik basınç yükü dikkate alınmış durumu incelenmiştir. Barajın dolu rezervuarlı durumu için oluşan gerilmeler ve yer değiştirmeler de bu durumda incelenmiştir.

FLAC3D programında analiz yaparken aynı zamanda programın bize adım adım nasıl sonuç verdiğini görebilmekteyiz. Atatürk Barajı'nın statik analizlerini yaparken, analizler sürekli adım adım izlenmiştir. Burada izlenen işlem adımları aşağıda verildiği gibidir;

- 1- Sistem zeminin kendi ağırlığı altında statik olarak çözdürülmüştür.
- 2- Sistem dengeye gelip analiz sonuçlandıktan sonra, tüm gerilme ve yerdeğiştirmeler sıfırlanıp barajın gövde geometrisi eklenmiştir.
- 3- Gövde ve zemin kısmı barajın kendi ağırlığı altında tekrar çözdürülmüştür.
- 4- Sistem dengeye geldiği zaman analiz sonuçlanmıştır.
- 5- Tüm gerilme ve yerdeğiştirmeler tekrar sıfırlanmıştır.
- 6- Barajın memba kısmında suya temas eden yüzeylere, yüzeye dik su yükleri etki ettirilmiştir.

- 7- Sistem su yükleriyle birlikte bu etkiler altında tekrar çözdürülmüştür ve sistem dengeye geldiğinde analiz sonuçlanmıştır.

Atatürk Barajı'nın sonlu elemanlar modelinin oluşturulması aşamasında yaşanan sıkıntılar aşağıda verilmiştir;

- 1- Model oluşturulurken, toplamda 15000 düğüm noktası hesaplanmıştır. Düğüm noktalarının koordinatları  $10^{-3}$  mertebesinde hassasiyetle hesaplanmıştır. Düğüm noktası sayısının çok olması sebebiyle, her bir düğüm noktasının komşu düğüm noktası ile üst üste çakıştırılmasında büyük zorluklar yaşanmıştır.
- 2- Atatürk Barajı düz bir geometriye sahip değildir. Eğimli gövde yapısı sebebiyle, oluşturulan modelin de eğimli olması gerekmektedir. Gövde geometrisi oluşturulurken, gerçek barajın geometrisine uygun bir gövde modeli oluşturmak amaçlanmıştır. Farklı eğimlere sahip hacimleri birleştirmekte sıkıntılar yaşanmıştır.
- 3- Atatürk Barajı'nın gövde bölgesindeki malzemeler, gövdenin hangi bölgesinde inşa edilmiş ise, malzemelerin bu modelde de aynı bölgede olmasına özen gösterilmiştir. Atatürk Barajının gövdesinde toplam 9 ayrı kesit bulunmaktadır. Bu farklı kesitlerin birbiri ile üst üste çakıştırılması aşamasında zorluklar yaşanmıştır.
- 4- Barajın batardo kısmı, ilk iki kesit ve son iki kesit haricinde diğer tüm kesitlerde bulunmaktadır. Batardo olmayan kesitler ile zemin kısmını birleştirmekte zorluklar yaşanmıştır.
- 5- Analiz yaparken, analiz süresinin uzun olması sebebiyle modelin sonlu eleman ağı değiştirilmek zorunda kalınmıştır. Çünkü program, çok fazla sayıda düğüm noktasında hesap yaptığı için analiz süresi de ciddi düzeyde artmaktadır. Bu sebeple toplam 3 farklı sonlu eleman ağı oluşturulmuş olup en optimum olan sonlu eleman ağı analizlerde kullanılmıştır.

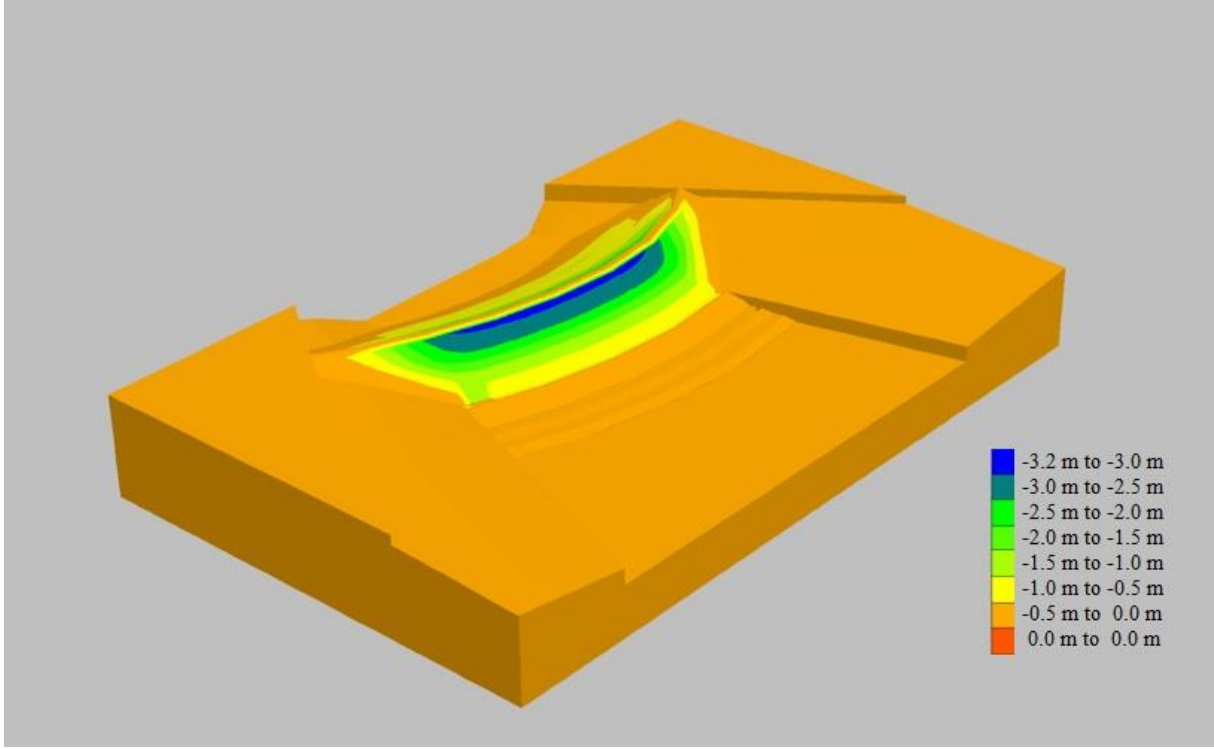
Analizlerde malzeme parametresi olarak kayma modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı kullanılmıştır. Kullanılan malzeme parametreleri aşağıda Çizelge 4.1'de belirtilmektedir.

**Çizelge 4.1** Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

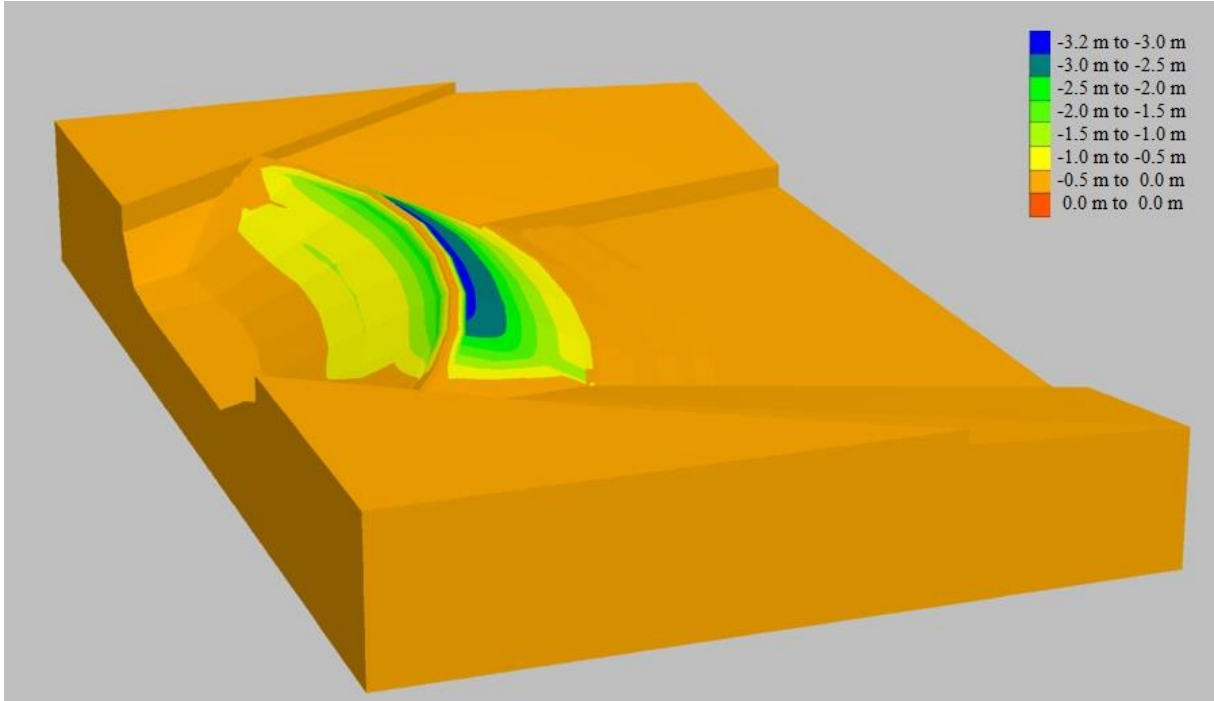
<b>MALZEME PARAMETRELERİ</b>			
<b>Malzemeler</b>	<b>Kayma Modülü</b>	<b>Kohezyon</b>	<b>İçsel Sürtünme Açısı</b>
<b>Kil Çekirdek</b>	14.8 MPa	0.099 MPa	15
<b>Alüvyon</b>	15.384 MPa	1 MPa	40
<b>Bazalt</b>	21.484 MPa	1 MPa	48.4
<b>Kireçtaşı</b>	22.692 MPa	1 MPa	41
<b>Filtre</b>	64 MPa	1 MPa	32
<b>Zemin</b>	22.8 GPa	104 MPa	24.95

#### **4.1 BARAJIN BOŞ REZERVUARLI DURUMUNDA DÜŞEY YERDEĞİŞTİRMELER**

Bu bölümde, Atatürk Barajı'nın boş rezervuarlı durumu için düşey yerdeğiştirme sonuçları detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, analiz sonuçlarına göre, zemin kısmında çok az düşey yerdeğiştirmeler meydana gelmiştir. Ayrıca, barajın gövde kısmında, zemine göre daha fazla düşey yerdeğiştirmeler oluşmuştur. Atatürk Barajı'nın çekirdek kısmında kil malzemesi bulunmaktadır. Baraj çekirdeğindeki kil malzemesinin etrafında ise bazalt, alüvyon gibi daha dayanıklı malzemeler bulunmaktadır. Şekil 4.1c'de görüldüğü gibi, baraj 5-5 kesitinden kesilip iç bölgesindeki yerdeğiştirme sonuçları incelendiğinde maksimum düşey yerdeğiştirmeler, baraj gövdesinin en zayıf malzemelerinin bulunduğu barajın kil çekirdeğinin etrafında olduğu görülmektedir. Bu sonuç, zayıf malzemelerde daha fazla yerdeğiştirmelerin oluştuğunu açık bir şekilde göstermektedir. Kil çekirdek çevresinde oluşan maksimum düşey yerdeğiştirmeler 3.2 metre değerindedir. Kil çekirdek etrafında daha dayanıklı malzemeler bulunduğu için, bu malzemelerde daha az düşey yerdeğiştirmeler oluşmuştur.

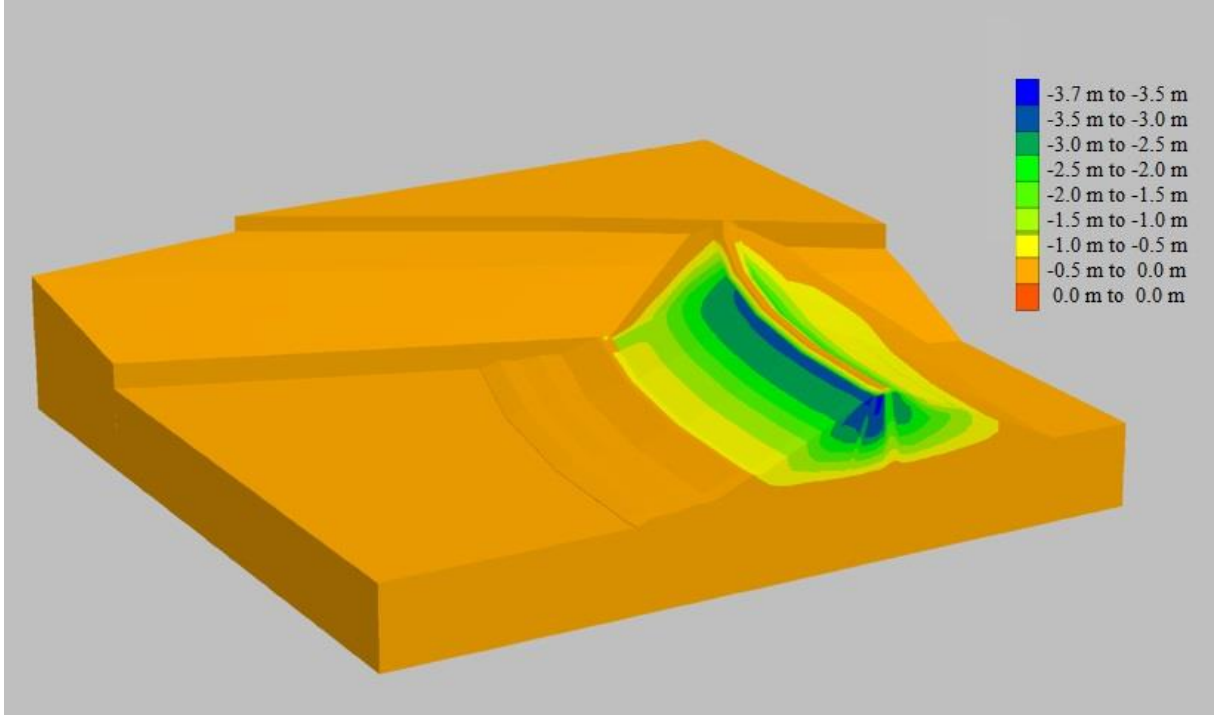


a) Sağdan görünüş

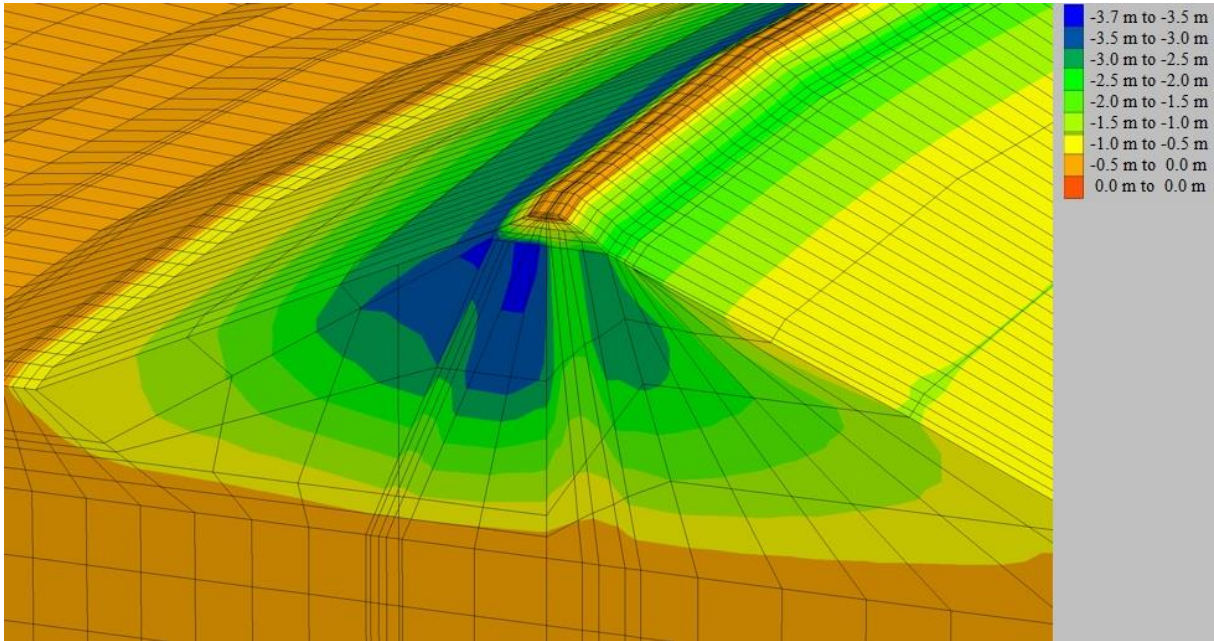


b) Arkadan görünüş

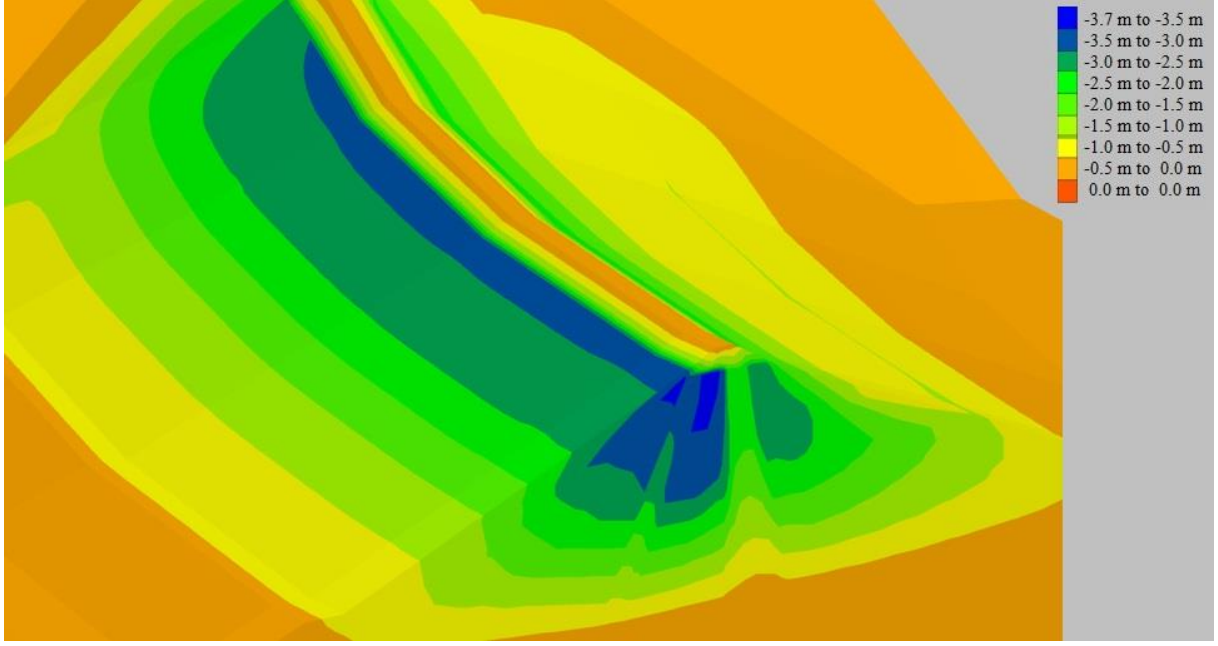




c) 5-5 kesitinin genel görünüşü



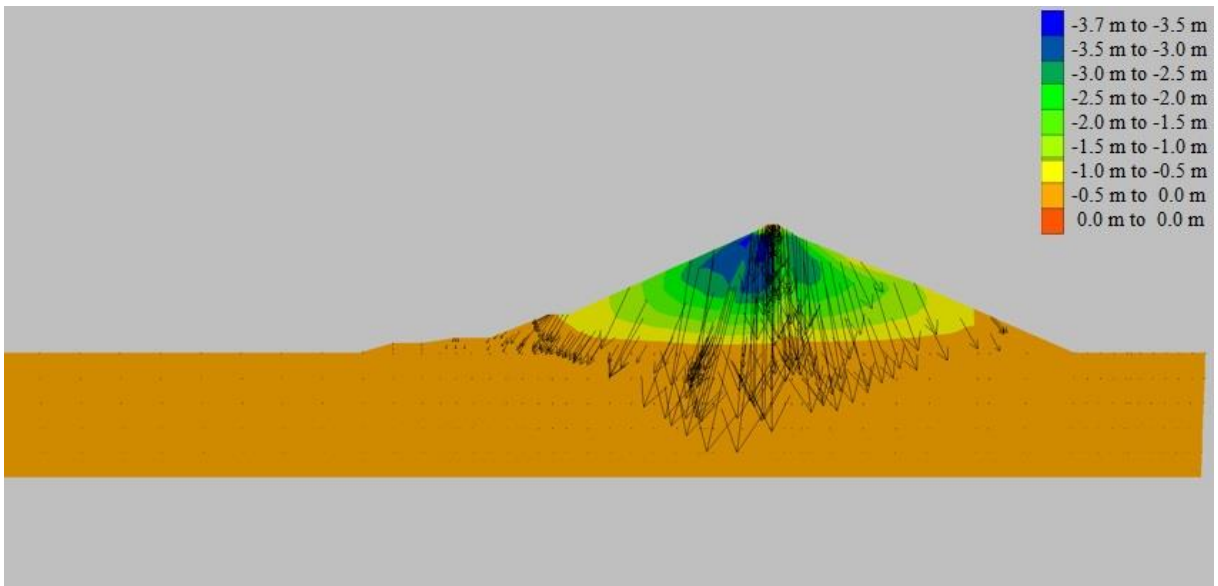
d) 5-5 kesitinin detaylı görünüşü



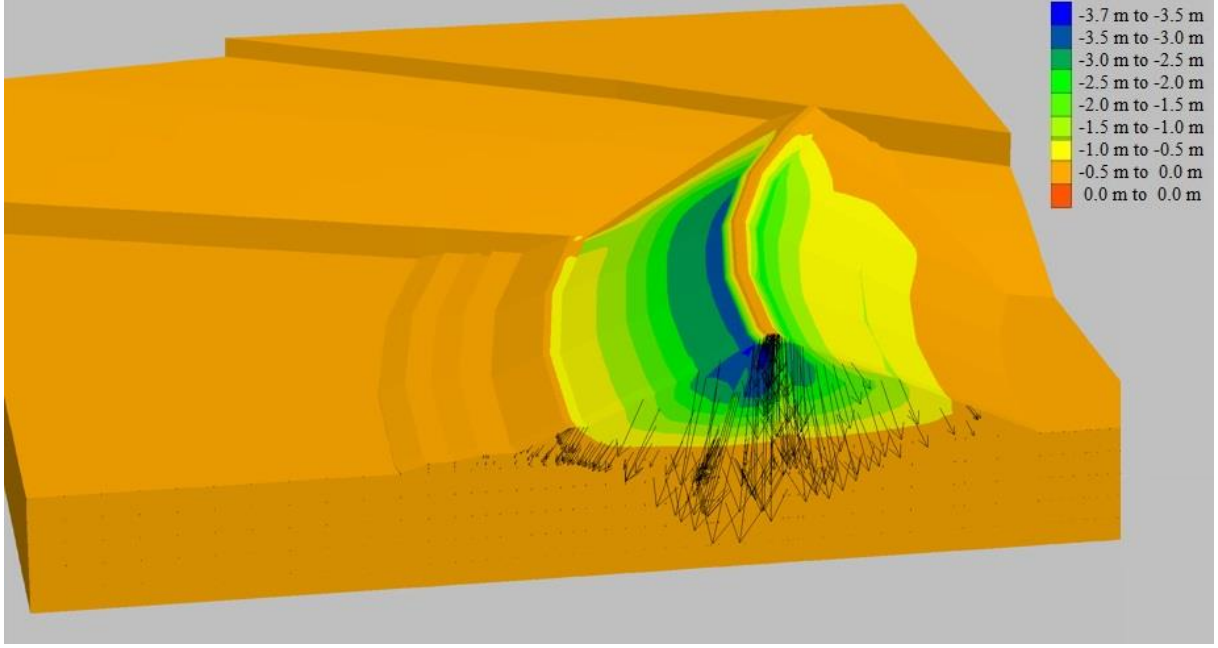
e) Baraj gövdesinin detaylı görünümü

**Şekil 4.1** Barajda oluşan düşey yerdeğiştirme sonuçları.

Yerdeğiştirme vektörlerinin incelenmesi, bize baraj gövdesindeki malzemelerin hangi yönde yerdeğiştirme yaptığını detaylı olarak görmemize imkân vermektedir. Şekil 4.2 ve 4.3'de gösterildiği gibi barajın çekirdek kısmında daha fazla yerdeğiştirmelerin olduğu, yerdeğiştirme vektörlerinin baraj çekirdeğinde daha büyük olmasından anlaşılmaktadır. Kil çekirdekten yanlara doğru gidildikçe yerdeğiştirme vektörleri küçülmektedir bu da o kısımlarda daha az yerdeğiştirmelerin meydana geldiğini göstermektedir.



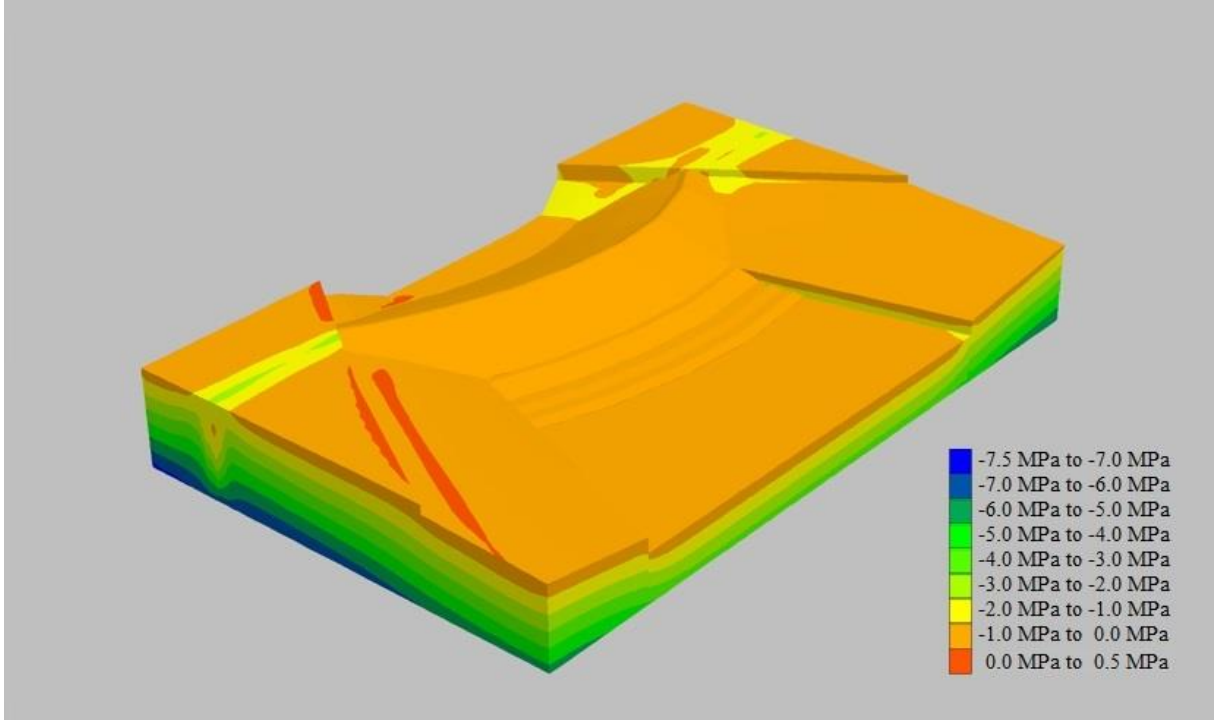
**Şekil 4.2** Yerdeğiştirme vektörlerinin düzlem görünümü.



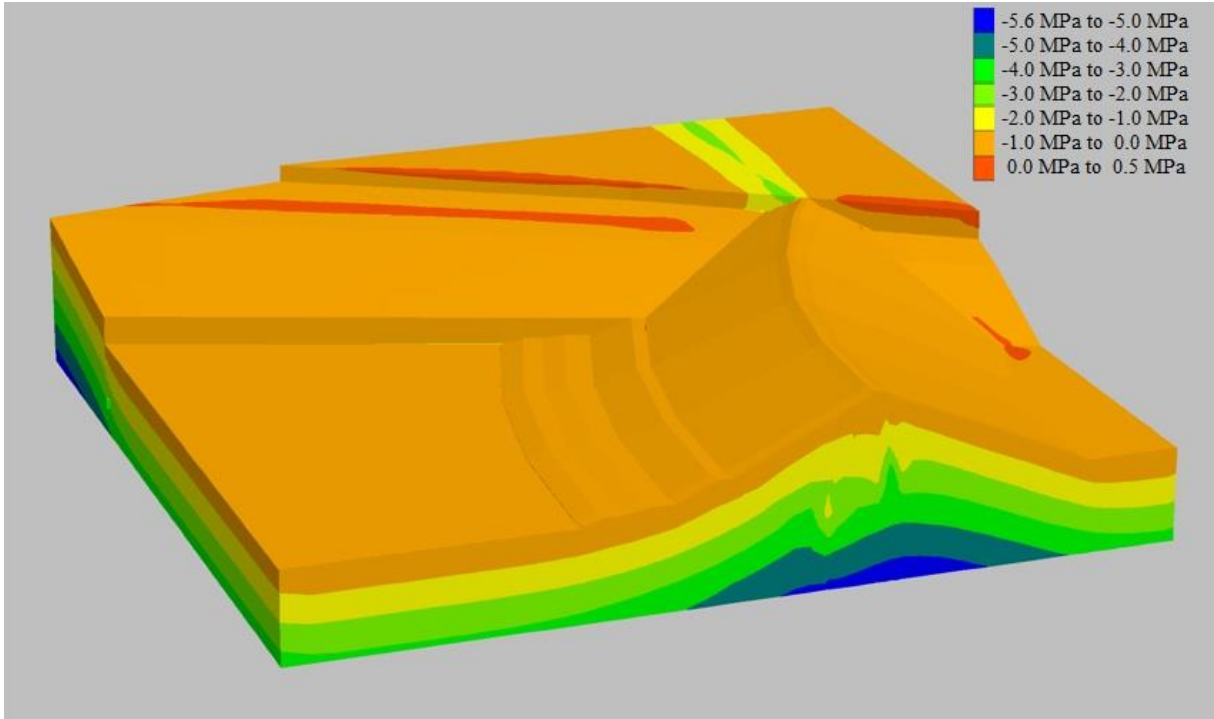
Şekil 4.3 Yerdeğiştirme vektörlerinin üç boyutlu görünümü.

#### 4.2 BARAJIN BOŞ REZERVUARLI DURUMU İÇİN MAKSİMUM ASAL GERİLMELER

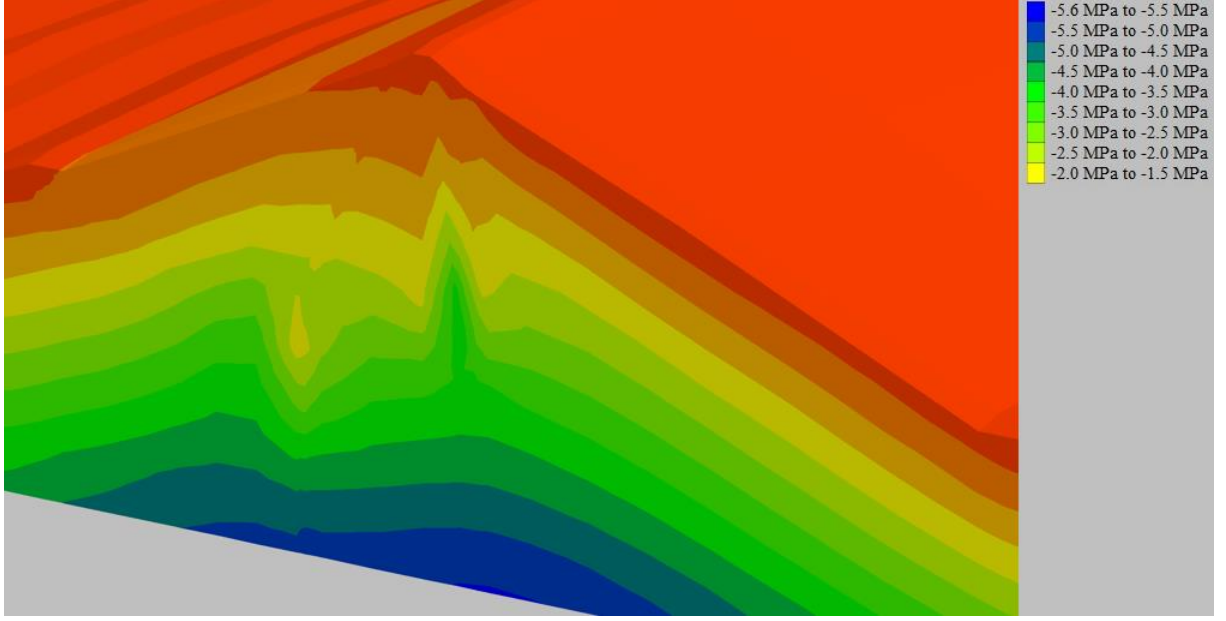
Yapılan statik analiz sonuçlarına göre, barajda oluşan gerilme sonuçları Şekil 4.4'de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Barajın üst yüzeylerinde gerilmelerin sifıra yakın olduğu ve aşağılara inildikçe gerilmelerin arttığı görülmektedir. Baraj zemininin en alt kotunda yaklaşık 5.6 MPa değerinde basınç gerilmesi oluşmuştur. Şekil 4.4b'de görüldüğü gibi baraj 5-5 kesitinden kesilip gövde ve zeminde oluşan gerilmelerin 2 boyutlu görünümü incelendiği zaman, barajın en alt kotunda maksimum asal gerilmeler olduğu anlaşılmaktadır. Üst kotlardan alt kotlara doğru inildikçe gerilme değerleri yükseklik boyunca artmaktadır.



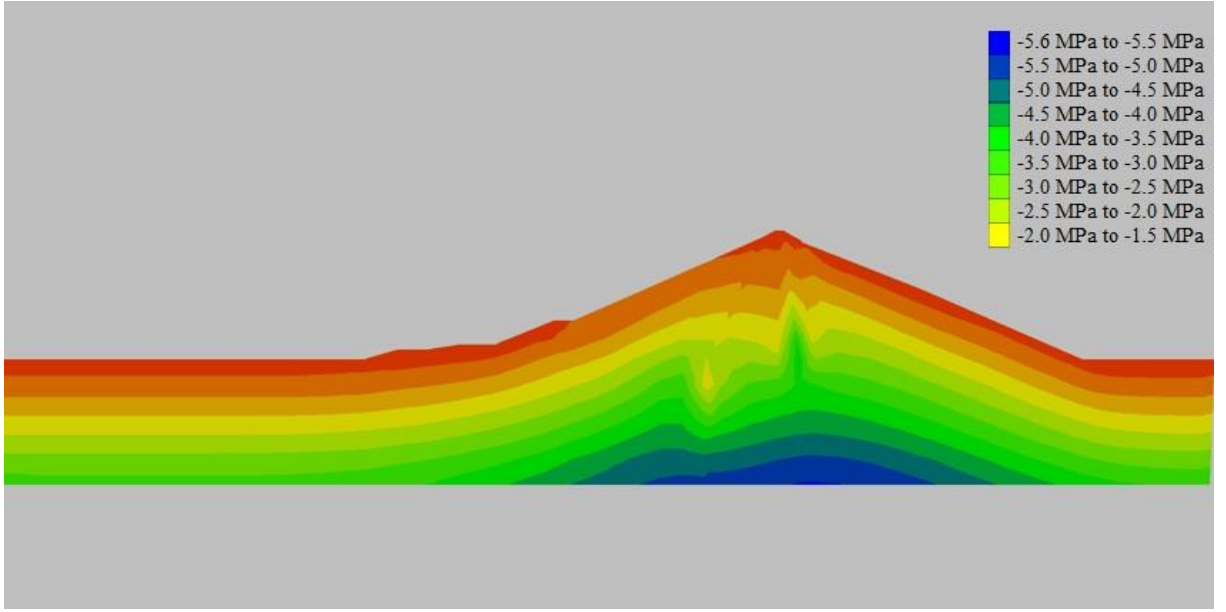
a) Önden görünüş



b) 5-5 Kesitinden görünüş



c) Gövdenin yakından görünüşü



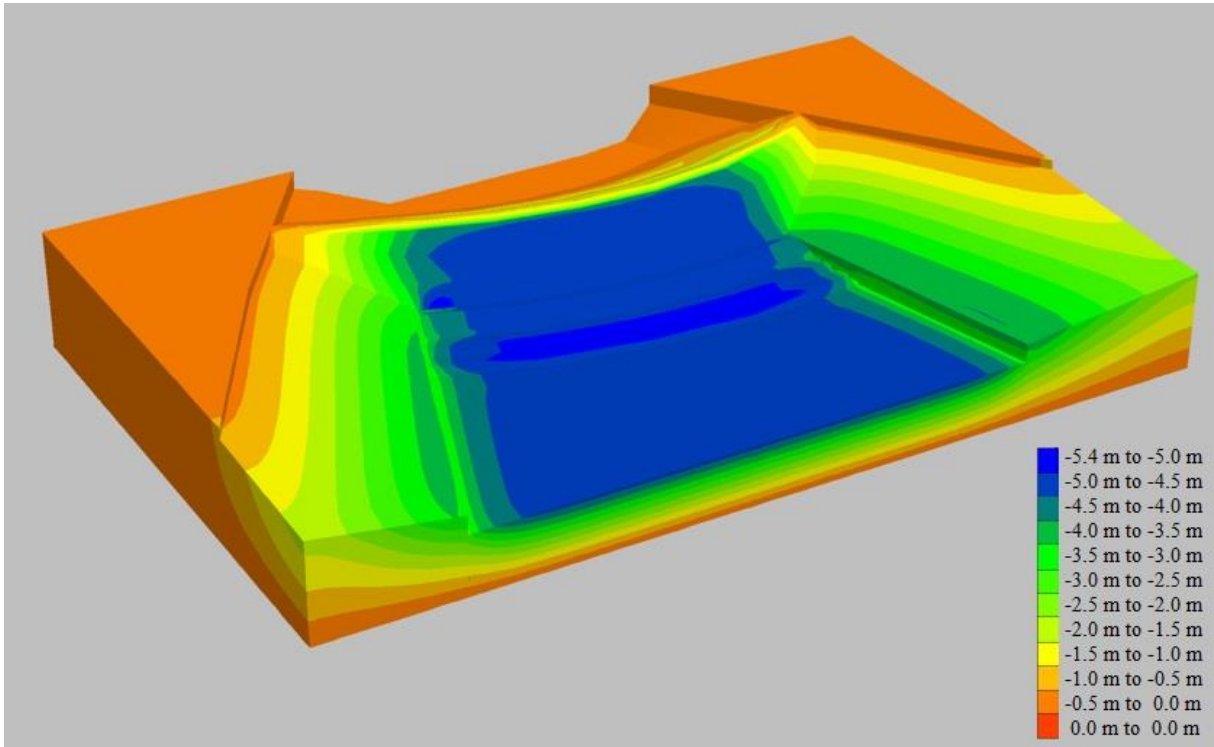
d) Düzlem görünümü

Şekil 4.4 Barajda oluşan maksimum asal gerilme sonuçları.

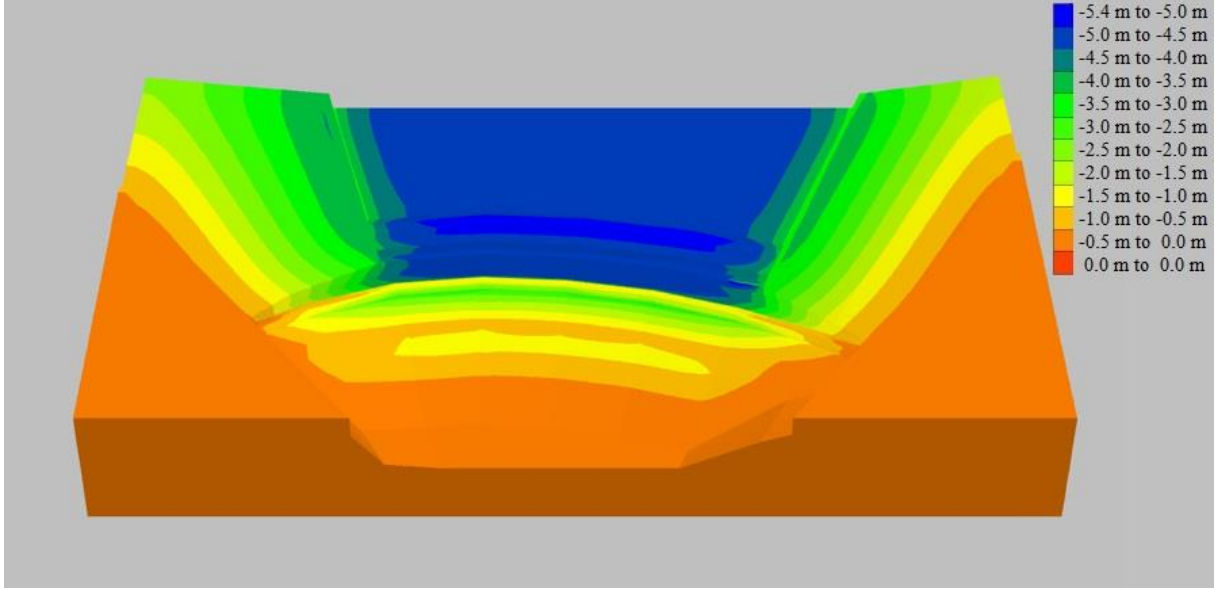
### 4.3 BARAJIN DOLU REZERVUARLI DURUMU İÇİN DÜŞEY YERDEĞİŞTİRMELER

Atatürk Barajı'nın rezervuarın dolu olması halinde barajda oluşan yerdeğıştirmeler detaylı bir şekilde Şekil 4.5'de sunulmaktadır. Barajın maksimum su seviyesi, 535 metre olarak FLAC3D programına tanımlanmıştır. Su yükü, 535 metre kotunda 0 olarak programa girilmiştir ve düşey yönde her 1 metrede bir suyun birim ağırlığı kadar artırılmıştır.

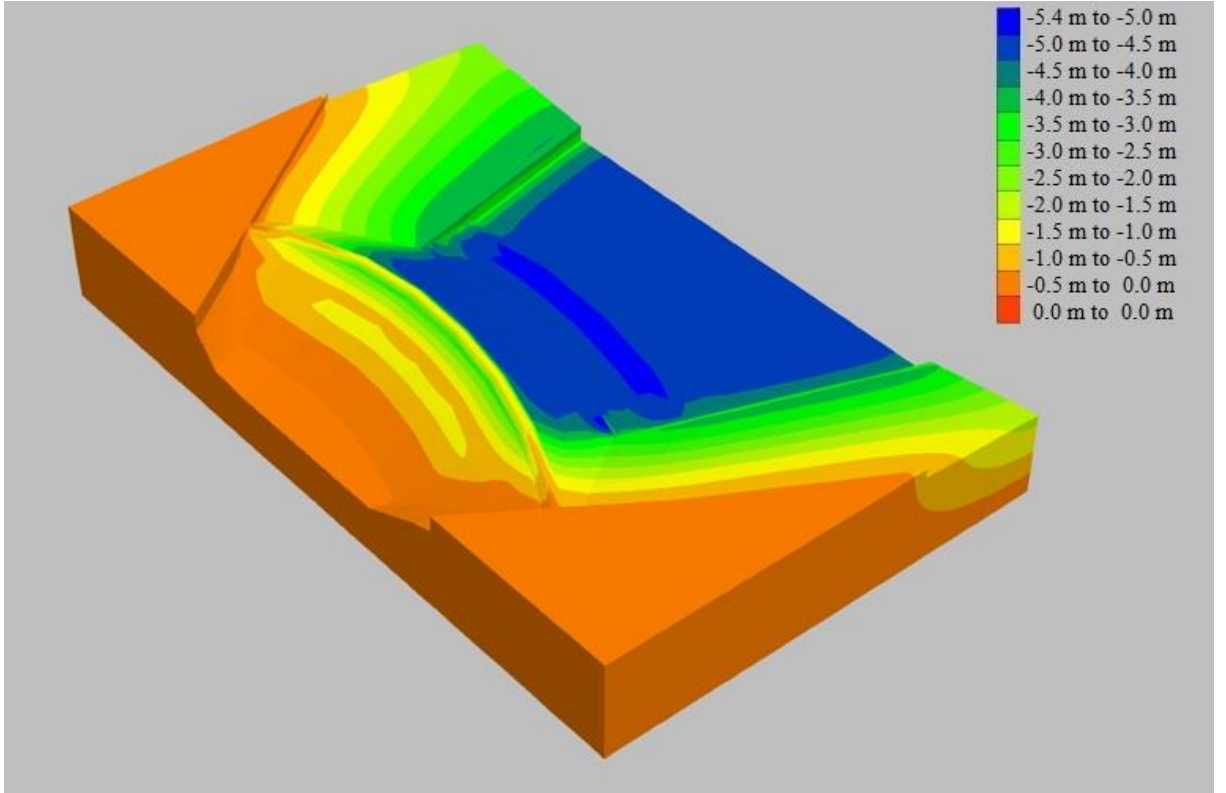
Yapılan statik analiz sonuçlarına göre, barajın suya temas eden yüzeylerinde, diğer yüzeylere kıyasla daha fazla yerdeğıştirmeler oluştuğu hesaplanmıştır. Şekil 4.5d'de görüldüğü gibi, barajın memba kısmında yükseklik boyunca aşağılara doğru inildikçe ilgili yerdeğıştirmeler azalmaktadır. Bu da üst yüzeylerde mevcut olan suyun, barajın davranışına etkisini göstermektedir. Barajın mavi renge boyanan kısımlarında maksimum yerdeğıştirmeler oluşmuştur ve bu bu kısımlarda maksimum düşey yerdeğıştirme değerleri 5.44 metre değerindedir.



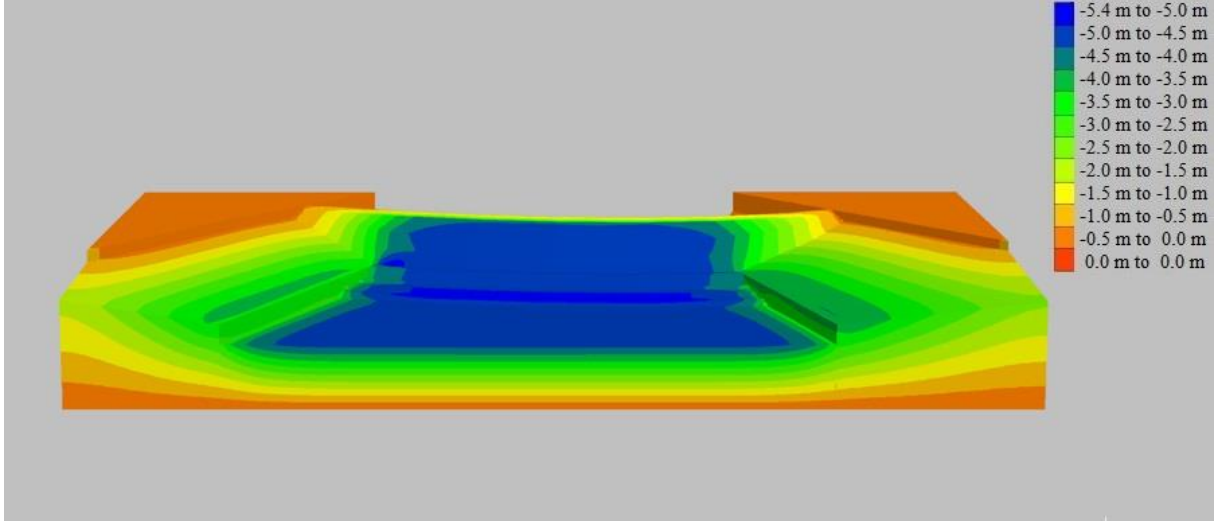
a) Barajın memba kısmından görünüşü



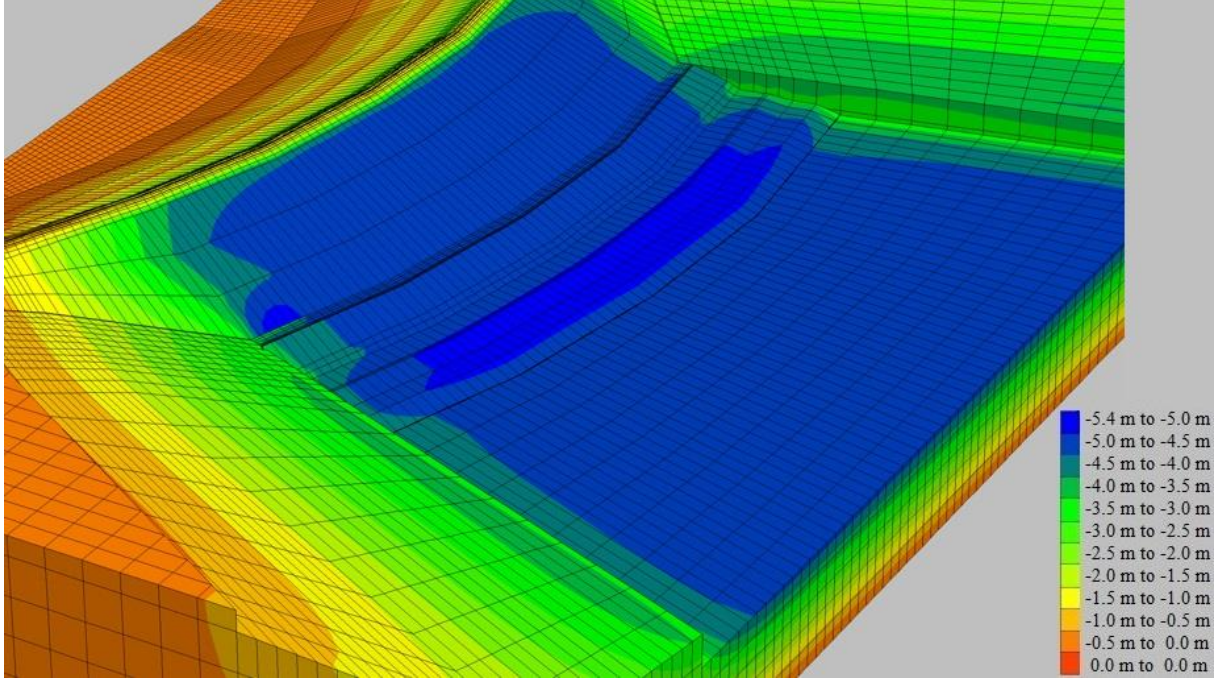
b) Barajın mansap tarafından görünüşü



c) Barajın genel görünüşü



d) Önden detaylı görünüm

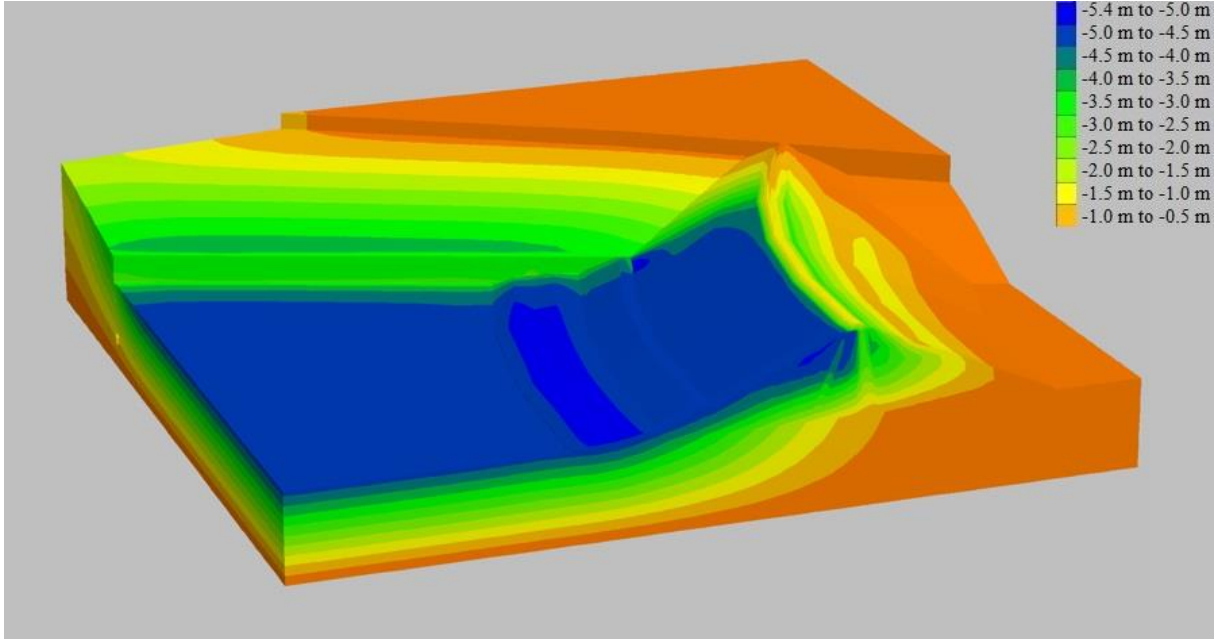


e) Menba yüzünün yakından görünüşü

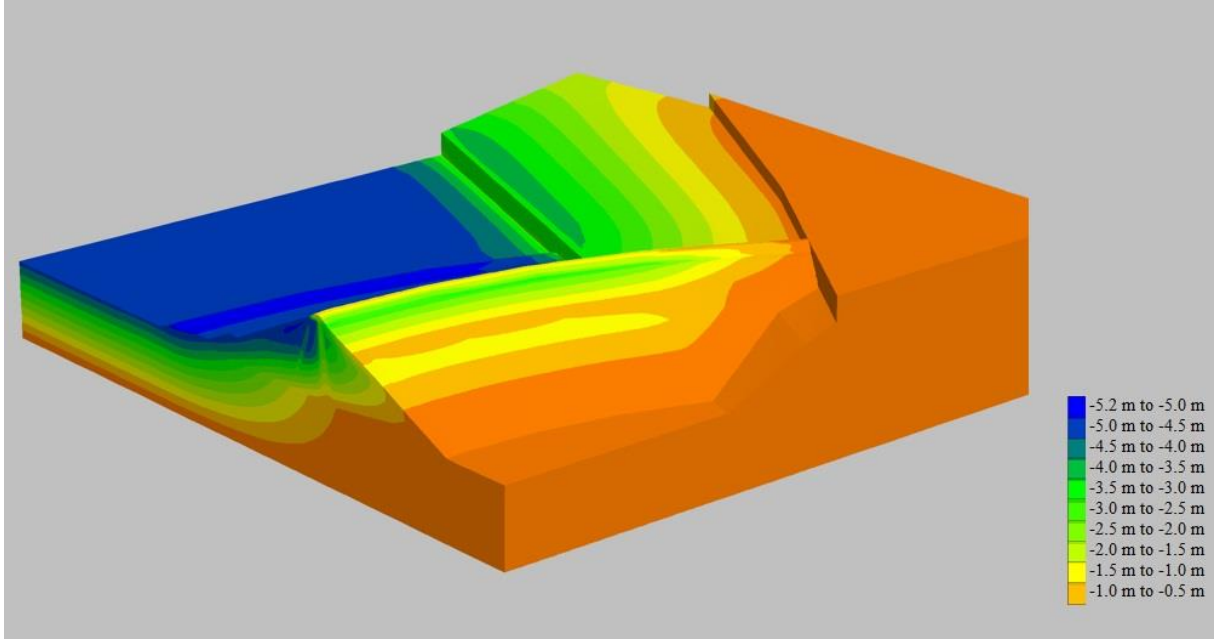
**Şekil 4.5** Barajda oluşan düşey yerdeğiştirme sonuçları.

Şekil 4.6 incelendiği zaman, maksimum düşey yerdeğiştirmelerin memba kısmında yani suyun mevcut olduğu kısımlarda olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca zeminin yanıl yüzeylerinde ise barajın gövdesine göre daha az yerdeğiştirmeler meydana gelmiştir. Barajın gövde kısmında en fazla yerdeğiştirme üst yüzeylerde meydana gelmiştir. Suya temas eden yüzeylerin, suya temas etmeyen yüzeylere göre daha fazla yerdeğiştirmelere maruz kalmıştır.

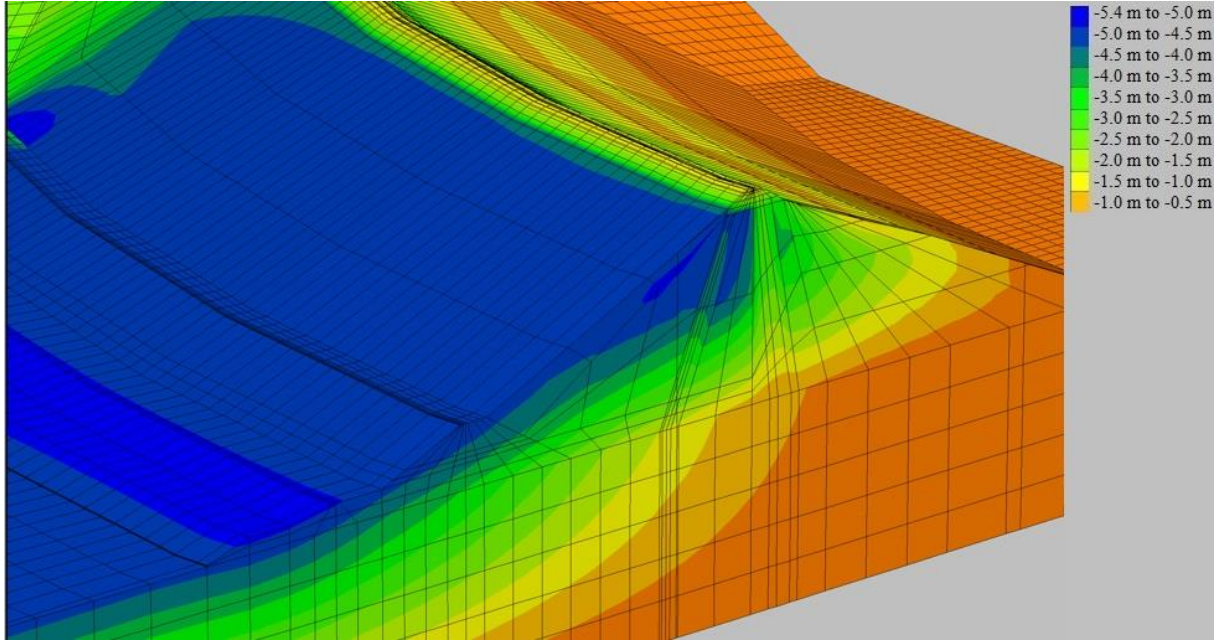




a) Barajın memba kısmından görünüşü

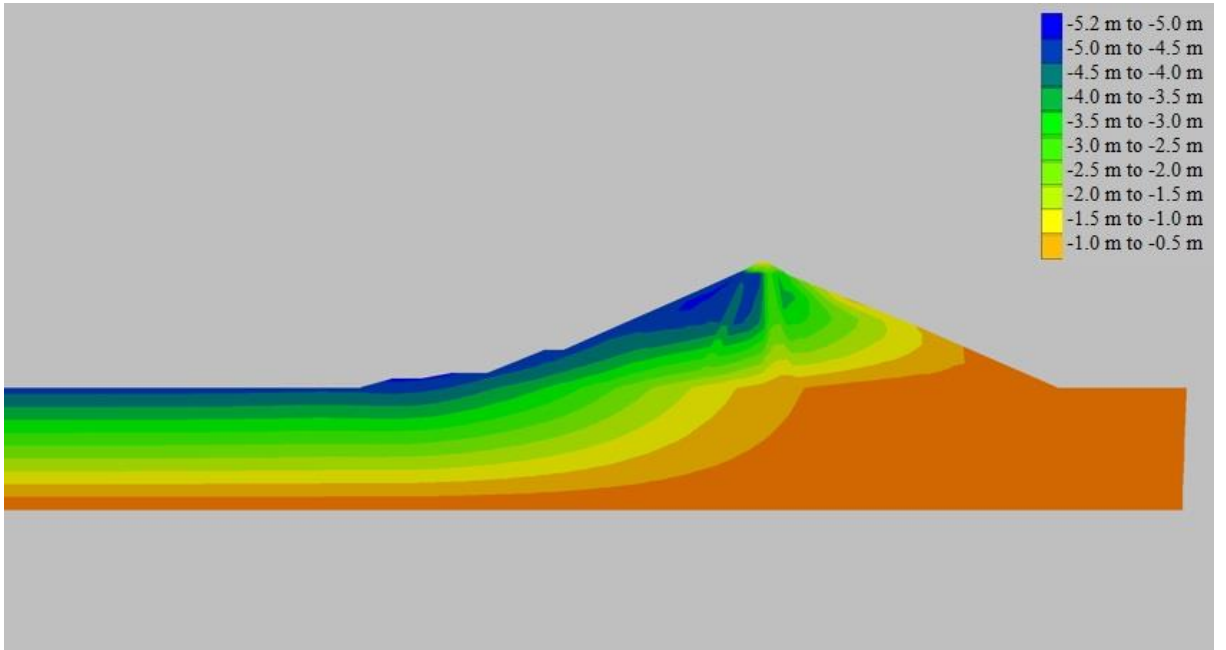


b) Barajın mansap kısmından görünüşü



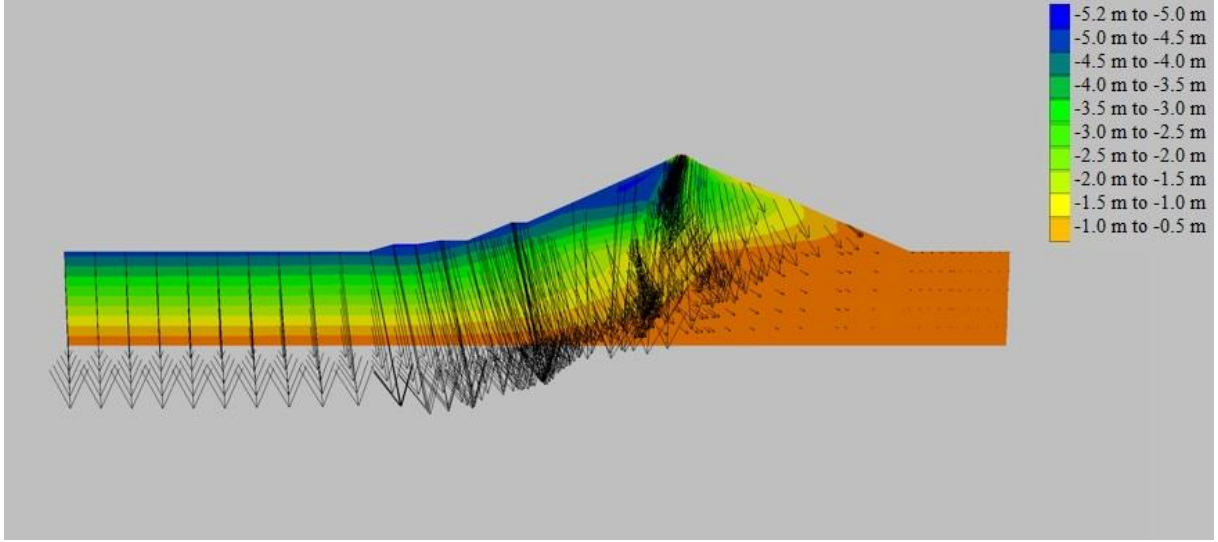
c) Düşey yerdeğıştirmelerin detaylı görünüşü

Şekil 4.6 Düşey yerdeğıştirmelerin 5-5 kesitinden görünümü.

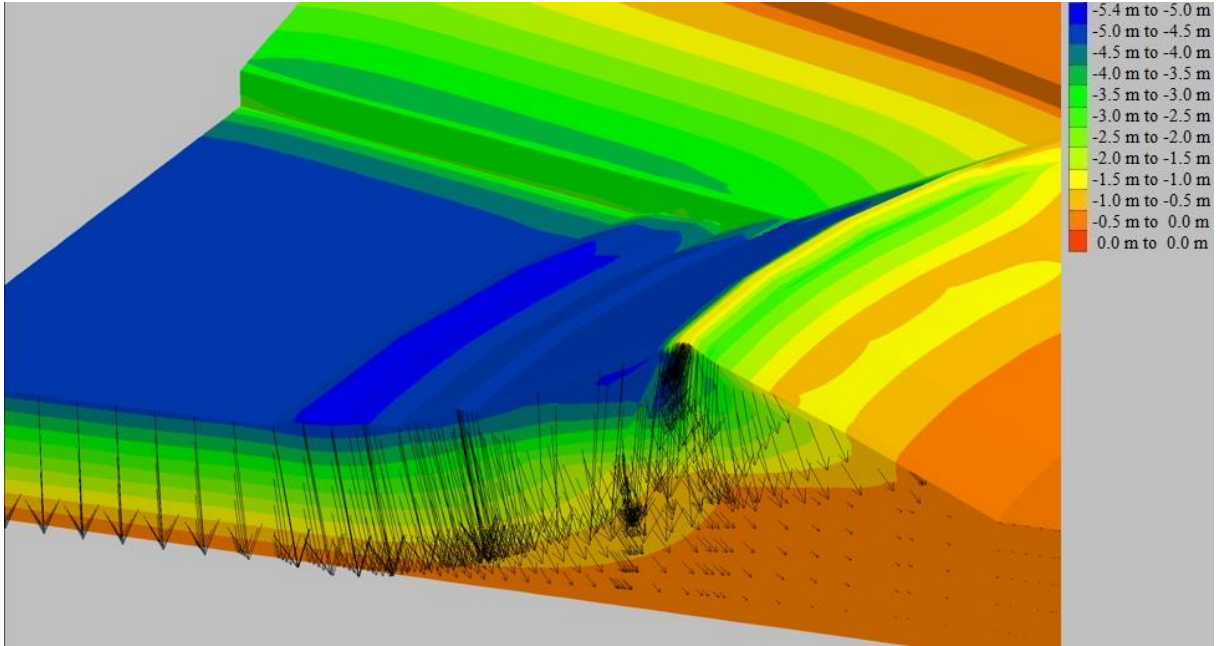


Şekil 4.7 Düşey yerdeğıştirmelerin düzlem görünümü.

Şekil 4.8 ve 4.9 incelendiğinde, düşey yerdeğiştirme vektörleri, en fazla suya temas eden yüzeylerde yoğun olarak görülmektedir. Düşey yerdeğiştirme vektörleri üst kotlarda daha büyük, alt kotlarda ise daha küçüktür.



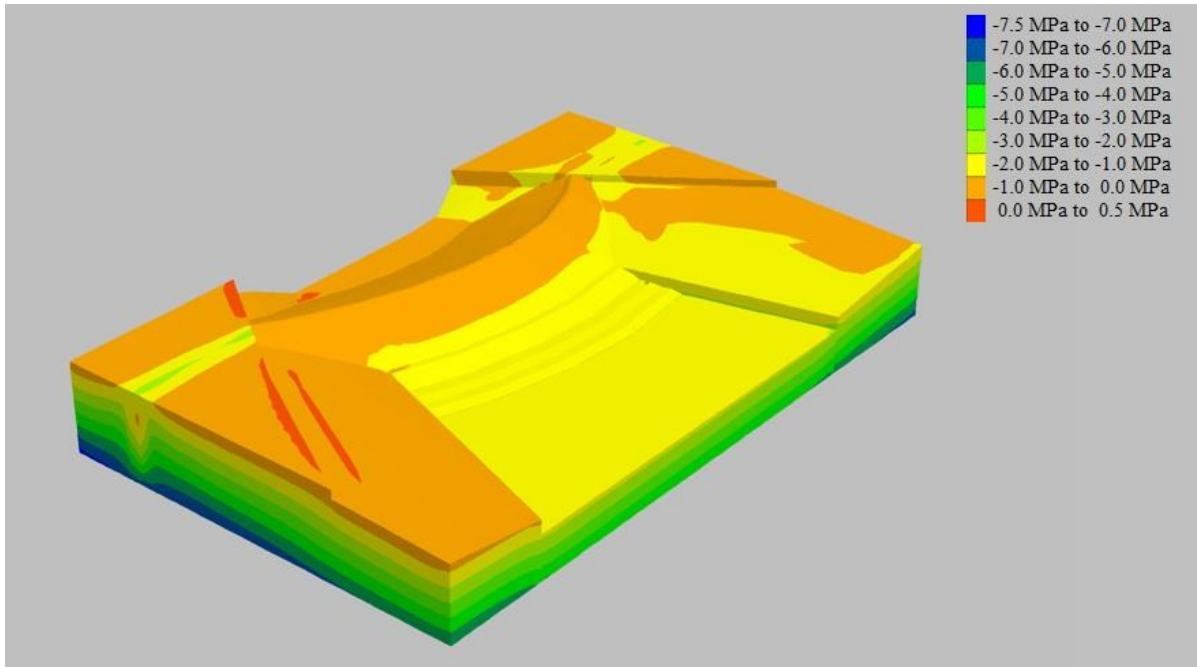
Şekil 4.8 Yerdeğiştirme vektörlerinin düzlem görünümü.



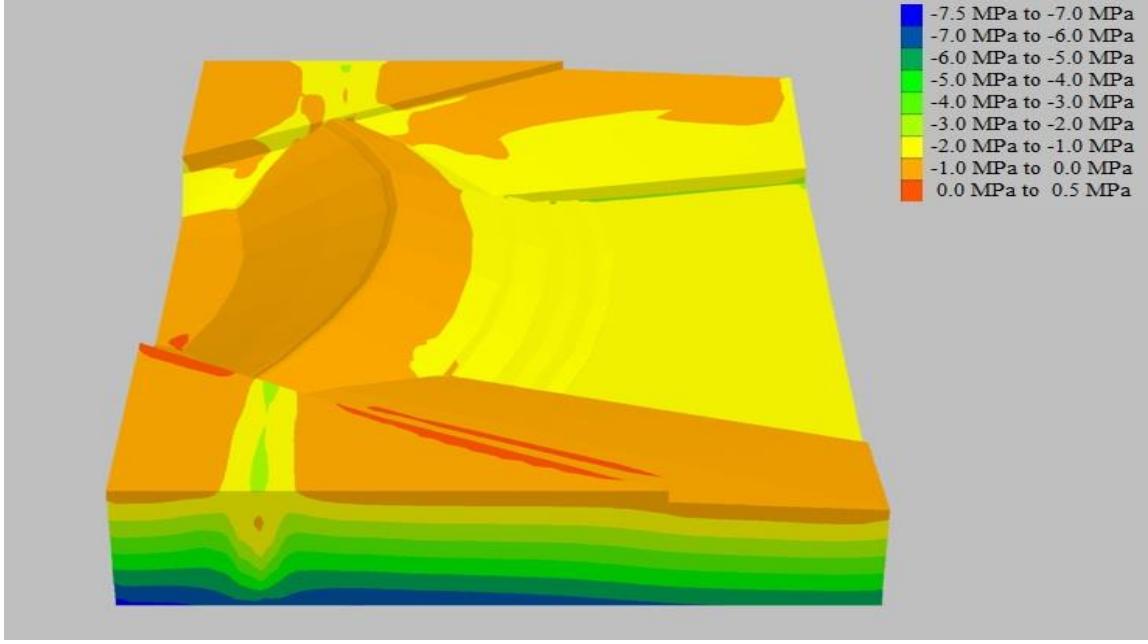
Şekil 4.9 Yerdeğiştirme vektörlerinin üç boyutlu görünümü.

#### 4.4 BARAJIN DOLU REZERVUARLI DURUMU İÇİN MAKSİMUM ASAL GERİLMELER

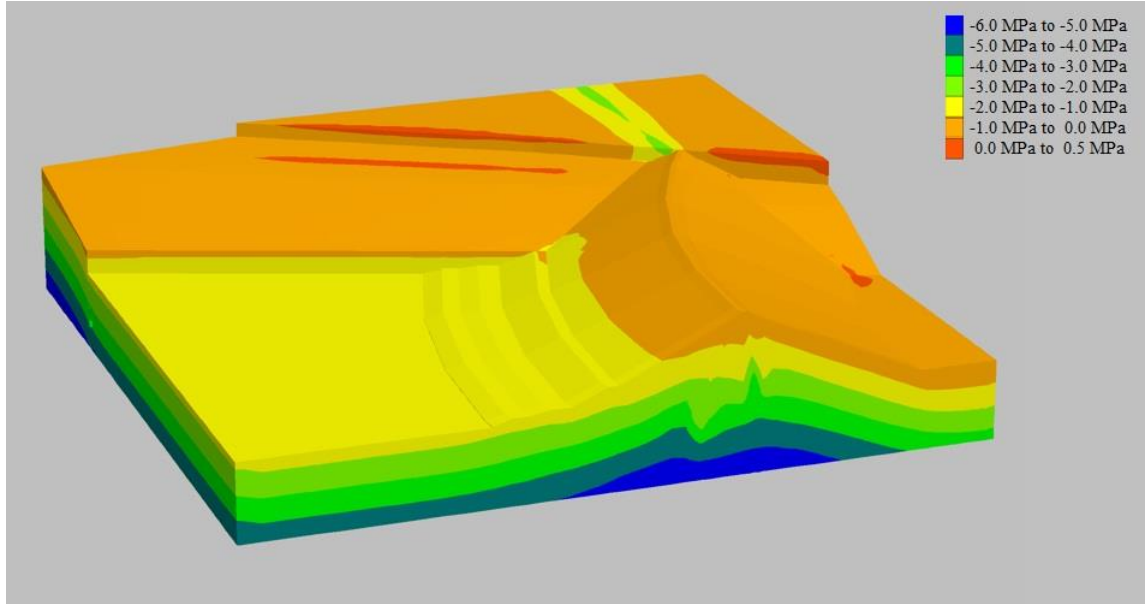
Şekil 4.10 ve 4.11’de, barajın rezervuarının dolu olması halinde gerilme sonuçları sunulmaktadır. Gerilme sonuçları incelendiğinde, barajın boş rezervuarlı durumundaki gerilme sonuçlarına göre daha büyük gerilme değerleri olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Barajın boş rezervuarlı durumunda üst yüzeylerde gerilmeler oluşmadığı görülmeye rağmen, barajın dolu rezervuarlı durumunda suya temas eden yüzeylerde yani üst kotlarda gerilmeler oluşmaktadır. Aşağılara inildikçe bu gerilme değerleri artmaktadır.



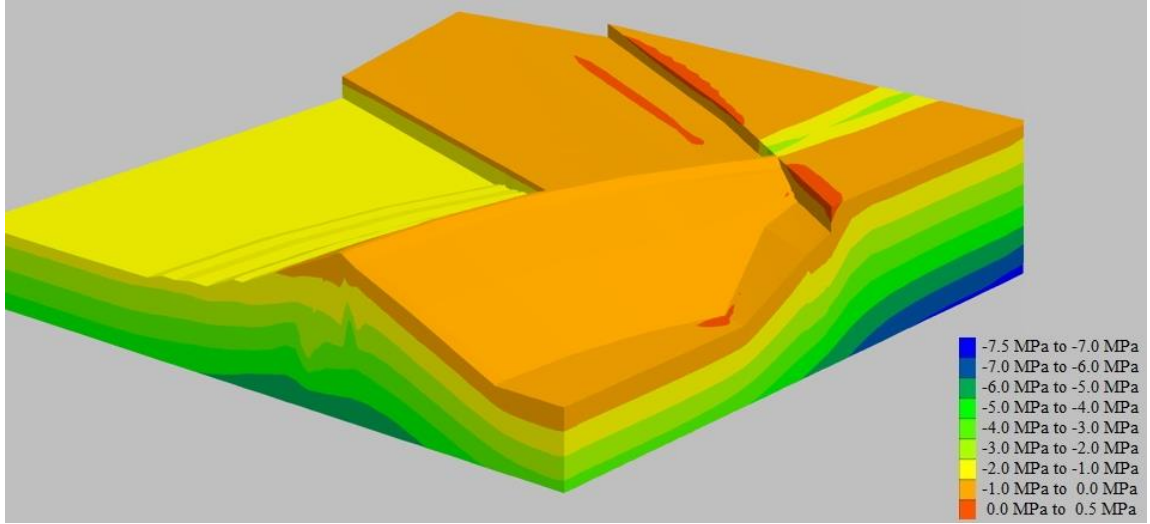
a) Genel görünüş



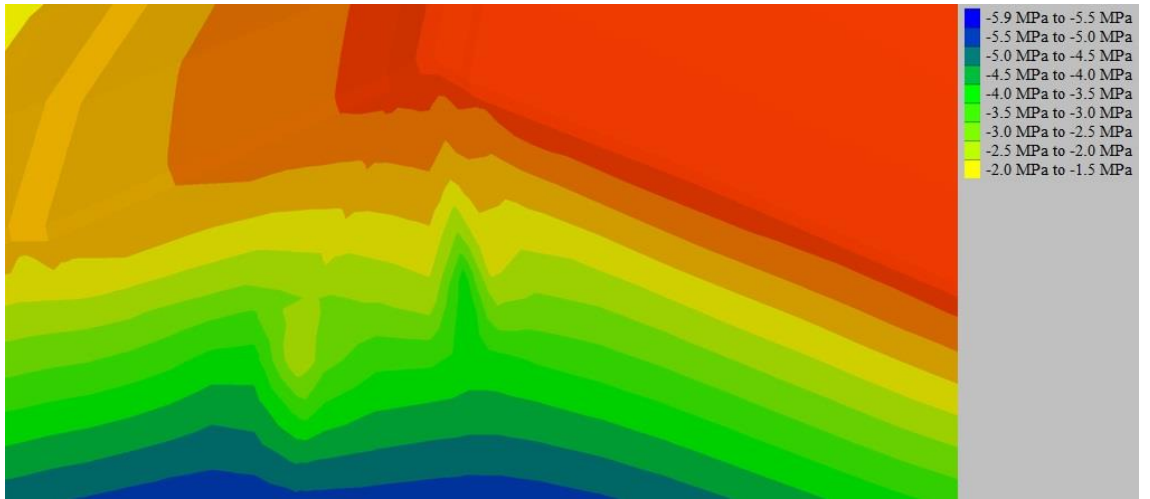
b) Sağdan görünüş



c) 5-5kesitinde oluşan asal gerilmelerin membadan görünüşü

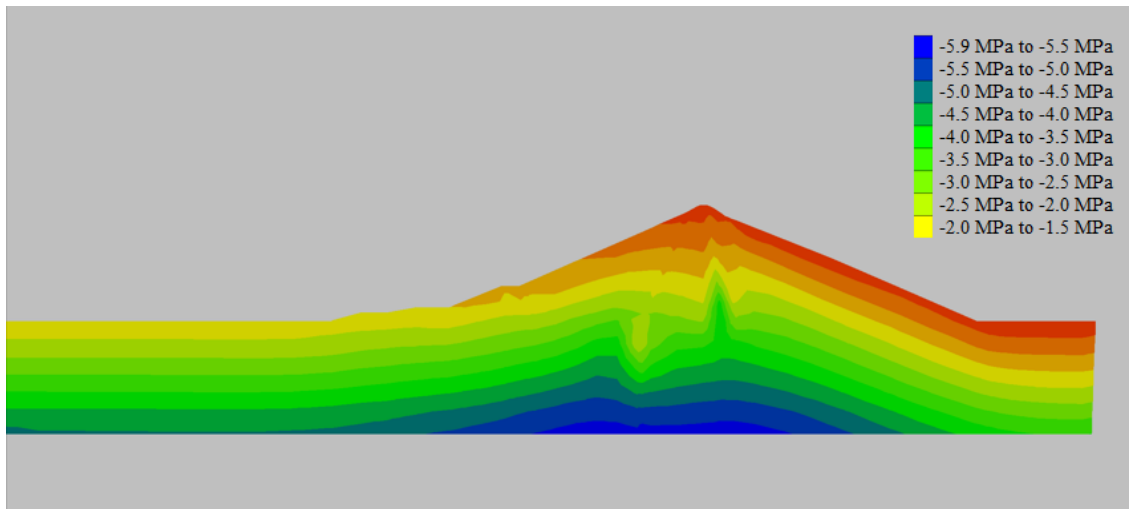


d) 5-5 kesitinde oluşan maksimum asal gerilmelerin mansaptan görünüşü



e) Barajın gövde kısmının detaylı görünüşü

Şekil 4.10 Barajda oluşan maksimum asal gerilme sonuçları.



Şekil 4.11 Barajda oluşan maksimum asal gerilmelerin iki boyutlu görünümü.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kil çekirdekli kaya dolgu baraj tipinde inşa edilen Atatürk Barajı'nın, boş ve dolu rezervuarlı durumları için barajda oluşan asal gerilme ve düşey yerdeğiştirme değerlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Barajın sonlu elemanlar ağı oluşturulurken, FLAC3D programında bulunan brick, wedge, uwedge elemanlar kullanılmıştır. Baraj gövdesindeki tüm malzemelerin doğrusal olmayan davranış gösterdiği varsayılarak, analizlerde kullanılan malzemelerin tümü için Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. İlk olarak, barajın boş rezervuarlı durumu için analizler yapılmıştır ve barajın hangi bölgesinde daha fazla asal gerilme ve düşey yerdeğiştirme yoğunluğunun olduğu belirlenmiştir. Daha sonra, barajın menba kısmına su yükleri eklenmiştir ve su yükünün etkisiyle barajın davranışı incelenmiştir.

Atatürk Barajı'nın dolu ve boş rezervuarlı durumları için düşey yerdeğiştirmeler karşılaştırıldığında, barajın boş rezervuarlı durumu için zemin kısmında çok az yerdeğiştirmeler meydana gelmektedir. Barajın gövde kısmında ise daha yoğun yerdeğiştirmeler oluşmaktadır. Dolu rezervuarlı durum için, suya temas eden yüzeylerde, barajın boş rezervuarlı durumuna göre daha fazla yerdeğiştirmeler olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre suya temas eden yüzeylerin daha fazla yerdeğiştirmelere maruz kaldığını açık bir şekilde görülmektedir.

Atatürk Barajı'nın çekirdeğinde, dolgu malzemesi olarak kil kullanılmıştır. Kil malzemesinin etrafında ise bazalt, alüvyon gibi daha sağlam dolgu malzemeler kullanılmıştır. Barajda rezervuar suyu olmaması durumunda, düşey yerdeğiştirmeler barajın kil çekirdeğinde yani kil malzemesinin bulunduğu bölgelerde oluşmaktadır.

Barajın boş ve dolu rezervuarlı durumları için yapılan statik analizler sonucunda elde edilen sayısal veriler aşağıdaki gibi karşılaştırılabilir;

- 1) Baraj boş rezervuarlı durumda 5-5 kesitinden kesilip iç bölgeleri incelendiğinde, barajın kil çekirdek kısmında yaklaşık 3.7 metre maksimum düşey yerdeğiştirmeler meydana gelmiştir.
- 2) Barajın dolu rezervuarlı durumu için, suya temas eden yüzeylerde 5.15 metre maksimum düşey yerdeğiştirme oluşmuştur. En büyük yerdeğiştirmeler barajın kretinde meydana gelmiştir.
- 3) Barajın boş rezervuarlı durumunda yerdeğiştirme vektörlerinin barajın kil çekirdek kısmında daha uzun ve daha yoğun olduğu görölmektedir. Zemin kısmında ise daha kısa yerdeğiştirme vektörleri oluşmuştur. Bu da barajın kil çekirdeğinde daha fazla yerdeğiştirmeler meydana geldiğini göstermektedir.
- 4) Barajın dolu rezervuarlı durumu için ise düşey yerdeğiştirme vektörlerinin barajın suya temas eden yüzeylerde yani suyun en alt kotunda daha uzun ve yoğun olduğu görölmektedir. Bu da suyun barajın davranışına etkisini açık bir şekilde ifade etmektedir.
- 5) Atatürk Barajı'nın boş ve dolu rezervuarlı durumu için asal gerilme sonuçları karşılaştırıldığında, barajın suya temas eden yüzeylerinde maksimum gerilmeler oluştuğu görölmektedir. Barajın boş rezervuarlı durumu incelendiğinde, üst yüzeylerde gerilmelerin sıfır ve sıfıra yakın asal gerilmeler meydana geldiği görölmektedir. Ancak aşağı kotlara inildikçe gerilmeler artmaktadır. Barajın en alt kotlarında 5.56 MPa değerinde basınç gerilmesi meydana gelmiştir.
- 6) Barajın dolu rezervuarlı durumu incelendiğinde, boş rezervuarlı durumda gerilmelerin sıfır olduğu bölgelerde yaklaşık 2 MPa değerinde basınç gerilmelerinin oluştuğu görölmektedir. En alt kotlarda ise 5.9 MPa değerinde maksimum basınç gerilmesi değeri elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen analiz sonuçları ile Devlet Su İşlerinin Atatürk Barajı'nda gözlemlendiği düşey yerdeğiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Gözlemlenen düşey yerdeğiştirme değerleri ile bu çalışmada elde edilen analiz sonuçları birbirine çok yakın değerlerdir. Bu da yapılan analizlerin doğruluğunu göstermektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Turfan M** (1996) Memleketimizde Yapılmış ve Yapılacak Barajlar, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 392: 11-17.
- [2] **DSİ** (2012) Dolgu Barajlar Tasarım Rehberi, *I. Barajlar Kongresi*, Rehber No: 003
- [3] **Öziş Ü** (2007) Su Yapılarının Tarihi Gelişmesi, *III. Ulusal Su Mühendisliği Konferansı*, Bildiriler Kitabı, İzmir, 1-19.
- [4] **Kalkan Y** (2014) Baraj Emniyeti ve Deformasyon İzleme Çalışmaları Atatürk Barajı Örneği, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (3): 40-50.
- [5] **Miglio L, Pagliaroli A, Lanzo G and Miliziano S** (2008) Seismic Analysis of a Rockfill Dam by FLAC Finite Difference Code, *AIP conference proceedings*, 1020:550.
- [6] **Djarwadi D, Suryolelono K B, Suhendro B and Hardiyatmo H C** (2014) Selection of soils as clay core embankment materials for rock fill dams to resist hydraulic fracturing, *Procedia Engineering*, 95: 489-497.
- [7] **Charatpangoon B, Kiyono J, Furukawa A and Hansapinyo C** (2014) Dynamic analysis of earthdam damaged by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 64: 50-62.
- [8] **Chen G, Jin D, Mao J, Gao H, Wang Z, Jing L, Li Y and Li X** (2014) Seismic damage and behavior analysis of earth dams during the 2008 Wenchuan earthquake, China, *Engineering Geology*, 180: 99-129.
- [9] **Noorzad R and Omidvar M** (2010) Seismic displacement analysis of embankment dams with reinforced cohesive shell, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 30: 1149-1157.
- [10] **Akkose M, Adanur S, Bayraktar A and Dumanoğlu A A** (2007) Stochastic seismic response of Keban dam by the finite element method, *Applied Mathematics and Computation*, 184: 704-714.
- [11] **Athani S S, Shivamant, Solanki C H and Dodagoudar G R** (2015) Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method, *Aquatic Procedia*, 4: 876-883.
- [12] **Yuan L, Liu X, Wang X, Yang Y and Yang Z** (2014) Seismic performance of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by large-scale shaking table tests, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 56: 1-12

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [13] **Çetin K Ö ve Unutmaz B** (2004) *Dolgu Barajların Deprem Davranışının Belirlenmesinde Mevcut Yöntemler*, 1. Ulusal Barajlar ve Hidrolik Santreler Sempozyumu
- [14] **Zhou C B, Liu W, Chen Y F, Hu R, and Wei K** (2015) Inverse modeling of leakage through a rockfill dam foundation during its construction stage using transient flow model, neural network and genetic algorithm, *Engineering Geology*, 187: 183-195.
- [15] **Albano M, Modoni G, Croce P and Russo G** (2015) Assessment of the seismic performance of a bituminous faced rockfill dam, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 75: 183-198
- [16] **Liu C, Zhang L, Bai B, Chen J and Wang J** (2012) Nonlinear analysis of stress and strain for a clay core rock-fill dam with FEM, *Procedia Engineering*, 31: 497-501.
- [17] **Korkmaz M** (2010) Kil Çekirdekli Dolgu Barajlarda Gerilme ve Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, 163 s.
- [18] **Oral Y Z** (2010) Deformation Behaviour of a Clay Cored Rockfill Dam In Turkey, Master Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences , Civil Engineering, Ankara, 97 s.
- [19] **Baziar M Z, Merrifield C M, Salemi S and Heidari T** (2004) Three Dimensional Dynamic Analysis of Alborz Dam With Asphalt and Clay Cores, *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, s. 23.
- [20] **Shakya Y and Suwal R** (2014) Seismic Deformation Analysis of Rockfill Dam, *Journal of the Institute of Engineering*, 10(1): 199–204
- [21] **Anastasiadis A, Klimis N, Makra K and Margaris B** (2004) On Seismic Behavior Of A 130m High Rockfill Dam: An Integrated Approach, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2933.
- [22] **Dong W and Yu Y** (2013) Static and Dynamic Analyses of High Core Rockfill Dams, *Constitutive Modeling of Geomaterials*, 701-707.
- [23] **Selvi M** (2012) Dolgu Barajlar Tasarım Rehberi, *1. Barajlar Kongresi*
- [24] **Thomas H H** (1976) *The Engineering of Large Dams, Part II*, John Wiley and Sons, London.
- [25] **Korkmaz M** (2010) Kil Çekirdekli Dolgu Barajlarda Gerilme ve Deformasyon Analizi, Yüksek Lisans, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, 163 s.
- [26] **Emiroğlu M E** (1991) Baraj Tip Seçiminin Belirlenmesinde Uzman Sistem Kullanımı. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [27] **Ulusoy İ C** (2015) Dolgu Barajların Güvenliğinde Risk Analizi: Atatürk Barajı Örneği, Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 114 s.
- [28] **Cetin H, Laman M and Ertunç A** (2000) Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rockfill dam, the Ataturk Dam in Turkey, *Engineering Geology*, 56: 225-242.
- [29] **Manav F** (2014) Baraj Güvenliği Ölçmeleri, Atatürk Barajı Çalışması, *Baraj Güvenliği Sempozyumu*, 377.
- [30] **Khanbabazadeh H** (2015) Dolgu Barajların Güvenliğinde Risk Analizi: Atatürk Barajı Örneği, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 233 s.
- [31] **Gerçek H** (1998) Kaya Mekaniği Ders Notları (yayımlanmamıs), ZKÜ Müh. Maden Mühendisliği Bölümü Zonguldak, 281 s.
- [32] **Gerçek H** (1998) İleri Kaya Mekaniği Ders Notları (yayımlanmamıs), ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak.
- [33] **Tandanand S and Thill R** (1987) *Mechanical Behavior of Coal Measure Rocks: Elastic-Inelastic Behavior*, Bureau of Mines, RI 9109, United States, 27 pp.
- [34] **Rankine W H J** (1857) On stability of loose earth. *Philosophic Transactions of Royal Society*, London Part 1, pp. 9-27.



## ÖZGEÇMİŞ

Murat ÇAVUŞLİ, 1989 yılında İzmit’de doğdu. İlköğrenimini Alikahya İlkokulunda, orta öğrenimini Alikahya Ortaokulunda, lise öğrenimini de 24 Kasım Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2008 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2012 yılında lisans öğrenimini tamamladı. 2014 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. Aynı yıl, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Bekar olan Murat ÇAVUŞLİ, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ:**

Adres: Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
İncivez-ZONGULDAK.

Tel: (+90) 372 291 19 35

E-posta: murat.cavusli@beun.edu.tr